

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

KÉVIN MATHEUS MONTEIRO LEITE

**ARRANJOS FÍSICOS PARA SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS ISOLADAS
A AR EM EXTRA ALTA TENSÃO**

VIÇOSA
2019

KÉVIN MATHEUS MONTEIRO LEITE

**ARRANJOS FÍSICOS PARA SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS ISOLADAS
A AR EM EXTRA ALTA TENSÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2019

KÉVIN MATHEUS MONTEIRO LEITE

**ARRANJO FÍSICO PARA SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS
ISOLADAS A AR EM EXTRA ALTA TENSÃO**

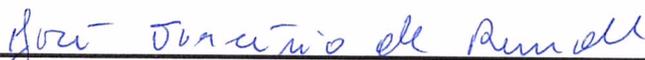
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 10 de julho de 2019.

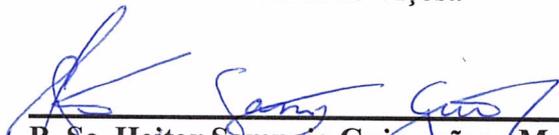
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa



B. Sc. Heitor Sampaio Guimarães - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.
(Winston Churchill)*

Aos meus pais que sempre me incentivaram.

Agradecimentos

Aos meus pais Águida e José Maurício que nunca mediram esforços para me ajudar e incentivar em todo meu processo de aprendizado.

Ao meu irmão Déric pela força e ensinamentos.

A minha namorada Camila pelo amor e incentivo.

Aos meus amigos pelos momentos de lazer, diversão e companheirismo.

Ao professor Mauro Prates por me ajudar ao longo da graduação e me orientar na realização deste trabalho.

Ao meus colegas de trabalho e a empresa Montago Construtora pela oportunidade que me deram de trabalhar e experienciar um pouco sobre a área de estudo.

Resumo

O projeto de uma subestação é um processo complexo que envolve diversas áreas das engenharias, como, por exemplo, a elétrica, a civil, a eletromecânica e telecomunicações. Dentro destas áreas, temos várias subdivisões de projetos que levam a realização da obra, seja ela de construção, ampliação, reformas ou melhorias. O primeiro passo para realização do projeto é a definição de qual tipo de configuração de barra que a subestação terá, caso seja uma obra de construção, ou quais serão as mudanças no mesmo para atender aos padrões e procedimentos exigidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). O Arranjo Físico tem como base a configuração de barra utilizada e os equipamentos novos ou existentes a serem inseridos no projeto, e por isso a sua importância dentro da Subestação, pois dependerá dele o grau de segurança, confiabilidade, tempo de realização, economia de custos entre outros fatores que serão primordiais para a realização do projeto. Diante disso, este estudo vem propor uma base de informações necessárias a se reunir sobre o tema abordado antes de se começar qualquer tipo de obra tendo como acompanhamento e exemplificação a obra SE Pimenta , demonstrando métodos e critérios básicos envolvidos na sua elaboração.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos.....	15
1	Revisão Bibliográfica.....	16
1.1	Subestações caracterização e conceitos.....	16
1.2	Configuração de barras para subestações	17
1.3	Crterios de escolha do esquema elétrico	24
1.4	Componentes do Arranjo.....	25
1.4.1	Sistema de Aterramento	25
1.4.2	Equipamentos do Arranjo.....	27
2	Materiais e Métodos	34
2.1	Etapas de Projeto	35
2.1.1	Estudos Iniciais.....	35
2.1.2	Anteprojeto	36
2.1.3	Projeto Básico.....	37
2.1.4	Projeto Executivo	38

3	Intervenção SE Pimenta	39
3.1	Arranjo Físico	40
3.2	Distâncias Elétricas	42
3.3	Distâncias de Segurança	45
3.4	Proteção Contra Incêndios.....	47
3.5	Definição das estruturas suportes	49
3.5.1	Estruturas de Concreto	50
3.5.2	Estruturas de Aço Galvanizado	51
3.5.3	Requisitos	52
3.6	Locação das Edificações	52
3.6.1	Casa de Comando	53
3.6.2	Oficinas Almoxarifado	54
3.6.3	Guarita	55
3.6.4	Casa de Relés.....	55
3.7	Barramentos rígidos e flexíveis.....	56
3.7.1	Barramentos rígidos.....	56
3.7.2	Barramentos flexíveis.....	57
4	Conclusão	58

