UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

EDVAN REBULI SABINO

ESTUDO DE CASO DE ADEQUAÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE MEDIÇÃO, CONTROLE E MANOBRA DE UMA INDÚSTRIA DO RAMO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS ÀS NORMAS TÉCNICAS ATUAIS

VITÓRIA
2023

EDVAN REBULI SABINO

ESTUDO DE CASO DE ADEQUAÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE MEDIÇÃO, CONTROLE E MANOBRA DE UMA INDÚSTRIA DO RAMO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS ÀS NORMAS TÉCNICAS ATUAIS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Edvan Rebuli Sabino**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Documento assinado digitalmente
PAULO JOSE MELLO MENEGAZ
Data: 17/02/2023 16:04:05-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz Orientador

Documento assinado digitalmente
AUGUSTO CESAR RUEDA MEDINA
Data: 17/02/2023 17:04:16-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina
Examinador

Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Examinador

VITÓRIA
2023

Aos meus pais e a minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Aline e Ednaldo, por terem me dado amor e suporte em toda a minha vida para a busca ao conhecimento.

Aos meus familiares que potencializaram minha sede por conhecimento desde a minha infância.

À minha esposa, Izabel F. V. Mamede, por ser parte indissolúvel desta caminhada.

À minha irmã, Mayssa, por todo apoio e carinho.

Aos meus amigos, por fazerem essa caminhada ser mais amistosa e divertida.

Aos meus professores do IFES, por terem me fornecido um ensino público de excelência e fomentado o pensamento crítico ao longo da minha adolescência.

Aos meus professores da UFES, por oferecer um ensino público de excelência e contribuir, para além da na minha formação de engenheiro, em minha formação pessoal.

Todos vocês são partes do que me tornei hoje e influências direta no que ainda irei me tornar, obrigado!

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo para adequação da subestação de medição, controle e manobra da indústria Brasigran Brasileira de Granitos LTDA conforme requisitos indicados na ABNT NBR 14039:2005. Todos os equipamentos da indústria são energizados pelos alimentadores que passam por esta subestação, na qual é alimentada pela rede de distribuição da EDP Espírito Santo. A instalação atual baseia-se nas normas que antecedem a publicação da ABNT NBR 14039:2005. Esta subestação alimenta outras cinco subestações transformadoras, e estas cinco alimentam as linhas produtivas da indústria, em que uma falha na subestação de medição, controle e manobra acarretaria na interrupção geral da atividade fim da indústria. O objetivo deste trabalho é realizar um projeto de atualização técnica da subestação de medição em conformidade com a ABNT NBR 14039:2005, visando aumentar a confiabilidade, diminuindo os riscos elétricos de falta de energia e de segurança. Como metodologia, será analisada a norma e a situação da instalação atual, ponderando as adequações a serem executadas para atendimento da norma e maior confiabilidade na instalação. Contudo, uma eventual aplicação deste projeto somente será obrigatória em caso de reforma da subestação, conforme diz a norma. Como resultado, espera-se o projeto de uma subestação adequada à norma, mais segura e mais confiável, tal qual fosse de uma instalação nova.

Palavras-chave: NBR 14039, Subestação, Proteção, Reforma de Subestação, Cubículo de Medição, Média Tensão, Disjuntor de Média Tensão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
1.1. Justificativa 12
1.2. Objetivos 14
1.3. Organização do trabalho 15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO TRABALHO 16
2.1. Normas técnicas a serem consideradas 16
2.2. Classificação da tensão de conexão 17
2.3. Sistema de distribuição - EDP Espírito Santo 18
2.4. Subestações: nível de tensão, operação e tipos construtivos 19
2.5. Elementos de Projeto – SE de Entrada de 34,5 kV 21
2.5.1. Definição do arranjo físico 21
2.5.2. Transformador de potencial e transformador de corrente 23
2.5.3. Disjuntor geral de média tensão 23
2.5.4. Chave seccionadora 24
2.5.5. Sinalização e segurança da subestação 25
3. ESTUDO DE CASO 28
3.1. Rede de Distribuição – EDP Espírito Santo 30
3.2. Subestação de Entrada – Cenário Atual 31
3.2.1. Condutores 31
3.2.2. Transformadores de correntes, de potencial e medidores 32
3.2.3. Disjuntor de média tensão e relés 32
3.2.4. Chaves seccionadoras 33
3.2.5. Sinalização, segurança e localização 33
3.3. Subestação de Entrada – Desenvolvimento de Projeto Conceitual de SE de 34,5 kV 35
3.3.1. Projeto Elétrico 35
3.3.2. Especificações técnicas 35
3.3.2.1. Especificação do transformador de potência 36
3.3.2.2. Especificação dos transformadores de corrente 36
3.3.2.3. Especificação dos transformadores de potencial 39
3.3.2.4. Especificação do para-raios 40
3.3.2.5. Especificação do disjuntor de média tensão 41
3.3.2.6. Especificação das chaves seccionadoras 42
3.3.2.7. Especificação técnica do cabo de cobre de média tensão 42
3.3.2.8. Esquema de Aterramento 43
3.3.3. Especificações físicas dependentes do projeto eletromecânico 44
3.3.3.1. Classificação das influências externas 44
3.3.3.2. Proteção para garantir a segurança 44

3.3.3.2.1. Proteção contra choques elétricos – proteção total.....45
3.3.3.2.2. Proteção contra choques elétricos – proteção parcial.....46
4. CONCLUSÕES.....48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parte do diagrama unifilar da Subestação de Medição, Controle e Manobra da Brasigran 13
Figura 2 – Foto de uma subestação abrigada 21
Figura 3 – Chave seccionadora tripolar externa 25
Figura 4 - Terminal desconectável tipo cotovelo de média tensão 26
Figura 5 – Transformador do tipo pedestal 27
Figura 6 – Vista superior da planta industrial 28
Figura 7 – Alimentador de 11.4 e 34.5 kV em via pública, em frente a unidade consumidora 30
Figura 8 – Foto do compartimento blindado da subestação de entrada 32
Figura 9 – Foto de uma das chaves seccionadoras na SE de Entrada 34
Figura 10 – Layout da localização da SE de Entrada. Em vermelho, a estação de tratamento de água. Em verde, a SE. 34
Figura 11 - Sistema de aterramento TTN 44
Figura 12 – Espaçamento para instalações internas 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes de energia doméstica do Espírito Santo 19
Tabela 2 – Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação 22
Tabela 3 – Seção mínima do vergalhão de acordo com a potência da instalação 31
Tabela 4 – Parametrização do relé primário 33
Tabela 5 – Especificação do transformador de potência 37
Tabela 6 – Valores de corrente Inrush para conexão triângulo no primário 38
Tabela 7 – Dados da instalação importantes para o dimensionamento do transformador de corrente (TC) 39
Tabela 8 – Esapecificação do transformador de corrente (TC) 39
Tabela 9 – Especificação do transformador de potencial (TP) 40
Tabela 10 – Especificação do pára-raios 40
Tabela 11 – Especificação do disjuntor de médio tensão 41
Tabela 12 – Especificação da chave seccionadora 42
Tabela 13 – Classificação das influências externas 45
Tabela 14 – Espaçamentos para subestação interna, conforme Figura 10 47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico comparativo de demanda utilizada entre 2018 e 2021 29
Gráfico 2 – Demanda em kW x ano corrente 37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	*American National Standards Institute*
BC	Biblioteca Central
Hz	Hertz
kA	Quilo-ampere
kV	Quilovolt
LTDA	Sociedade Limitada
mm	Milímetro
NBR	Norma Técnica Brasileira
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
XLPE	Polietileno reticulado

1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas elétricos de potência surgem, com certa frequência, interrupções no fornecimento de energia elétrica devido a três principais fatores: curto-circuito, sobrecarga e sobretensão de diferentes origens. Para tais problemas, deve-se ter um sistema de proteção atrelado a instalação elétrica, cuja a principal função seja de desconectar toda a instalação elétrica mediante qualquer anormalidade que a faça operar fora de seus limites (MAMEDE FILHO, 2013).

1.1. Justificativa

Instalações anteriores ao ponto de entrega são de responsabilidade da concessionária, instalações posteriores ao ponto de entrega são de responsabilidade da unidade consumidora. Ponto de entrega é definido como o ponto de conexão do SEP (Sistema Elétrico de Potência) com as instalações da unidade consumidora (ANEEL, 2000).

Subestações de entrada de energia são classificadas em duas tipologias, divididas pela capacidade instalada de 300 kVA. Para subestações menores de 300 kVA, em que há duas opções de proteção mínima: via relés secundários e disjuntor de média tensão ou via chave seccionadora, fusível e disjuntor de baixa tensão. Para subestações maiores que 300 kVA, exclusivamente a proteção mínima deverá contar com disjuntor de média tensão, acionado por relés secundários (ABNT NBR 14.039, 2005).

Portanto deve-se pensar em proteção, por parte da unidade consumidora, desde a subestação de medição, e no caso da Brasigran Brasileira de Granitos, subestação de medição, controle e manobra. Importante dimensionar adequadamente todos os componentes que façam parte da subestação, precavendo-se assim de possíveis falhas, como as supracitadas. O referencial para um dimensionamento adequado para uma subestação é a NBR 14039:2005, pois nela consta os requisitos mínimos de proteção, tanto dos riscos elétricos, quanto dos riscos adicionais.

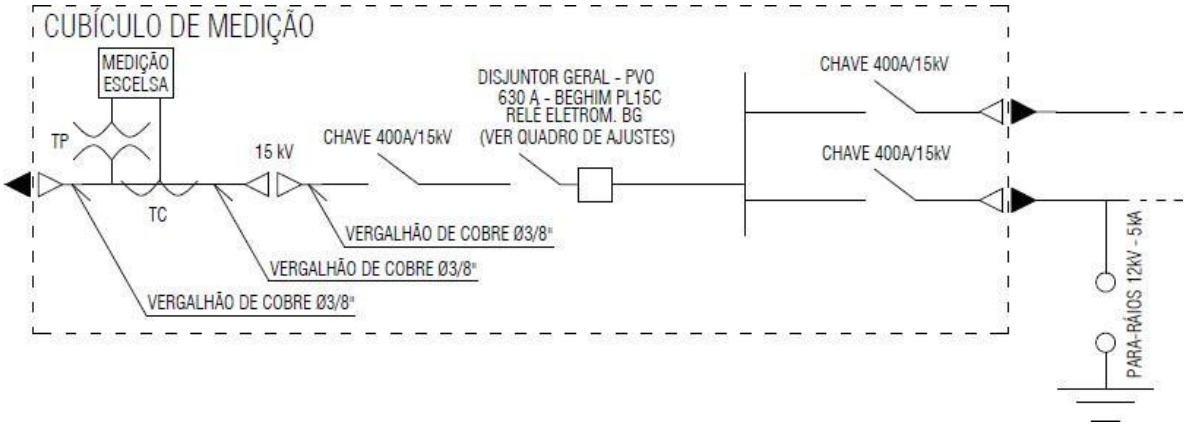
Uma instalação cujo o funcionamento antecede a publicação da NBR 14039:2005, pode continuar seu funcionamento regular, desde que não seja feita nenhuma reforma (ABNT NBR 14039:2005). Há muitas empresas neste cenário que antecedem a norma, e é previsível

que em algum momento, em todas elas, ou por ampliação ou por vida útil, seja necessário realizar mudanças para readequar a instalação a carga em conformidade com os critérios atuais. No caso da Brasigran, cujo diagrama unifilar consta na Figura 1, há a perspectiva de ampliação e aumento da confiabilidade na sua instalação elétrica.

Em relação a ampliação (aumento de carga), o processo é regulamentado pela Resolução Normativa N° 1.000, de 2021, da ANEEL, cujo artigo 23 regulamenta os critérios no qual a distribuidora deve definir o grupo e o nível de tensão de conexão ao sistema elétrico. Atualmente a Brasigran está definida dentro do Grupo A, com tensão maior ou igual a 2,3 kV e menor que 69 kV, pois tem uma potência instalada maior que 75 kW (3.650 kVA) e uma demanda contratada menor que 2.500 kW (2.000 kW) (ANEEL, 2021).

Em um futuro próximo, há a expectativa de aumento de demanda devido a aumento de carga, ultrapassando o limiar de 2.500 kW. Em caso de solicitação da distribuidora para aumento de nível de tensão de fornecimento, a unidade consumidora deverá modificar sua subestação de entrada. Portanto, o projeto a ser desenvolvido deve ser baseado de acordo com as normas aplicáveis e ir além, concedendo a planta seletividade, zona de atuação, velocidade de atuação, sensibilidade, confiabilidade e ser automático, obviamente. A subestação de medição, controle e manobra da Brasigran foi escolhida pois apresenta uma necessidade de readequação, além de se ter acesso fácil a todas as informações técnicas que forem necessárias e relevantes ao estudo.

Figura 1 – Parte do diagrama unifilar da Subestação de Medição, Controle e Manobra da Brasigran



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A EDP Espírito Santo, em seu documento de padrão técnico “FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO – EDP ESPÍRITO SANTO”, item 6.1 define suas classes de tensão em 15 (sendo 13,8, 13,2 e 11,4) e em 35 kV (34,5 kV). No caso de ultrapassagem da demanda para acima de 2.500 kW, considera-se que a maior probabilidade seja da EDP utilizar-se da Resolução Nº 1.000, artigo 23, parágrafo 5º, onde poderá fornecer tensão de fornecimento abaixo de 69 kV (o 34,5 kV citado em sua norma técnica), após estudo técnico e concordância da unidade consumidora.
Uma reforma em um cubículo de medição implica diretamente no desligamento prolongado de toda a carga a jusante. Este fato torna imediatamente inviável um projeto de adequação à norma sem uma real necessidade técnica ou solicitação de alguma autoridade. Na prática, essa adequação somente aconteceria em caso de uma notificação, falha técnica (em que, para correção, caracteriza-se uma reforma – há casos em que não caracteriza-se reforma) sob risco de suspensão de fornecimento de energia elétrica ou recusa em aumento da demanda contratada.

A viabilidade do projeto passa diretamente na otimização do tempo de desligamento da unidade consumidora e portanto, o projeto considera a construção de uma nova subestação de entrada, considerando o recebimento de energia em nível de tensão 34,5 kV.

1.2. Objetivos

O trabalho consiste na análise da subestação de medição, controle e manobra, denominado cubículo de medição, levando em consideração os componentes à montante e à jusante, quanto a sua confiabilidade operacional e a adequação a Norma Técnica da ABNT 14.039:2005. Consiste também em identificar e evidenciar as principais normas aplicáveis ao desenvolvimento de um cubículo de medição (subestação de medição, controle e manobra) abastecido em tensão primária de 34,5 kV.

Os objetivos específicos, os quais auxiliarão no cumprimento do objetivo geral, são os listados abaixo:

- Evidenciar e descrever os pontos das normas utilizadas como referência para projetos elétricos de média tensão aplicáveis à situação do projeto.
- Classificar as partes da subestação de acordo com os novos níveis de tensão e potência, enquadrando toda subestação na norma ABNT NBR 14039:2005.

- Elaborar um projeto elétrico de referência, adequado às normas, da nova subestação de medição, controle e manobra, utilizando os conceitos e definições estudados ao longo do desenvolvimento do projeto.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho foi dividido em quatro seções, cujos assuntos são explicados a seguir. Na presente seção foi contextualizado o assunto de forma geral, apresentando o problema a ser estudado e referenciando as principais normas vigentes.

Na seção dois seção é explicado a referência técnica em que será fundamentado todo o projeto, as pesquisas que foram feitas e detalhes relevantes para tomada de decisão.

Na seção três aborda o estudo de caso deste projeto e a sua contextualização detalhada. Por fim, esta seção traz a elaboração do projeto elétrico básico, adequado e atendendo todas as normas técnicas. Na seção quatro são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO TRABALHO

Nesta seção são estudadas as principais normas técnicas e resoluções brasileiras que regem os projetos de instalações elétricas de média tensão, principalmente a ABNT NBR 14.039:2005 e a Resolução Normativa nº 1000:2021, substituta da Resolução Normativa nº 414:2010. Os principais pontos destas normas serão estudados de acordo com a demanda deste projeto, focando nos artigos, parágrafos e textos referentes a classificação, proteção, manutenção e operação de subestações de entrada.

2.1. Normas técnicas a serem consideradas

As recomendações da ABNT NBR 14.039:2005 são de extrema importância para a operação da instalação elétrica e de todo o sistema elétrico de potência, pois uma falha pode causar prejuízos a toda carga à jusante e à montante da instalação se não bem dimensionada. A norma estabelece um sistema para o projeto e execução de instalações elétricas de média tensão, tensão de 1,0 a 36,2 kV, de modo a garantir a segurança e continuidade do serviço. As prescrições da norma constituem em exigências mínimas a serem aplicadas nas instalações elétricas (novas ou reforma em instalações existentes), para que em caso de falha elétrica, não venham a prejudicar e perturbar as instalações vizinhas ou causar danos a pessoas, aos bens ou ao meio ambiente.

A Resolução Normativa nº 1.000 foi publicada em setembro de 2021 e nela foram revogadas as Resoluções Normativas nº 414, 470 e 901. É importante para a classificação da subestação considerarmos a Resolução Normativa nº 1.000 da ANEEL, em especial seu artigo 23, que define o nível de tensão de conexão que a distribuidora deve disponibilizar de acordo com critérios pré-determinados.

Além das normas técnicas citadas acima, é preciso atender em sua integridade ao padrão técnico da EDP Espírito Santo, PT.DT.PDN.03.14.001 – Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição. Nele são estabelecidos os critérios, condições gerais e limites de fornecimento de energia elétrica em tensão de distribuição primária, para as instalações novas, bem como em reformas e ampliações das unidades existentes.

O padrão técnico da EDP Espírito Santo faz referência a algumas normas técnicas que são

aplicáveis neste trabalho e também servem como referência.

- NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão;
- NBR 6856 – Transformador de corrente;
- NBR 7282 – Dispositivos fusíveis de alta tensão – Dispositivos tipo expulsos – Requisitos e métodos de ensaio;
- NBR 7286 – Cabos de potência com isolação extrudada de borracha etilenopropileno (EPR) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho;
- NBR 7287 – Cabos de potência com isolação extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos de desempenho;
- NBR 9314 – Emendas e terminais para cabos de potência com isolação para tensões de 3,6/6 kV a 27/35 kV;
- NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV;
- NBR 15751 – Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos;
- NBR IEC 62271-200 – Conjunto de manobra e controle de alta-tensão - Parte 200: Conjunto de manobra e controle de alta-tensão em invólucro metálico para tensões acima de 1 kV até e inclusive 52 kV;
- NR-10 – Norma Regulamentadora Nº 10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade.
- Resolução 1000 - Resolução Nº 1000 de 07 de dezembro de 2021 da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;

Os principais pontos destas normas serão estudados de acordo com a demanda deste projeto, focando nos artigos, parágrafos e textos referentes a classificação, proteção, manutenção e operação de subestações de entrada.

2.2. Classificação da tensão de conexão

Na Resolução Normativa ANEEL nº 1.000 estão dispostas as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, nas quais estão dispostos os direitos e deveres do consumidor e demais usuários do serviço.

Nela temos a definição para classificação do consumidor em seu grupo e subgrupo. Os consumidores abastecidos em tensão acima de 2,3 kV são classificados como pertencentes

ao Grupo A, com seu subgrupo definido a partir das regras abaixo:

- Subgrupo A1: tensão de conexão maior ou igual a 230 kV;
- Subgrupo A2: tensão de conexão maior ou igual a 88 kV e menor ou igual a 138 kV;
- Subgrupo A3: tensão de conexão igual a 69 kV;
- Subgrupo A3a: tensão de conexão maior ou igual a 30 kV e menor ou igual a 44 kV;
- Subgrupo A4: tensão de conexão maior ou igual a 2,3 kV e menor ou igual a 25 kV;
- Subgrupo AS: tensão de conexão menor que 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição;

De acordo com a potência instalada e com a demanda contratada, fica definido o enquadramento da unidade consumidora em um grupo e subgrupo, mas sempre considerando o melhor aspecto financeiro possível. Para uma demanda contratada menor que 2,5 MW e uma potência instalada maior que 75 kW, fica definido que o enquadramento do consumidor deverá ser entre o subgrupo A4 e A3a. Com uma demanda contratada maior que 2,5 MW, o consumidor teoricamente ficaria enquadrado no grupo A3.

Sobretudo, no Artigo 23, Parágrafo 4 e 5, a resolução permite que a unidade consumidora solicite conexão em um nível de tensão diferente do sugerido, assim como a unidade distribuidora pode enquadrar a unidade consumidora em outro nível de tensão, desde que sempre haja um estudo técnico e comum acordo entre ambos. Estes parágrafos são extremamente importante, pois apesar do SEP trabalhar majoritariamente com determinados níveis de tensão (13,8, 69, 138, 230 kV), há casos em que não seria possível enquadrar a unidade consumidora em um nível de tensão que atendesse a Resolução, por não haver essa tensão de distribuição na unidade distribuidora.