Referências Bibliográficas	62
----------------------------------	----

Lista de Figuras

Figura 1 - Barra Simples.....	18
Figura 2 - Barra Simples com Seccionamento	19
Figura 3 – Barra Dupla Disjuntor Simples.....	20
Figura 4 - Barra Dupla Disjuntor Simples com By-Pass.....	21
Figura 5 - Barra Principal e Transferência	22
Figura 6 - Barra dupla com quatro chaves.....	22
Figura 7 - Disjuntor-e-meio.....	23
Figura 8 - Anel Simples.....	24
Figura 9 – Trecho do anteprojeto que determina reformas na Malha de Aterramento da SE Pimenta	26
Figura 10 - Escopo 1 do projeto “SETOR 138KV - MALHA ATERRAMENTO – PLANTA”	26
Figura 11 – Chave Seccionadora do tipo semi-pantográfica de alcance Vertical de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV	27
Figura 12 – Disjuntor de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV	28
Figura 13 – Para-Raio de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV.....	29
Figura 14 – Reatores em derivação	30
Figura 15 – Auto-Transformador Trifásico 345/138/13,8 kV da SE Pimenta 345/138 kV	31
Figura 16 – TP de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV.....	32
Figura 17 – TC de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV	33
Figura 18 – Implantação de nova LT no pátio 138 kV da SE Pimenta 345/138 kV	41
Figura 19 – Afastamento entre fase-fase no pátio 138 kV da SE Pimenta 345/138 kV.....	44
Figura 20 – Corte da SE com ênfase em um TC de 138 kV e sua Estrutura Suporte	46
Figura 21 – Projeto PCF para Banco de Transformadores SE Pimenta 345/138 kV	48
Figura 22 – Fundação dos Banco de Transformadores SE Pimenta 345/138 kV.....	49

Figura 23 – Estruturas de Concreto para equipamentos e barramentos flexíveis.....	50
Figura 24 – Estrutura treliçada para suporte EG-3 de Para-Raios.....	51
Figura 25 – Vista aérea da Subestação	53
Figura 26 – Ampliação casa de comando.....	54
Figura 27 – Extensão Barramento existente.....	57
Figura 28 – Barramentos Flexíveis.....	58
Figura 29 – Arranjo SE Pimenta 345/138 kV.....	61

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Distâncias elétricas mínimas.....	43
Tabela 2 – Distâncias elétricas mínimas CEMIG.....	43
Tabela 3 – Distâncias de segurança.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

EAT - Extra Alta Tensão

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

IEC - International Electrotechnical Commission

LT - Linha de Transmissão

NBI - Nível Básico de Isolamento

NBR - Norma Brasileira

ONS - Operador Nacional do Sistema

PR - Para-raios

PCF- Parede corta-fogo

SE - Subestação

TC - Transformador de Corrente

TP - Transformador de Potencial

TR - Transformador

1 Introdução

Hoje em dia a energia elétrica tornou-se algo presente e indispensável no nosso dia a dia, seja para serviços básicos de saúde, transporte, lazer, educação, melhoria na qualidade de vida, dentre outros. O desenvolvimento da sociedade está diretamente relacionado com os investimentos no fornecimento e disponibilidade de energia elétrica, visto que sem ela toda essa informação e tecnologia gerada diariamente não poderiam estar sendo usadas. Para atender a esta demanda crescente por eletricidade, faz-se necessário investimentos no fornecimento de energia elétrica, construindo não apenas usinas geradoras, mas também linhas de transmissão e subestações para que o nosso sistema básico possa se ampliar e atingir cada vez mais locais onde às vezes ainda não possuem fornecimento ou a demanda seja maior do que o existente.

As subestações são componentes de grande importância no fornecimento de energia elétrica, permitindo o direcionamento do fluxo de energia, transformação de tensões, distribuição de energia, seccionamento de linhas de transmissão, entre outros papéis que garantem o bom funcionamento deste sistema elétrico. Uma das etapas para construções de subestações é o arranjo físico, que determina entre outras coisas, a maneira como estes equipamentos estarão conectados e dispostos no pátio de manobras.