Portanto, uma unidade consumidora pode solicitar ser atendida em nível de tensão diferente do disposto na normativa, assim como a unidade distribuidora pode sugerir um atendimento em tensão diferente do disposto na normativa, desde que seja feito um projeto e estudo técnico de viabilidade, respeitando os princípios de segurança definidos.

2.3. Sistema de distribuição - EDP Espírito Santo

A geração de energia no estado do Espírito Santo é diversificada, conforme podemos ver na Tabela 1, com várias fontes de energia elétrica.

Tabela 1 – Fontes de energia doméstica do Espírito Santo

GERAÇÃO DOMÉSTICA	POTÊNCIA (MW)	%
08 - UTEs (> 5 MW) - Usinas Termelétricas	1.025,30	62,31%
27 UTEs (< 5 MW) - Usinas Termelétricas	35,3	2,15%
04 UHEs - Usinas Hidrelétricas	313,3	19,04%
14 PCHs - Pequenas Centrais Hidrelétricas	246,4	14,97%
06 CGHs - Centrais Geradoras Hidrelétricas	1,9	0,12%
2.429 UFVs - Geradora Solar Fotovoltaica	23,3	1,42%

Fonte: EDP-ES (2018).

Segundo a ARSP-ES, Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo, a situação energética atual do Espírito Santo é de confiabilidade, por haver um sistema de Transmissão e Distribuição interligado com o Sul/Sudeste/Centro-Oeste através de um anel de transmissão. As concessionárias de distribuição de energia elétrica no estado são a EDP-ES e a Empresa Luz e Força Santa Maria – ELFSM.

Referente à rede de distribuição da EDP-ES, a concessionária fornece tensões primárias nos níveis de 11,4, 13,2, 13,8 e 34,5 kV, sendo a tensão de 34,5 kV restrita a algumas regiões da área de concessão, informado via consulta à EDP Espírito Santo para detalhes. Não é possível, portanto, que exista uma unidade consumidora pertencente ao subgrupo A3 conectada na rede de distribuição da EDP-ES, mesmo que ultrapasse o limite de 2,5 MW de demanda contratada, restando recorrer aos parágrafos 4 e 5 do artigo 23 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000. A concessionária que se enquadrar neste perfil deverá ser fornecida na tensão que haja viabilidade técnica e econômica, de preferência no nível de tensão mais próximo da tensão teórica disponível na região.

2.4. Subestações: nível de tensão, operação e tipos construtivos

O tipo mais comum de subestação é a que eleva ou diminui o nível de tensão aplicada no barramento de entrada do fluxo de potência. O nível de tensão indicado a uma subestação pode ser indicado através da Equação 1, com tensão em kV e potência instalada em MW:

$$V_{se} = 18 \,.\, \sqrt{P_{inst}} \qquad (1)$$

onde:

V_{se} → Tensão ideal da Subestação.
P_{inst} → Potência instalada.

Portanto, uma indústria com potência instalada de 3,65 MW, tem uma tensão indicada em 34,39 kV. Como a tensão mais próxima num sistema de distribuição seria a de 34,5 kV, esta seria a tensão ideal para essa carga instalada, que é o caso do estudo de caso explicado detalhadamente na Seção 5.

Além de seu nível de tensão, as subestações também são definidas pela sua característica de operação e por seu tipo construtivo. Dentre os modelos de subestação temos a elevadora, abaixadora, manobra, distribuição, conversora, entre outros, destaca-se nesse projeto a subestação abaixadora e a subestação de consumidor, ambos os casos com tipo construtivo abrigado.

A subestação abaixadora é a aquela que recebe em seu barramento primário uma tensão num nível maior do que a que entrega em sua saída, como o próprio nome já diz. Normalmente utilizada quando recebe em seu barramento primário uma linha de transmissão em alta tensão e precisa entregar um nível de tensão de distribuição, para não afetar completamente a região com linhas de transmissão em alta tensão. Entretanto pode ser encontrada também em área industrial, caracterizando-se como uma subestação abaixadora e de consumidor.

Uma subestação abrigada é aquela cujos os equipamentos são instalados no interior de uma edificação, como na Figura 2. Este tipo de subestação normalmente é feito para ambientes com alto grau corrosivo, seja pelo litoral, seja pelo ambiente industrial agressivo. São comuns para níveis de tensão de 15 a 88 kV, mas para subestações com nível mais alto, quando necessário que seja abrigada, normalmente utiliza-se subestação compacta Gas Insolution Switchgear (GIS), em que todos os componentes são instalados em invólucros com gás hexafluoreto (SF6) pressurizado.

Figura 2 – Foto de uma subestação abrigada

Fonte: ATS Elétrica (2011).

Há também as subestações blindadas, cujo grau de proteção e o isolamento é maior do que o de subestações abrigadas. São basicamente subestações mais compactadas, com todos os elementos de proteção blindados numa estrutura metálica, com acesso somente aos seus barramentos de entrada e saída. Normalmente são construídas para sistemas de média tensão de até 34,5 kV.

2.5. Elementos de Projeto – SE de Entrada de 34,5 kV

Nesta seção do trabalho são detalhados os principais elementos de projetos de uma subestação de entrada com nível de tensão de 34,5 kV (primário) para 11,4 kV (secundário), localizada dentro da unidade consumidora, do tipo abrigada.

2.5.1. Definição do arranjo físico

O arranjo físico, também conhecido como *layout*, trata-se da definição da disposição dos elementos de projeto e da localização da subestação. É importante dimensionar a localização da subestação, bem como a posição dos componentes, pois qualquer modificação após definição dos elementos causa retrabalho em todo o projeto.

Deve ser considerado no arranjo físico as condições impostas pelo padrão técnico da concessionária. A EDP-ES define que a subestação de entrada deve estar preferencialmente instalada no limite da propriedade com a via pública, em local de fácil acesso e o mais próximo possível da entrada principal, facilitando o acesso de pessoas e veículos na instalação. As subestações do tipo abrigada também devem ser situadas preferencialmente em locais isolados das outras edificações e ao nível do solo. Em caso contrário das especificações da EDP-ES, deve ser justificado tecnicamente cada caso à concessionária.

Os elementos de projeto são de extrema importância para definição do arranjo físico da subestação. O tipo de barramento a ser utilizado implica diretamente no espaço físico necessário para a subestação, uma vez que depende da forma construtiva e modelo do barramento para definição do espaçamento entre os condutores. Na Tabela 2 temos os valores mínimos para espaçamentos entre os condutores, de acordo com a ABNT NBR 14.039:2005.

Tabela 2 – Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação

Tensão Nominal da Instalação em kV	Tensão de ensaio à frequência industrial (valor eficaz) kV	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (valor de pico) kV	Distância mínima fase/terra e fase/fase [1]	
			Interno (mm)	Externo (mm)
3	10	20	60	120
		40	60	120
4,16	19	60	90	120
6	20	40	60	120
		60	90	120
13,8	34	95	160	
		110	180	
		125	220	
23,1	50	95	160	
		125	220	
34,5	70	145	270	
		170	320	

Fonte: ABNT NBR 14.039 (2005).

As distâncias mínimas mostradas na Tabela 2 são distâncias medidas entre a extremidade mais próxima do outro condutor e não de centro a centro.

2.5.2. Transformador de potencial e transformador de corrente

Os transformadores de medição são os transformadores de potencial e de corrente, que servem como sensores para leitura e medição da energia consumida, abaixando a tensão e a corrente para níveis que seja possível ler. Os transformadores de medição devem estar dispostos de tal forma a serem de fácil acesso para sua verificação ou eventual troca. Além da medição, os transformadores de corrente também são utilizados nos disjuntores de média tensão, na sua parte de controle, monitorando as correntes de falha e sobrecarga.

2.5.3. Disjuntor geral de média tensão

Os disjuntores de média tensão atualmente são controlados via relé secundário, com maior precisão, tecnologia e normalmente relés numéricos, eletrônicos e digitais. Entretanto, em subestações anteriores a norma ABNT NBR 14.039:2005 era comum encontrarmos disjuntor de média tensão, motorizado ou a óleo, com controle via relé primário eletromecânico.

O tipo de relé primário, medição direta, normalmente é um relé com função apenas temporizada para sobrecorrente. Este tipo de relé limita as possibilidades de proteção em relação relé secundário, de medição indireta.

Atualmente os disjuntores de média tensão são obrigatórios para unidades consumidoras com transformadores acima de 300 kVA e devem ser acionados através de relés secundários com no mínimo as funções 50 e 51, fase e neutro (quando fornecido). O controle dos relés deve ser garantido, na falta de energia, por uma fonte de alimentação reserva com autonomia mínima de 2h, que garanta a sinalização dos eventos ocorridos e acesso à memória de registro dos relés, sendo esta fonte de alimentação, normalmente um *nobreak*. Abaixo, na íntegra, as notas da ABNT NBR 14.039:2005 referentes aos relés do disjuntor de média tensão:

1. Quando forem utilizados relés com as funções 50 e 51 do tipo microprocessado, digital, auto-alimentados ou não, deve ser garantida, na falta de energia, uma fonte de alimentação de reserva, com autonomia mínima de 2 h, que garanta a sinalização dos eventos ocorridos e o acesso à memória de registro dos relés.
2. Os transformadores para instrumentos conectados aos relés secundários devem ser instalados sempre a montante do disjuntor ou chave a ser atuado(a), garantindo assim a proteção contra falhas do próprio dispositivo.

3. Para qualquer tipo de relé, deve ser instalado um dispositivo exclusivo que garanta a energia necessária ao acionamento da bobina de abertura do disjuntor, que permita teste individual, recomendando-se o uso de fonte capacitiva.
4. O sistema geral de proteção da unidade consumidora deve permitir coordenação com o sistema de proteção da concessionária, ser dimensionado e ajustado de modo a permitir adequada seletividade entre os dispositivos de proteção da instalação.

Fica a critério da unidade consumidora a adição de proteções adicionais ao circuito, quando aplicável. Outros tipos de proteção que podem ser encontrados mais comumente são: proteção de sobretensão e subtensão, proteção de inversão de fase e proteção de falta de fase.

2.5.4. Chave seccionadora

Chaves seccionadoras tripolares são chaves para interrompimento do circuito, que podem ser encontradas chaves que atuam com carga e chaves que atuam sem carga, sendo esta última a mais comum de encontrar em subestações. São dispositivos normalmente utilizados para manobra ou desligamento de parte do circuito, com seu acionamento sendo feito via dispositivo fora da área de risco da subestação, através de uma manivela.

As chaves são constituídas de um dispositivo de travamento, tanto na posição fechada quanto na posição aberta, com um manivela para acionamento e bases para fusíveis. Na Figura 3 observa-se uma chave tripolar, externa com base fusível, nota-se também o dispositivo externo ao guarda corpo para acionamento fora da zona de risco da subestação.

Quanto às recomendações de segurança, as subestações devem atender em sua integridade a NR-10 e a ABNT NBR 14.039:2005. As medidas de proteção para garantir a segurança podem ser aplicadas a uma instalação completa, a uma parte da instalação ou a um componente.

A proteção contra choques elétricos visa impedir que uma pessoa ou animal estabeleça contato com alguma parte da instalação elétrica que tenha potencial de perigo à integridade física. Este potencial de perigo pode ser tanto de uma parte de instalação em que deva estar energizada quanto de uma parte que em foi acidentalmente energizada. A instalação elétrica deve ser segura tanto em situação normal quanto em situação de falha.

Figura 3 – Chave seccionadora tripolar externa

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

2.5.5. Sinalização e segurança da subestação

Há dois tipos de proteção contra choques elétricos: a proteção contra choque por contato direto e contra choque por contato indireto. Basicamente, contato direto é o choque quando entra em contato com uma parte da subestação em que deveria realmente estar energizada, já o contato indireto normalmente acontece devido a um defeito da isolação básica de um componente da subestação. A base técnica para proteção contra choque nas normas brasileiras é o relatório técnico IEC/TR 60479-1, que determina os efeitos do choque no corpo humano. A proteção contra choques elétricos independe do valor da tensão nominal da instalação e tem como base somente a suportabilidade do corpo humano ao choque elétrico.

Segundo a ABNT NBR 14.039:2005 a proteção contra contatos diretos deve ser assegurada por meio:

i. proteção por isolação das partes vivas;
ii. proteção por meio de barreiras ou invólucros;
iii. proteção por meio de obstáculos;
iv. proteção parcial por colocação fora de alcance.

A proteção por isolação das partes vivas (i) ou a proteção por meio de barreiras ou invólucros (ii) é a isolação destinada a impedir todo o contato, intencional ou acidental, que só pode ser violado se destruído. Um exemplo de isolação das partes vivas são os terminais desconectáveis tipo cotovelo, conforme Figura 3. Já a proteção por meio de barreiras ou invólucros são exemplificados por transformadores tipo pedestal (ou blindado), conforme Figura 4. Neste caso, quando toda subestação é composta por componentes do tipo “i” e “ii”, ela pode ser instalada em locais acessíveis a pessoas comuns. Normalmente, esse tipo de instalação tem o custo mais elevado que os demais.

Figura 4 - Terminal desconectável tipo cotovelo de média tensão

Fonte: MD Policabos 021).

As proteções por obstáculos (iii) e proteção por alocação fora de alcance (iv) são destinados a impedir os contatos fortuitos com as partes vivas e se complementam. Neste caso, comumente são instaladas grades de proteção que devem ser desmontáveis sem a necessidade de uso de ferramentas como obstáculos e para alocação fora de alcance deve ser avaliado as distâncias mínimas para cada caso, de acordo com a norma. Nestes casos as instalações somente poderão ser acessíveis por pessoas advertidas e qualificadas,

considerando a NR-10.

Figura 5 – Transformador do tipo pedestal

Fonte: Habitissimo (2020)

As proteções contra contatos indiretos em subestações partem do princípio básico de que haja um circuito de proteção adequado às subestações, juntamente com um sistema de aterramento e equipotencialização. Em caso de ocorrência de uma falta, o sistema de proteção deve atuar para limitar o tempo de duração, garantindo a integridade do sistema de aterramento e de equipotencialização. Considera-se uma ligação equipotencial para uma instalação interna a instalação em que a tensão de contato não seja superior à tensão de contato limite, sendo o limite para alternada em (15 a 1000 Hz) em 50 V e para contínua em 120 V.

Deve-se considerar também as recomendações de segurança para combate a incêndio e as sinalizações mínimas solicitadas na NR-10 e na NR-26.

3. ESTUDO DE CASO

A Brasigran Brasileira de Granitos faz parte do pólo industrial de CIVIT II na Serra, Espírito Santo. Trata-se de uma indústria do ramo de beneficiamento de rochas ornamentais, cujo a produção no Brasil está concentrada no estado do Espírito Santo (82%), com a Brasigran sendo uma das maiores empresas do ramo, ficando em 8º no ranking de exportação no período de janeiro a dezembro de 2018.

Na Figura 6 temos a vista superior de toda a planta industrial, com destaque em verde para o local onde está instalada a atual Subestação de Entrada.

Figura 6 – Vista superior da planta industrial

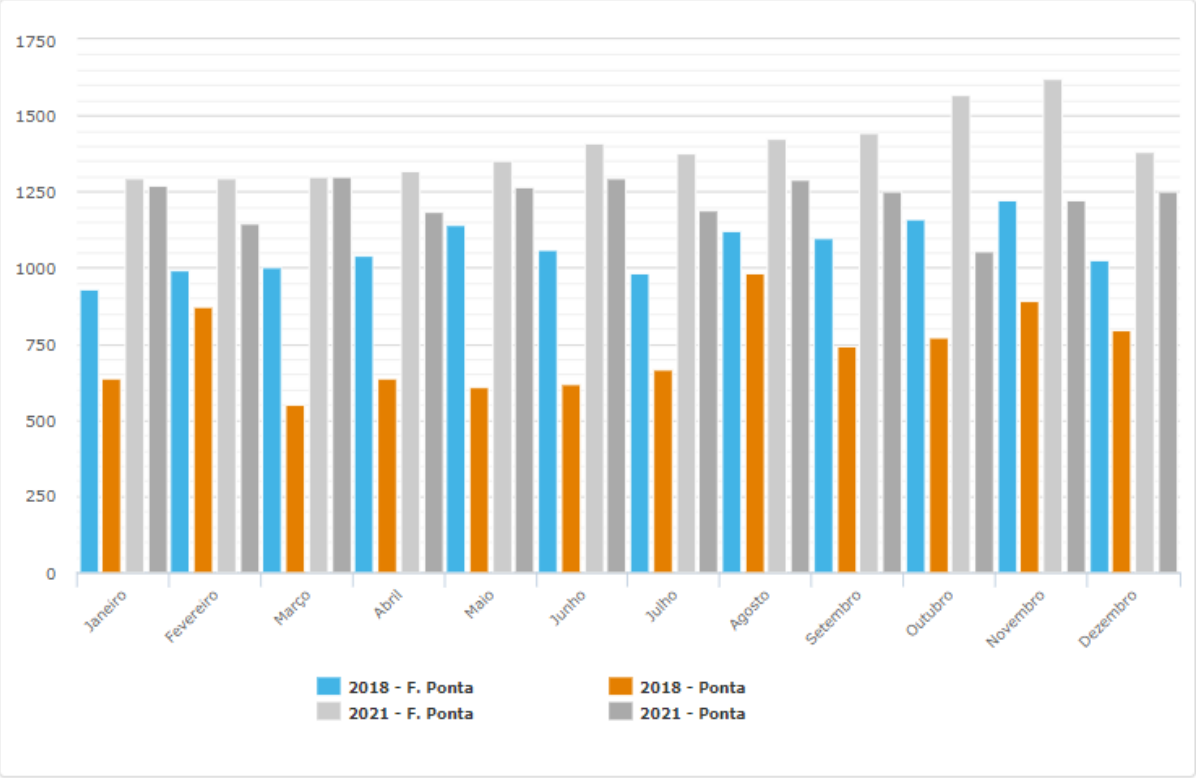
Fonte: Arquivos Brasigran (2018).

Atualmente há uma potência instalada de 3,65 MVA, com demanda contratada de 2,0 MW e um consumo de 7459,67 MWh no ano de 2021. Nos últimos 4 anos a sua demanda contratada subiu de 1,3 MW para 2 MW, seguindo com previsão de aumento em pelo menos

0,5 MW no próximo triênio e com isso surgindo o “alerta” de aumento no nível de tensão de fornecimento, atualmente em 11,4 kV, por estar atingindo a demanda de 2,5 MW.

No Gráfico 1 observa-se o comparativo da demanda do ano de 2018 com o ano de 2021, demonstrando o crescimento de carga em um curto espaço de tempo.

Gráfico 1 – Gráfico comparativo de demanda utilizada entre 2018 e 2021



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

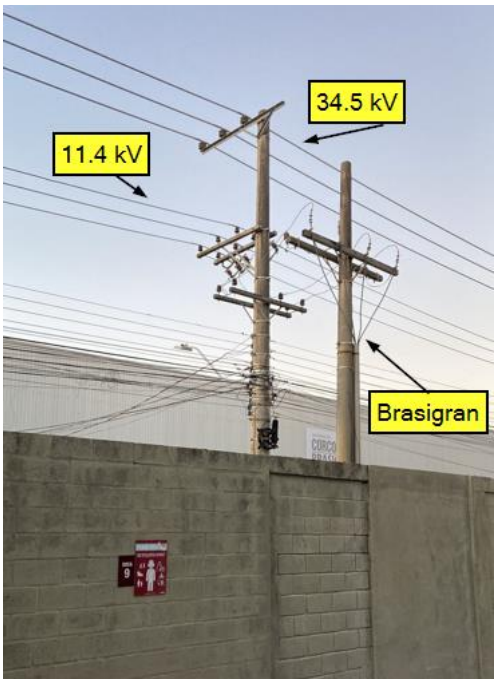
Em atividade desde 1989, a subestação de entrada atual está enquadrada para fornecimento de tensão em 11,4 kV, referenciadas a normas anteriores a ABNT NBR 14.039:2005. Considerando um aumento de demanda e consequentemente a requisição de fornecimento de energia em nível de tensão superior ao atual, torna-se necessário a construção de uma nova Subestação de Entrada. Portanto, este projeto tem como estudo de caso a análise técnica de uma subestação de entrada, controle, medição e manobra, adequando-a a ABNT NBR 14.039:2005, para o nível de tensão de fornecimento de 34,5 kV, com potência máxima de 4 MW, prevendo um aumento de demanda em 1 MW da atual. Para fins de projeto, a subestação será denominada ao longo do trabalho de Subestação de Entrada.