Ao planejar a construção de uma subestação, o aspecto de maior importância está na escolha do esquema elétrico, também chamado de configuração de barra. Diversos fatores ajudam a determinar qual esquema elétrico terá uma subestação, tais como: flexibilidade de manobra, confiabilidade, segurança, simplicidade para manutenção, facilidades para ampliações futuras, boa visualização dos equipamentos, entre outros que serão o foco do nosso estudo. Em sua maioria, as subestações de extra alta tensão são pertencentes à rede básica do sistema elétrico. Nestes casos a escolha do tipo configuração de barras deverá ser feita visando atender aos procedimentos definidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define Rede Básica dos Sistemas Elétricos Interligados, como todas as subestações e linhas de transmissão em tensão superior ou igual a 230kV integrantes de concessões de serviços públicos de energia elétrica. Entretanto existem situações em que a subestação a ser construída não será interligada diretamente à rede básica, por exemplo quando a nova subestação for para fins privados, atendendo à demanda

industrial como fábricas, mineradoras, siderúrgicas, etc. Neste caso a escolha do tipo de esquema elétrico ficará a critério do projetista a comando da entidade privada [3].

Desta forma, a verificação da necessidade de se ampliar ou construir novas subestações pertencentes à rede básica, ocorre via estudos de planejamento de expansão e manutenção do sistema elétrico realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que servirão como diretrizes para os investimentos a serem realizados no sistema elétrico. Dentre os estudos realizados e divulgados pela EPE, destaca-se o Plano Decenal de Expansão de Energia, que é um documento informativo voltado para toda a sociedade, com indicação, e não determinação, das perspectivas de expansão futura do setor de energia sob a ótica do Governo no horizonte decenal. O último Plano Decenal divulgado em 2018, com estudo de horizonte para até 2027, indica que a projeção do consumo nacional de energia elétrica terá uma taxa média de crescimento de 1,7%, e que a capacidade de geração instalada poderá aumentar de 158 GW para cerca de 198 GW. Desta forma, a estimativa total de investimentos prevista em transmissão de energia elétrica no período 2018 a 2027, será de cerca de R\$ 156,1 bilhões, investidos em linhas de transmissão e subestações [2].

1.1 Motivação

Neste contexto introdutório, pode-se perceber a importância de estudos e trabalhos relacionados à geração e transmissão de energia elétrica. O sistema elétrico é uma área estratégica, não só para a economia como para a qualidade de vida de toda a população. O papel fundamental que as subestações exercem no sistema de transmissão de energia elétrica e a relevância de um arranjo físico corretamente projetado, nos leva a observar a importância de um roteiro que contenha as informações necessárias na construção ou elaboração de um projeto de arranjos físicos para subestações elétricas Isoladas a Ar.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como foco principal o estudo eletromecânico de arranjos físicos para subestações elétricas isoladas a ar em extra alta tensão. Para tal feito, tem-se como objetivos específicos:

- Apresentar conceitos e classificações dos principais tipos de arranjos existentes no Brasil.
- Apresentar as principais configurações de barras para subestações.
- Realizar um levantamento de dados importantes para escolha do tipo de configuração a ser utilizada no projeto da subestação.
- Mostrar a aplicação prática do projeto, usando como exemplo obras reais.

1 Revisão Bibliográfica

Esta seção aborda os principais conceitos relacionados às subestações de energia elétrica como, por exemplo, os tipos de configurações de barras para subestações, os critérios para a escolha do tipo de configuração de barras e os principais equipamentos de uma subestação.

1.1 Subestações, caracterização e conceitos

A subestação é uma parte do sistema de potência que compreende os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos, condutores e acessórios, abrangendo as obras civis e estruturas de montagem [4]. Os equipamentos de transformação permitem elevação, queda ou medição entre diferentes níveis de tensão. Os equipamentos de manobra estão presentes para possibilitar que diferentes pontos da subestação possam ser desenergizadas por motivos de reformas ou manutenções sem que a distribuição de energia seja afetada. Os equipamentos do sistema de SSPC integra a supervisão, proteção e controle da subestação, protegendo a mesma de possíveis falhas e/ou possíveis danos por desastres naturais [5].