3.1. Rede de Distribuição – EDP Espírito Santo

Conforme descrito no padrão técnico de Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição - EDP-ES, em seu Item 6, Subitem 6.1, a concessionária de energia elétrica fornecerá a energia elétrica no sistema estrela com neutro aterrado, nas tensões primária de distribuição de 11,4, 13,2, 13,8 e 34,5 kV, em corrente alternada e frequência de 60 Hz.

A tensão de fornecimento de 34,5 kV está restrita a algumas regiões, no caso regiões onde há o alimentador passando pelo local. Como a Brasigran está localizada no centro industrial da Serra, há disponibilidade de ser atendida pelo alimentador de 34,5 kV, sendo vantajoso para a EDP-ES que uma unidade consumidora com demanda próxima de 2 MVA seja atendida nesta tensão, visto que o circuito de 11,4 kV tem potência máxima em torno 5 MVA. Na Figura 6, observa-se o alimentar da Brasigran e logo acima o circuito de com alimentador em 34,5 kV. Na Figura 7 pode-se observar que o mesmo poste que sustenta o alimentador de 34,5 kV, sustenta a linha de 11,4 kV, sendo este poste o ponto de derivação para a área da Brasigran.

Figura 7 – Alimentador de 11.4 e 34.5 kV em via pública, em frente a unidade consumidora



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2. Subestação de Entrada – Cenário Atual

Nesta seção serão detalhados os componentes atuais da Subestação de Entrada e na última subseção serão evidenciados os principais pontos que se encontram atualmente fora da ABNT NBR 14.039:2005. Por motivos de segurança não é possível fazer as medições de distâncias e ensaios de componentes, uma vez que a subestação se encontra ativa.

3.2.1. Condutores

A subestação atual foi modificada ao longo do tempo para suportar um fluxo de potência maior, substituindo alguns elementos sem caracterizar uma reforma. Os condutores passaram por este processo de mudança e atualmente são instalados, da chave seccionadora de média tensão da EDP-ES até a entrada da Subestação de Entrada, cabos de 50 mm², classe 15 kV, isolação de borracha etileno-propileno (EPR), instalados pelo método de instalação tipo "F" – método de cabos unipolares justapostos instalados em dutos não condutores a 0,9 metros do solo. Da entrada da subestação para a distribuição ao longo da instalação são utilizados condutores de vergalhão de cobre, devidamente espaçados, com diâmetro de 3/8" equivalente a um cabo de cobre de 35 mm² com tipo de instalação do método "B" – cabo unipolar espaçado ao ar livre. Em todos os casos considerando temperatura ambiente 30º C para linhas não subterrâneas e de 20ºC para linhas subterrâneas.

No Padrão Técnico da EDP-ES pode-se verificar a tabela de seção mínima para dimensionamento de barramento de subestações abrigadas de acordo com a potência da instalação, assim como a seção mínima do cabo de entrada. Portanto, para o Padrão Técnico da EDP-ES, a demanda máxima de potência em que a subestação atualmente suporta é de 2 MW.

Tabela 3 – Seção mínima do vergalhão de acordo com a potência da instalação

Potência (kVA)	Fio (mm²)	Tubo oco ou barra retangular (seção em mm²)	Vergalhão Diâmetro nominal
Até 800	25	20	1/4"
800 a 1500	25	30	5/16"
1501 a 2000	-	50	3/8"
2001 a 2500	-	65	3/8"

Fonte: Padrão Técnico PT.DT.PDN.03.14.001.

3.2.2. Transformadores de correntes, de potencial e medidores

Os medidores atuais foram instalados por pessoal autorizado pela EDP-ES. São dimensionados, fornecidos e lacrados pela própria EDP-ES. Na Figura 5, temos uma foto do sistema de medição lacrado. Nesta caixa recebe o secundário dos transformadores de corrente e do transformador de potencial para medição indireta de energia elétrica, também há o bloco de aferição, unidade remota de comunicação e medidores. A direita na Figura 8, nota-se outro compartimento lacrado, onde constam os transformadores de potencial e de corrente. Toda e qualquer alteração necessária nestes compartimentos lacrados são de responsabilidade da concessionária e deve ser executada pela concessionária.

Figura 8 – Foto do compartimento blindado da subestação de entrada

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.3. Disjuntor de média tensão e relés

O sistema de proteção de média tensão é composto por um disjuntor tripolar de média tensão, 17,5 kV, a óleo, para uso interno e fabricado de acordo com a norma ABNT NBR IEC 62271-100, cancelada em 2012. O disjuntor é comandado por molas pré-carregadas, cujo acionamento é manual. Tem como acessório três relés de sobrecorrente primários, tipo BG

de 75 a 120A, com ajuste analógico e manual, ajustados conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Parametrização do relé primário

Resumo dos ajustes da Proteção de Sobrecorrente de Fase e Neutro Entrada Geral de Energia de 11,4kV, Subestação BRASIGRAN BRASILEIRA DE GRANITOS LTDA. Relé Primário Beghim, acoplado ao Disjuntor PVO	
Ajuste de Fase (51F e 50F)	
Corrente de partida de fase temporizada	114 A (1,5xIn)
Curva de Fase	Curva Padrão do Relé Primário - 6 seg.
Corrente de partida de Fase Instantânea	750 A (10xIn)
Tempo de Operação	0,1 seg

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.4. Chaves seccionadoras

Para o seccionamento manual da instalação há três chaves seccionadoras tripolar de média tensão (operação sem carga), sendo uma central e duas para cada circuito desmembrado após o disjuntor de média tensão, conforme parte do diagrama unifilar atual, ilustrado na Figura 1, Seção 1.1. Na Figura 9, abaixo, observa-se o estado atual da chave seccionadora instalada entre a medição e o alimentador da EDP-ES.

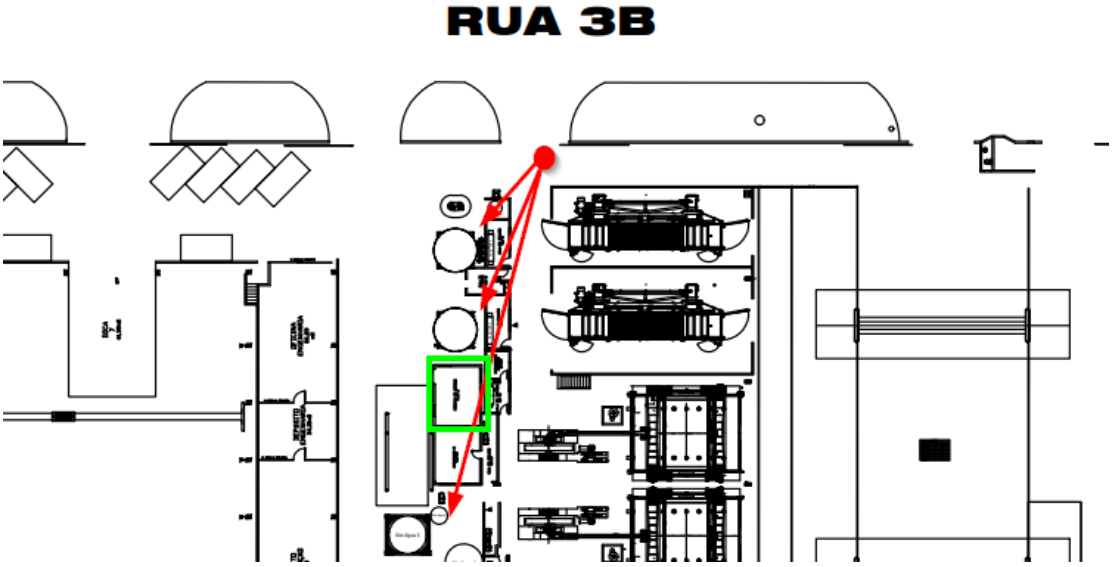
3.2.5. Sinalização, segurança e localização

A Subestação é de acesso restringido com cadeado, e a chave fica em posse apenas de pessoal autorizado. Fica localizada no centro “horizontal” da planta industrial, a 30 metros da rua pública. Próximo a subestação há uma estação de tratamento de efluentes industriais, com grande volume de água e passagem diária de caminhão, portanto a sinalização é de extrema importância. Na Figura 10 observa-se a localização da Subestação, visto a partir de parte do *layout* da planta industrial.

Figura 9 – Foto de uma das chaves seccionadoras na SE de Entrada

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 10 – Layout da localização da SE de Entrada. Em vermelho, a estação de tratamento de água. Em verde, a SE.



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.6. Subestação de Entrada – Desenvolvimento de Projeto Conceitual de SE de 34,5 kV

Como não há definição do local exato da instalação, tampouco informações detalhadas de demanda, prazos para instalação e verba disponível para tal investimento, é apresentado neste tópico um projeto conceitual, do qual trata-se de um projeto onde há interesse em conhecer superficialmente os elementos, sem entrar em detalhes dos fabricantes ou dimensionais. É um projeto que antevê o Projeto Básico e o Projeto Executivo, sendo estes mais fidedignos possível a construção. Será apresentado um projeto de subestação de entrada com as seguintes características:

i. Número de transformadores: 01 transformador a óleo.
ii. Potência Nominal: 2.800 kVA, conforme calculado no item 5.3.3.1.
iii. Tensões nominais: 34,5/11,4 kV.
iv. Tipo de Subestação: abrigada.

3.2.7. Projeto Elétrico

Neste tópico é apresentado o projeto elétrico da subestação através do diagrama unifilar, apresentado no Anexo A, onde constam todos os equipamentos de força, tanto de média tensão, quanto de baixa tensão, contendo os equipamentos de manobra, dispositivos de proteção e equipamentos auxiliares.

As especificações dos equipamentos mencionados no diagrama unifilar do Anexo A estão detalhadas a partir do tópico 3.2.8.

3.2.8. Especificações técnicas

Neste tópico são especificados os principais componentes da subestação e as exigências normativas relativas à ABNT NBR 14.039:2005. Por se tratar de um projeto conceitual, algumas questões relativas ao espaço físico não foram aprofundadas, pois não está definido o local de instalação da subestação e consequentemente o projeto eletromecânico.

3.2.8.1. Especificação do transformador de potência

O principal elemento desta subestação é o transformador de potência, tanto pelo seu custo quanto pela importância de sua definição para dimensionamento dos demais componentes. Para o atendimento adequado a carga não somente no ano de sua instalação, mas projetando um crescimento da carga nos próximos 5 anos é necessário saber a taxa de crescimento da demanda ao longo deste período. Usando os dados de demanda utilizada no período de 2017 a 2022, conforme está exposto no Gráfico 2, e a expectativa de investimento em equipamentos da Brasigran nos próximos 05 anos – em torno de 500 kW, pode-se estimar a demanda máxima no início do período em 1,7 MW e a partir de 2027 em torno de 2,2 MW.

Portanto, com carga atual em torno de 1,7 MW e a previsão de aumento para 2,2 MW até 2027, pode-se dimensionar o transformador para atender a carga de 2,2 MW com um fator de carregamento de 85%.

Em relação a ABNT NBR 14.039:2005, alguns pontos são observados, como em seu tópico 6.5.1, no qual exige que haja dispositivos de supervisão, regulagem e comando, além de serem protegidos contra defeitos internos, de sobrecarga e curto-circuito. É necessário que o fabricante forneça ensaios a respeito do transformador:

a) Ensaio de rigidez dielétrica do óleo isolante.
b) Ensaio de fator de potência.
c) Ensaio de cromatografia de gases e análises físico-químicas de óleos isolantes.

Por conseguinte, a especificação técnica do transformador está disposta na Tabela 5.

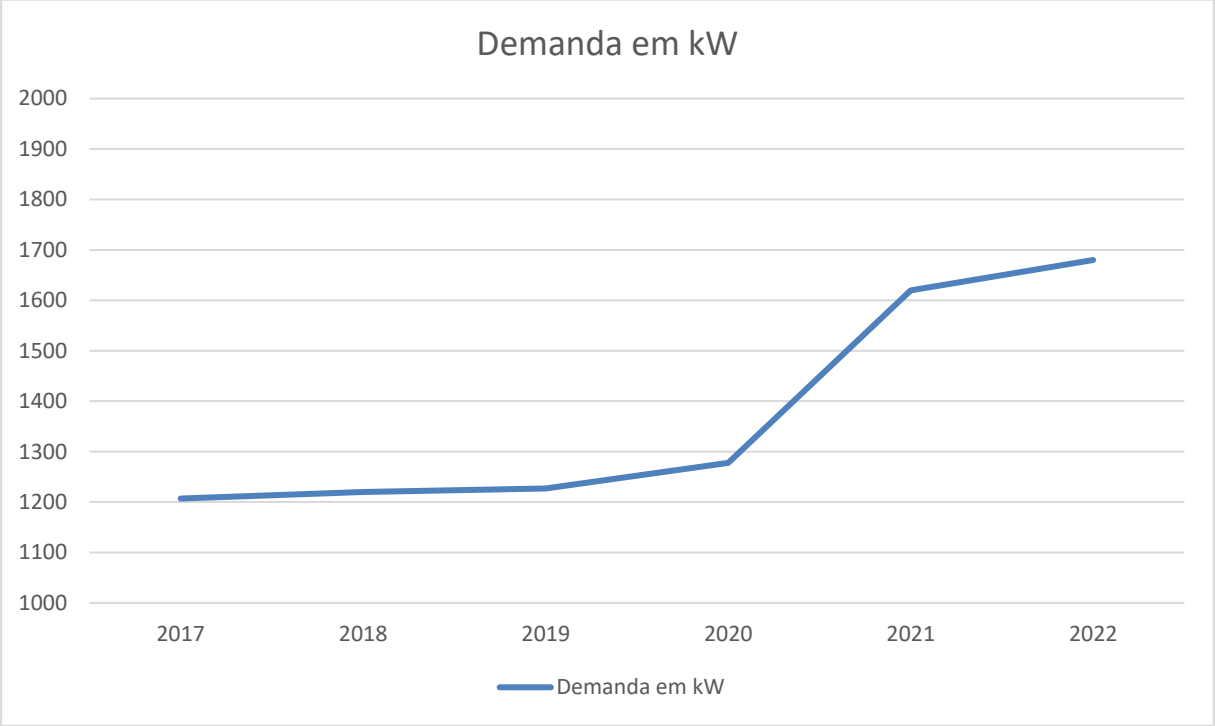
3.2.8.2. Especificação dos transformadores de corrente

Por definição, um transformador de corrente é um dispositivo que em condições normais de operação, possui no seu enrolamento secundário uma corrente proporcional a do primário, com defasamento aproximadamente nulo. Entretanto, diferentes aplicações requerem determinado transformador de corrente com características distintas para tempo de resposta, precisão, regime transitório e comportamento sob falta.

Os TCs de proteção não precisam ser tão precisos quanto os de medição, entretanto devem ser capazes de suportar e não saturar durante uma falta. Para este projeto é especificado o

TC de acordo com a norma técnica ABNT NBR 6856:2015 Transformador de corrente – especificação e ensaios.

Gráfico 2 – Demanda em kW x ano corrente



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Tabela 5 – Especificação do transformador de potência

Especificação técnica do Transformador de Potência a ser instalado na nova subestação de entrada	
Características elétricas do transformador de potência	
Potência	2,8 MVA
Tensão nominal primária	34,5 kV
Tensão nominal secundária	11,4 kV (com taps)
Classe de tensão	35 kV
Frequência	60 Hz
Terminal de conexão primário	Terminal desconectável tipo cotovelo
Terminal de conexão secundário	Terminal desconectável tipo cotovelo
Modelo do transformador	Tipo pedestal
Refrigeração	Óleo isolante vegetal
Comutador de derivações sem carga	No enrolamento primário.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para definição da corrente nominal primária, considera-se a corrente máxima do transformador. Na equação abaixo pode ser calculada a corrente nominal do transformador:

$$I_{nom} = \frac{S}{V_{nom} x \sqrt{3}} \quad (2)$$

onde:

I_{nom} → Corrente nominal.

V_{nom} → Tensão nominal..

S → Potência aparente.

Sendo S e V, respectivamente, a potência aparente e tensão nominal do transformador, obtidas na Tabela 5, com uma corrente nominal do transformador igual a 47 A. Pode-se também calcular a corrente *inrush*, que é a corrente de magnetização que circula apenas no enrolamento primário, durando aproximadamente 100ms, cujo a intensidade varia de acordo com Tabela 6 é importante para a definição do RTC (Relação de Transformação) do transformador.

Tabela 6 – Valores de corrente Inrush para conexão triângulo no primário

Tipo	Potência (MVA)	Inrush (A)
Transformador a óleo	< 1 MVA	10xIn
	> 1 MVA	8xIn
Transformador a seco	Qualquer	14xIn

Fonte: Mardegan, 2012.

A corrente de curto-circuito na entrada da subestação deve ser informada pela concessionária quando solicitado. Para fins de projeto conceitual é necessário estimar a corrente, visto que não é possível fazer uma solicitação prévia na Edp. Para este projeto está sendo considerado uma corrente de curto circuito de 8 kA.

A respeito da classe de exatidão, os TC de proteção podem admitir um erro máximo de 5 a 10%. A nomenclatura da classe de exatidão é formada pelo valor do erro máximo, junto com a referência a respeito da impedância, sendo B para baixo e A para alto e por fim é informado a tensão máxima que o TC entrega no secundário na condição de 20xIn.

Portanto, com os dados da instalação, informados na Tabela 7, podemos especificar o transformador de corrente a ser utilizado no sistema de proteção do cubículo de medição, cujas especificações são mostradas na Tabela 8.

Tabela 7 – Dados da instalação importantes para o dimensionamento do transformador de corrente (TC)

Dados da Instalação	
Corrente Nominal	47 A
Corrente *Inrush*	376 A
Corrente de Curto-Circuito	8 000 A
Classe de tensão	35 kV

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Tabela 8 – Esapecificação do transformador de corrente (TC)

Especificação do transformador de corrente:	
Corrente nominal primária:	400 A
Relação de Transformação (RTC):	400 / 5 A
Classe de tensão:	35 kV
Frequência:	60 Hz
Classe de exatidão:	10B100
Corrente suportável de curta duração:	8 000 A
Aplicação:	*Indoor* (interno).

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.8.3. Especificação dos transformadores de potencial

Os TPs (transformadores de potencial) são instrumentos utilizados para medição e proteção sem que haja necessidade do equipamento de proteção possuir uma tensão de isolamento tal qual a rede que está conectada. Além de facilitar a medição da grandeza, os transformadores de potencial são usados com a finalidade de:

- Isolar eletricamente o circuito de proteção do circuito de potência.
- Segurança pessoal.
- Reproduzir numa relação de transmissão a tensão no circuito primário.

Assim como nos transformadores de corrente, os TPs também possuem uma norma técnica ABNT NBR 6855:2021, e neste tópico utiliza-se esta norma como referência. Para especificação deve-se ter conhecimento de duas características: classe de exatidão e grupo de ligação. A classe de exatidão é normatizada e é expressa com um valor percentual (0,3, 0,6 e 1,2%), seguida da letra P e do valor da potência da maior carga nominal no qual foi ensaiada essa classe de exatidão. O grupo de ligação é definido em três tipos e deve ser

escolhido de acordo com o mais adequado para instalação: grupo 1, 2 e 3.

- Grupo 1: Tps projetados para ligação entre fases;
- Grupo 2: Tps projetados para ligações entre fase e terra em sistemas eficazmente aterrados;
- Grupo 3: Tps projetados para ligações entre fase e terra em sistemas nos quais não se garante a eficácia do aterramento.

Tabela 9 – Especificação do transformador de potencial (TP)

Especificação do transformador de potencial:	
Tensão primária:	34.5/√3 kV
Tensão secundária:	115 – 115/√3
Classe de exatidão:	0,3P400
Grupo:	Grupo 3.
Frequência:	60 Hz
Aplicação:	*Indoor* (interno).

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.8.4. Especificação do para-raios

Os pára-raios são definidos de acordo com o padrão técnico da EDP, que por sua vez baseia-se na ABNT NBR 14.039:2005 para dimensionamento de seus componentes padronizados. Na Tabela 10 são mostrados os dados do pára-raios definido.

Tabela 10 – Especificação do pára-raios

Especificação do para-raios:	
Classe de tensão (kV):	36,2
Tensão nominal (kVef)	30
Corrente de Descarga Nominal (kA)	10
Máxima Tensão de Operação Contínua (kVef)	24,2
Tensão suportável de impulso atmosférico no invólucro (kV)	150

Fonte: Padrão técnico PT.DT.PDN.03.14.001, EDP.

Com este pára-raios, atende-se o tópico 5.4 da norma que trata a respeito da necessidade de proteção contra sobretensões.