Segundo a referência 6 as subestações são classificadas como a seguir:

- Quanto a tensão de operação:
 - a) Baixa Tensão (BT) – tensão menor ou igual a 1000V.
 - b) Média Tensão (MT) – $1000V < \text{tensão} \leq 35 \text{ kV}$.
 - c) Alta Tensão (AT) – $35 \text{ kV} < \text{tensão} \leq 230 \text{ kV}$.
 - d) Extra Alta Tensão (EAT) – $230 \text{ kV} < \text{tensão} \leq 800 \text{ kV}$.
 - e) Ultra Alta Tensão (UAT) – acima de 800 kV.

- Quanto ao tipo de instalação:
 - a) Abrigada – Possui proteção de um teto.
 - b) Interna – é localizada dentro de uma edificação.
 - c) Móvel – se move juntamente com um veículo automotor dentro da SE, conforme a necessidade.

- Tipo construtivo dos equipamentos [7]:
 - a) Convencional: tem o ar como meio isolante de equipamentos interligados por cabos e estruturas de barramento.
 - b) Compacta: assim como a convencional, possui o ar como meio isolante, porém os equipamentos e arranjo projetado são dispostos de forma a reduzir as distancias entres os componentes da subestação.
 - c) Cubículo Metálico: como o próprio nome já diz, é um cubículo reduzido que possui todos equipamentos dentro de seu interior e que possibilitam a redução drástica da SE. Geralmente são de baixa ou média tensão.
 - d) Blindada: são subestações onde seus equipamentos e conexões são protegidas e encobertas por uma carcaça, onde um gás diferente do ar é colocado possibilitando uma redução de equipamentos e distancias de segurança da SE.
 - e) Híbrida: é uma subestação mista caracterizada por diferentes tipos construtivos de equipamentos e suas conexões.

1.2 Configuração de barras para subestações

A configuração de barras da subestação identifica o esquema elétrico utilizado nas instalações. É importante observar que a ONS prevê normativas que ditam as configurações de barra dos arranjos para diferentes características necessárias à subestação como por exemplo, sua classe de tensão, possível aumento de demanda energética para a localidade, número de conexões de linhas de transmissão (LT's) conectadas à subestação, número de transformadores (TR's) necessários para a elaboração do projeto e restrição de espaço [8]. As configurações de barra mais utilizadas nas SE's que compõe o nosso sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro, são citadas a seguir:

1.2.1 Barra simples

Esta configuração é considerada a mais antiga e a mais primordial de todas as configurações que vieram a ser utilizadas posteriormente com surgimento de novas técnicas de arranjo. Para a sua elaboração e construção, é necessário o mínimo de investimento inicial pelo fato do menor número de componentes dentro do seu arranjo, proporcionando também um melhor aproveitamento da área do projeto. Este fato torna esta configuração mais apropriada para a construção em zonas com pouca disponibilidade de terreno ou com terrenos irregulares onde o tamanho da subestação pode ser reduzido consideravelmente possibilitando assim a execução do projeto.

Esta configuração é composta por apenas um barramento como é mostrado na Figura 1 e suas saídas de linhas conectadas a ele como seu próprio nome já diz. Cada saída será composta por um disjuntor e duas seccionadoras e por esse motivo são consideradas configurações com baixa flexibilidade e confiabilidade, visto que qualquer tipo de problema, manutenção ou expansão da SE irá requerer o desligamento da mesma por completa [9].

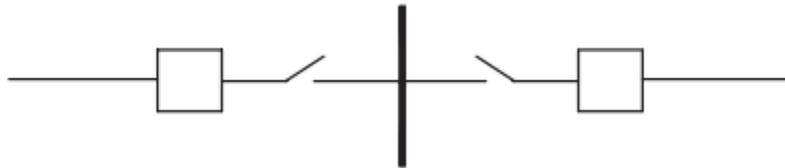


Figura 1 - Barra Simples

2.2.2 Barra Simples com Seccionamento

O esquema elétrico de Barra Simples com seccionamento, indicado na Figura 2, é um avanço com relação a barra simples, pois, permite ao operador da subestação realizar operações de manutenção ou expansão na subestação sem ter que desligá-la completamente. Entretanto, esta configuração ainda é falha já que não são possíveis realizações de manobras de transferência de carga na SE, ou seja, caso seja necessário a manutenção de equipamentos ou algum tipo de reforma e a desenergização temporária de alguma linha, este “lado” do barramento ficará prejudicado por um certo período de tempo, e a carga alimentada por aquela parte da SE também seria temporariamente afetada até que a intervenção seja concluída ou que sejam tomadas medidas de energização temporárias.