3.2.8.5. Especificação do disjuntor de média tensão

O disjuntor de média tensão é o principal dispositivo de segurança da subestação. A ABNT NBR 14039:2005 especifica características essenciais para dispositivos que garantem a proteção contra correntes de sobrecarga e corrente de curto-circuito. Conforme o item 5.3.4.1 da norma, pode-se instalar um dispositivo que garanta simultaneamente a proteção contra sobrecarga e contra curto-circuito, desde que respeitadas as condições de instalação.

O disjuntor de média tensão para atendimento a norma, no mínimo, deve possuir as características abaixo:

I. Dispositivo de acionamento deve ser por meio de relés secundários.
II. Função 50 e 51 da tabela ANSI (Anexo B), microprocessado.
III. Garantia de mínimo 2 horas de autonomia em caso de falta de energia.
IV. Transformadores de corrente para acionamento dos relés secundários devem estar sempre a montante do disjuntor, para garantir falha do próprio dispositivo.
V. Deve ser instalado um dispositivo exclusivo que garanta energia necessária ao acionamento da bobina de abertura do disjuntor.

No tópico 5.6 é recomendado a utilização de proteção contra inversão de fase quando for necessário. Nesta instalação a inversão de fase causaria danos irreparáveis em algumas bombas do tratamento de água, por exemplo, portanto a especificação do disjuntor conta a proteção 47 da tabela ANSI - Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão.

Tabela 11 – Especificação do disjuntor de médio tensão

Especificação do disjuntor de média tensão:	
Classe de tensão:	36 kV
Corrente nominal:	630 A
Corrente simétrica de interrupção:	12,5 kA
Corrente de curta duração (1 segundo):	12,5 kA
Relés associados:	50, 51, 50N, 51N, 47.
Isolação:	a vácuo ou SF6.
Frequência:	60 Hz
Aplicação:	*Indoor* (interno).

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.8.6. Especificação das chaves seccionadoras

As chaves seccionadoras são utilizadas para seccionar o circuito, conforme explicado no tópico 4.5.4. A norma estabelece que as chaves devem ser instaladas em todos os pontos em que haja necessidade de seccionamento e que possibilite o serviço de manutenção dos componentes da subestação. Devem possuir dispositivo capaz de travar a sua posição, tanto fechada quanto aberta e quando instalada anterior ao disjuntor, deve possuir intertravamento elétrico com ele.

Neste projeto, conforme diagrama unifilar, está previsto a instalação de duas chaves seccionadoras, sendo estas anteriores ao disjuntor. A chave-seccionadora será uma chave seccionadora com travamento na posição aberta e fechada, com intertravamento elétrico com o disjuntor. Serão instaladas em posições estratégicas para seccionamento de toda a carga e a medição e para seccionamento de toda a carga, mantendo energizado a medição.

Tabela 12 – Especificação da chave seccionadora

Especificação da chave seccionadora:	
Classe de tensão (kV):	35
Corrente nominal (A)	400
Tipo:	Tripolar, uso interno.
Tensão de comando (V):	220
Abertura:	com carga.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.2.8.7. Especificação técnica do cabo de cobre de média tensão

Os cabos elétricos são dimensionados de acordo com a tabela 29, da ABNT NBR 14039:2005. Todavia, a EDP estabelece um valor mínimo para especificação da bitola do cabo elétrico para subestação abastecida em tensão primária. A corrente nominal calculada no tópico 5.3.2.2 foi de 47 A.

Para definição do cabo de acordo com a norma, precisa-se definir o método de referência, que trata-se do método de instalação do cabo, o qual depende da instalação física da subestação. O método de instalação proposto será o B – cabos unipolares espaçados ao ar livre. Outro fator importante é o tipo de isolação do cabo e o material condutor: neste caso, será condutor de cobre com isolação de EPR. O último fator a ser verificado é a temperatura

ambiente do local, definida em 25 ºC. De acordo com a tabela 29 da ABNT NBR 14039:2005, nestas condições de instalação, para um corrente de 47 A, um cabo de 16 mm² seria suficiente.

Entretanto, deve-se observar o padrão técnico da concessionária também, no qual define que para classe de tensão 36,2 kV, com transformador de potência maior que 2.200 kVA, deve-se ser instalado um condutor de cobre, com 35 mm² de área de seção circular.

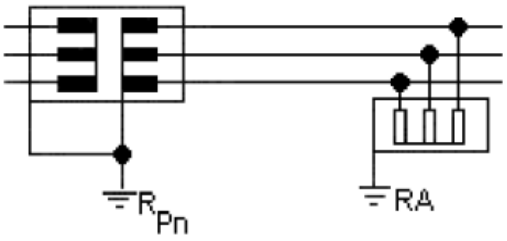
3.2.8.8. Esquema de Aterramento

A norma prevê algumas opções de esquemas de aterramento que podem ser aplicados. Para classificação dos esquemas de aterramento é utilizado a simbologia abaixo:

I. Primeira letra – situação da alimentação em relação à terra:
   a) T – um ponto de alimentação (neutro) diretamente aterrado;
   b) I – isolação de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento de um ponto através de uma impedância;
II. Segunda letra – situação das massas da instalação elétrica em relação à terra:
   a) T – massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de ponto de alimentação;
   b) N – massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o neutro);
III. Terceira letra – situação de ligações eventuais com as massas da subestação:
   a) R – as massas da subestação estão ligadas simultaneamente ao aterramento do neutro da instalação e às massas da instalação;
   b) N – as massas da subestação estão ligadas diretamente ao aterramento do neutro da instalação, mas não estão ligadas às massas da instalação;
   c) S – as massas da subestação estão ligadas a um aterramento eletricamente separado daquele do neutro e daquele das massas da instalação.

Atualmente a EDP-ES fornece energia em 11.4 kV, no sistema estrela com neutro aterrado. A instalação atual foi aterrada seguindo o esquema de aterramento TTN e para manter o padrão, o projeto da nova subestação também é considerado o aterramento TTN, conforme Figura 11.

Figura 11 - Sistema de aterramento TTN



Fonte: ABNT NBR 14.039.

3.2.8.9. Especificações físicas dependentes do projeto eletromecânico

Ao longo da norma, se faz exigências de algumas características que não foram detalhadas no projeto elétrico, mas que são fundamentais para o enquadramento da subestação dentro da norma. De modo geral, as instalações e equipamentos devem ser capazes de suportar as influências ambientais, elétricas, mecânicas e climáticas previstas no local de instalação.

3.2.8.10. Classificação das influências externas

Neste tópico classifica-se a subestação de acordo com as características do local onde será instalada. Na Tabela 13 abaixo, de acordo com os códigos definidos na própria norma, fica determinado as características da subestação em relação ao meio ambiente, utilização e construção da edificação:

3.2.8.11. Proteção para garantir a segurança

As medidas de proteção para garantir a segurança de uma subestação podem ser aplicadas em uma instalação completa, em uma parte desta subestação ou a componente desta instalação, sendo todas elas de equivalente importância para a segurança.

As proteções contra sobrecorrentes, sobretensões, inversão de fase e demais proteções que dependam de componentes elétricos já foram especificadas. Proteção contra choque elétrico, contra os efeitos térmicos e proteção contra fuga de líquido isolante são caracterizados neste tópico.

Tabela 13 – Classificação das influências externas

Classificação das influências externas: Meio Ambiente		
Temperatura ambiente:	AA4	Temperado - entre -5 e 40 ºC.
Altitude:	AC1	Baixa - <= 1.000 metros.
Presença de água:	AD2	Possibilidade de quedas verticais de água.
Presença de corpos sólidos:	AE4	Presença de poeira em quantidade apreciável.
Presença de substâncias corrosivas:	AF2	Presença significativa de agentes corrosivos ou poluentes de origem atmosférica.
Solicitações mecânicas:	AG2	Condições industriais habituais.
Presença de flora e mofo:	AK1	Desprezível.
Presença de fauna:	AL1	Desprezível.
Influências eletromagnéticas:	AM1	Desprezível.
Radiações solares:	AN1	Desprezível.
Raios:	AQ2	Riscos provenientes da rede de alimentação.
Utilização		
Competência das pessoas:	BA5	Qualificadas.
Resistência elétrica do corpo:	BB2	Normal - subestação de instalação interna.
Natureza das matérias processadas:	BE1	Riscos desprezíveis.
Construção da Edificação		
Material de Construção:	CA1	Riscos desprezíveis.
Estrutura das Edificações:	CB1	Riscos desprezíveis.

Fonte: ABNT NBR 14.039.

3.2.8.11.1. Proteção contra choques elétricos – proteção total

Proteção contra choques elétricos devem ser previstas para contatos diretos e contatos indiretos. A proteção contra choque elétrico por contato direto visa impedir o contato com uma parte condutora, não havendo defeito. As medidas de proteção contra contato direto são divididas em dois grupos: as medidas suficientes – ou medidas de proteção completas – das quais garantem por si só a proteção, sem necessidade de conhecimento prévio; as medidas não suficientes – ou medidas de proteção parciais – nas garantias, necessitando que haja informação e conhecimento das pessoas a serem protegidas.