Requer um pouco mais de investimento inicial pelo fato do seccionamento da barra, o que causa também um aumento da área de ocupação da subestação, mas nada que fuja muito do esperado, e apesar de ainda ser um esquema mais antigo, já tem uma confiabilidade e flexibilidade maior do que a configuração de barra simples pelas razões aqui já ditas [18].

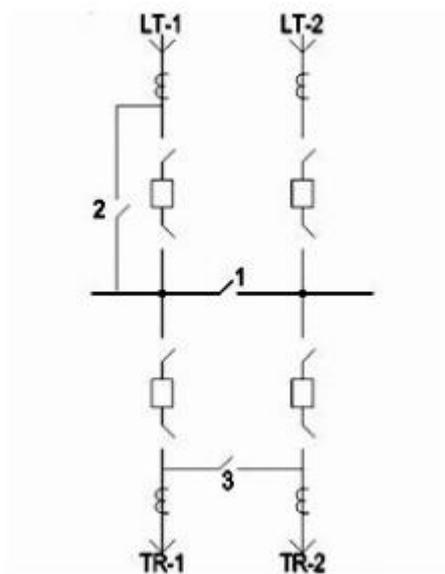


Figura 2 - Barra Simples com Seccionamento

2.2.3 Barra Dupla Disjuntor Simples

A Barra Dupla com disjuntor simples já é um sistema de maior confiabilidade e melhor flexibilidade já que é capaz de manobrar a subestação e suas cargas completamente, sem a necessidade de desenergizar as cargas para a realização de intervenções na subestação, devido ao fato de haverem duas barras com qual o seccionamento de chaves consegue realizar transferência das cargas de um setor para outro da SE por um tempo limitado, para que não ocorram sobrecargas nos equipamentos e sejam possíveis trocas de equipamentos, ampliações de setores, manutenções de linhas, etc.

É um arranjo de custo considerável em relação aos dois esquemas citados anteriormente devido ao maior número de componentes presentes na subestação e a maior área ocupada pela mesma, como indicado na Figura 3. Ela é composta por dois barramentos principais conectados entre si, por um disjuntor de interligação e duas chaves seccionadoras. A mesma ligação se repete para cada saída de linha [9].

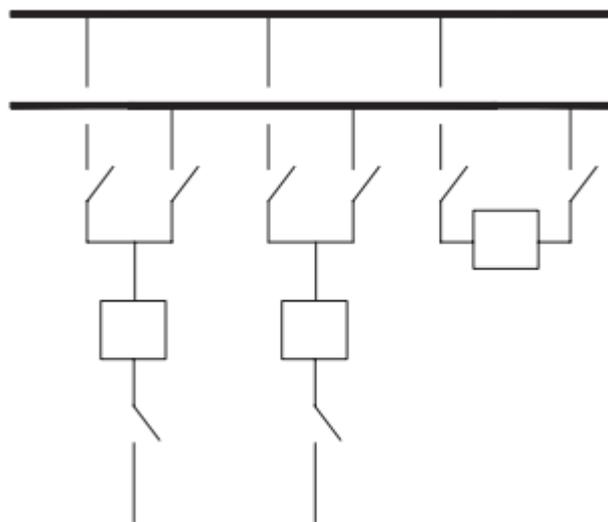


Figura 3 – Barra Dupla Disjuntor Simples.

2.2.4 Barra Dupla Disjuntor Simples com By-Pass:

A inclusão do By-Pass na configuração 2.2.3 apresentará a vantagem única e exclusiva de poder realizar manutenções no disjuntor de uma determinada saída de linha sem que seja necessário o seu desligamento, pois o mesmo é substituído pelo disjuntor de interligação como mostrado na Figura 4 [8].