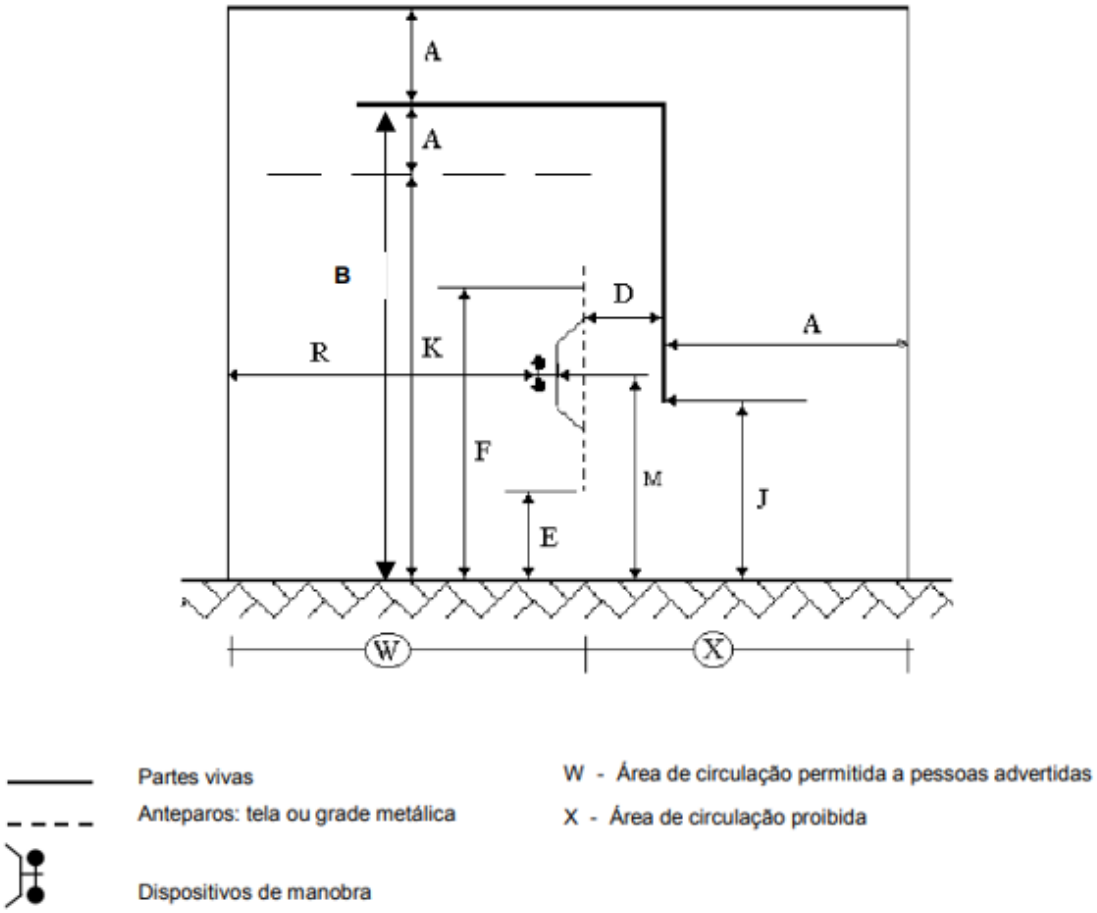
A proteção por isolação das partes vivas dos componentes deve ser garantida através de ensaios elétricos destinados a verificar a qualidade da isolação de equipamentos e somente pode ser removida com a destruição do equipamento ou componente.

As proteções por meio de barreiras ou invólucros são destinadas para impedir todo contato com as partes vivas da instalação elétrica. A Figura 5 é um exemplo de proteção por invólucro, demonstrando um transformador do tipo pedestal, onde o equipamento é dotado de proteção completa contra choques por contato direto.

3.2.8.11.2. Proteção contra choques elétricos – proteção parcial

Para proteção parcial contra choques elétricos, por contato indireto, são definidos por dois meios: proteção por meio de obstáculos e proteção parcial por colocação fora de alcance. Os obstáculos são instalados para impedir contatos acidentais com as partes vivas da subestação, mas não os contatos voluntários por uma tentativa deliberada. Um exemplo para estas proteções pode ser observado na Figura 2.

Figura 12 – Espaçamento para instalações internas



Fonte: ABNT NBR 14.039:2005.

As proteções por colocação fora de alcance são definidas de acordo com a Tabela 14 e a Figura 12, considerando circulação somente de um lado da subestação. Também na Tabela 14, espaço A, ficam definidas as distâncias mínimas para espaçamentos entre fase/terra e fase/fase para a tensão nominal de 34,5 kV.

Na Figura 12, devemos considerar as dimensões da Tabela 14 como dimensões mínimas e máximas para construção da subestação.

Tabela 14 – Espaçamentos para subestação interna, conforme Figura 10

Espaçamentos para a subestação interna (34,5kV), de acordo com Figura 10. Dimensões mínimas, em mm		
D	400	Distância entre a parte viva e um anteparo vertical
A	270	Distância mínima entre fase/fase e fase/terra
R	1200	Locais de manobra
B	2700	Altura mínima de uma parte viva com circulação
K	2000	Altura mínima de um anteparo horizontal
F	1700	Altura mínima de um anteparo vertical
J	E+300	Altura mínima de uma parte viva sem circulação
Dimensões máximas, em mm		
E	300	Distância máxima entre a parte inferior de um anteparo vertical e o piso
M	1200	Altura dos punhos de acionamento manual
malha	20	Abertura da malha

Fonte: ABNT NBR 14.039.

4. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi montar uma diretriz, um projeto conceitual, evidenciando os principais pontos da norma técnica da ABNT 14.039:2005. Nota-se que há um grande número de exigências e normativas que dependem da instalação física da subestação e nestas partes são evidenciados os limites máximos e mínimos permitidos. A exigência desse padrão de instalação se justifica para que haja segurança na instalação elétrica, cobrindo toda a instalação a jusante e a montante.

A quantidade de informações e referências externas incluídas dentro da própria norma mostram como o tamanho do conteúdo é extenso e diversificado, trazendo terminologias, definições, procedimentos e princípios. As classes de tensões que encontramos na literatura são diferentes da definida neste projeto, apesar de ser um padrão desta concessionária. A união das normas junto ao exemplo de uma subestação de 34,5 kV, contido neste material e desenvolvido ao longo deste trabalho é de grande valia e serve de referência para o planejamento de outros projetos de subestação de 34,5 kV.

A subestação foi dimensionada seguindo os critérios pré-estabelecidos na norma e com a projeção de carga da Brasigran no curto prazo, considerando a alteração do nível de tensão a ser entregue pela concessionária para o nível mais próximo do ideal, de acordo com os níveis de tensão padronizados. O projeto elétrico, unifilar, descrito ao longo do trabalho e evidenciado no Anexo A, serve como base para o projeto eletromecânico a ser desenvolvido quando houver definição de local para subestação, ficando este projeto como sugestão de trabalho futuro.

Por fim, vale ressaltar a dificuldade de obter informações sobre os circuitos de distribuição da concessionária e dados específicos de equipamentos de média tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

FILHO, João Mamede. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FILHO, João Mamede**. Subestações de Alta Tensão**. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

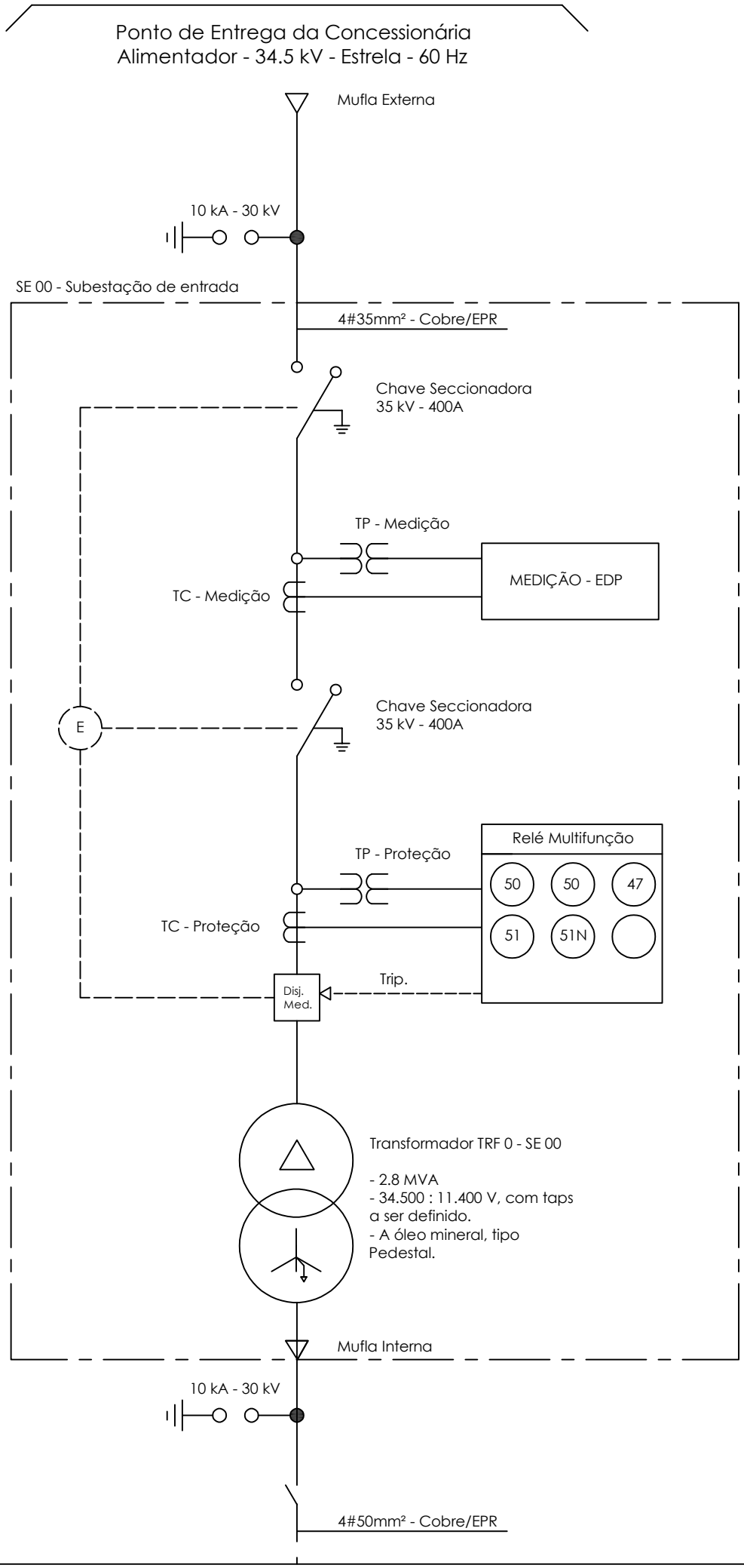
MARDEGAN, Cláudio. **Proteção e seletividade. Capítulo 3: Dispositivos de proteção - Parte III**, 2010. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/05/Ed50_marco_protecao_seletividade_capIII.pdf . Acesso em: 20 out. 2022

MARDEGAN, Cláudio. **Proteção e seletividade. Capítulo 1: Transformadores de corrente,**
potencial e bobinas de Rogowski para fins de proteção – Parte 1, 2010. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/04/Ed48_janeiro_protecao_seletividade_capI.pdf . Acesso em: 20 out. 2022

ENERGIAS DO BRASIL, EDP**. Fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição – EDP-ES**. Disponível em: https://www.edp.com.br/media/vveny1hb/ptdtpdn0314001_v16.pdf. Acesso em: 20 out. 2022.

PEXTRON**. Tabela ANSI de numerações e funções**. Disponível em: https://www.pextron.com/arquivos/Tabela%20ANSI%201d%20v002.pdf. Acesso em: 20 out. 2022.

ANEXO A



LEGENDAS

- Para Raio
- Chave Seccionadora trifásica, com intertravamento elétrico.
- Transformador de Potencial
- Transformador de Corrente
- Disj. Med. — Disjuntor de média tensão
- Transformador de potência
- Aterramento
- E — Intertravamento elétrico