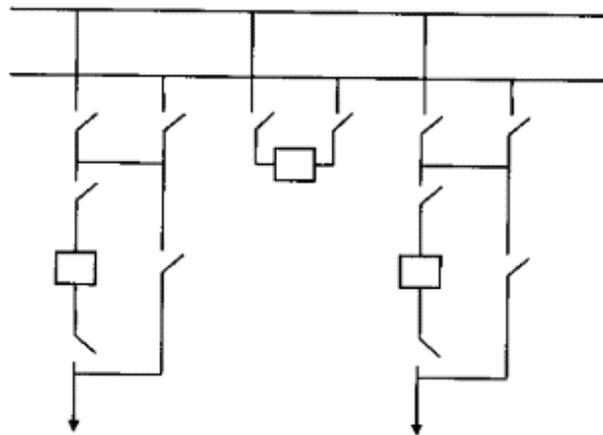


Figura 4 - Barra Dupla Disjuntor Simples com By-Pass.

2.2.5 Barra principal mais transferência

A configuração de Barra Principal mais Barra de transferência é mais recomendável que as configurações de barra 2.1.1, 2.1.2, e 2.1.3, pois possibilita a retirada de disjuntor da configuração sem desligar a carga. Conseqüentemente, tem-se mais simplicidade de operação e menor área ocupada. É composto de duas barras sendo uma denominada principal e a outra barra de transferência. As saídas de linha são conectadas à barra principal através de um disjuntor, duas chaves seccionadoras e à barra de transferência através de uma seccionadora. Entre as duas barras existe uma interligação dotada de um disjuntor e duas seccionadoras como é mostrada na Figura 5 [9].

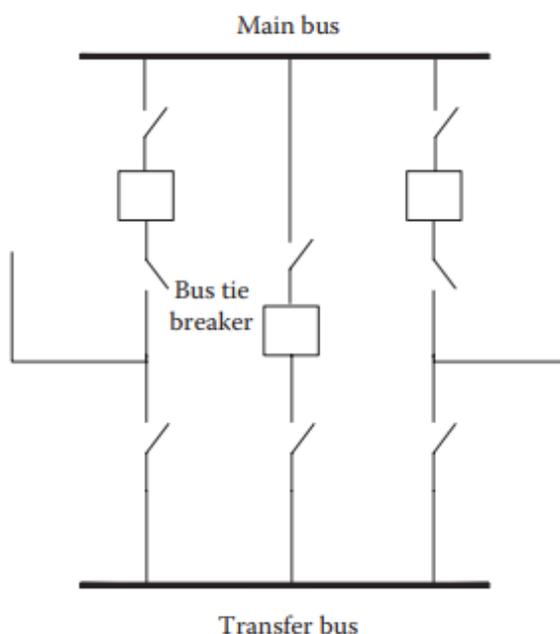


Figura 5 - Barra Principal e Transferência

2.2.6 Barra Dupla com Quatro Chaves

A configuração barra dupla com quatro chaves, apresentada na Figura 6, tem dois barramentos aos quais cada circuito é conectado por meio de chaves seccionadoras, ou seja, que possibilitam selecionar qual barramento estará ligado ou desligado. O disjuntor *by-pass* conectado entre os dois barramentos permite manobras em casos de emergência ou manutenção, o que confere um maior nível de segurança e de continuidade a esta configuração [10].

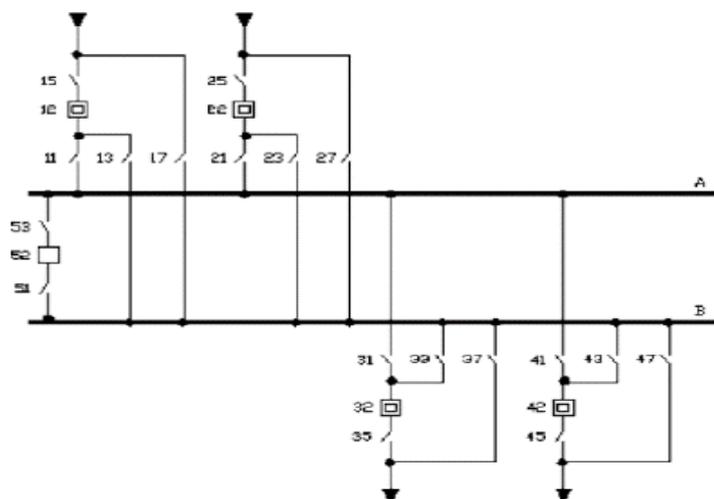


Figura 6 - Barra dupla com quatro chaves

2.2.7 Disjuntor-e-meio

É aplicável a um mínimo de quatro saídas, porém requer maior espaço para implantação devido ao maior número de componentes e conseqüentemente ocasiona também um custo maior de construção. Na figura 7 podemos ver a composição feita por duas barras interligadas e seu conjunto de 3 disjuntores e 6 chaves até e suas respectivas saídas. A visualização desta configuração de barras é um pouco mais complexa, sendo que cada disjuntor não é associado a uma saída [10].

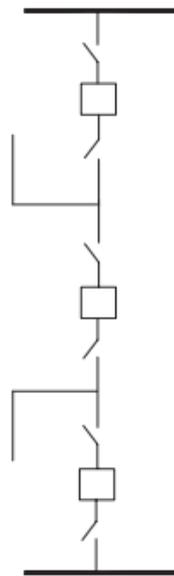


Figura 7 - Disjuntor-e-meio

2.2.8 Anel Simples

Esta configuração não costuma ser aplicada a um número grande de saídas para que não ocorram aberturas de disjuntores não adjacentes e que possam vir a seccionar o anel e desenergizar suas respectivas linhas. Este esquema interliga cada linha de transmissão que chega à subestação com um conjunto chave-disjuntor-chave até que todas linhas estejam interligadas e formem um anel. Cada linha de saída possui sua própria chave seccionadora para casos que sejam necessários [9].

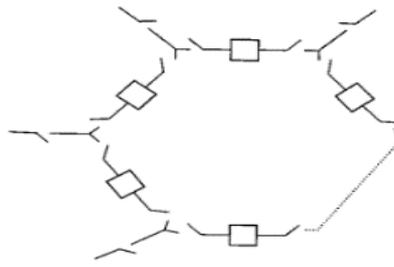


Figura 8 - Anel Simples

1.3 Critérios de escolha do esquema elétrico

Para o início da elaboração do arranjo de uma subestação, alguns fatores devem ser analisados previamente com intuito de se otimizar a SE, ou seja, realizar o melhor arranjo possível com todas especificidades e recursos disponíveis para aquele projeto. Com isso tem-se alguns fatores que deverão ser analisados de forma criteriosa antes do início de qualquer atividade, para que os custos com retrabalho sejam evitados e possam vir a onerar mais despesas ao projeto do que os levantados inicialmente. São estes os fatores [11]:

- Quantidade de recursos financeiros disponíveis e custos previstos de implantação de obra.
- Elaboração do arranjo de forma a minimizar a área de ocupação, sem que isso possa atrapalhar a manutenção ou troca de equipamentos, e possibilite possíveis reformas ou ampliações da SE.
- Operação da SE de forma automatizada.
- Escolha de equipamentos que garantam boa confiabilidade e baixos custos de manutenção.
- Fatores climáticos e ambientais da região que possam vir a intervir tanto no projeto de implantação quanto na fase de manutenção e operação da SE, e que possam vir a causar danos naturais ou algum tipo de risco aos agentes operadores.
- Necessidade de sinalização ou reformas que garantam a segurança de todos os envolvidos desde a fase de implantação do projeto até a sua manutenção.

Nos casos em que a subestação a ser construída pertença a rede básica, a escolha do tipo de configuração de barras deverá ser feita visando atender aos procedimentos definidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). As configurações de barras para novas subestações deverão ter as seguintes configurações [1]:

- a) Pátio de 765, 500, 440, e 345 kV deverão ter a configuração de arranjo barra dupla com disjuntor e meio.
- b) Pátios 230 e 138 kV deverão ter a configuração de arranjo barra dupla com disjuntor simples e quatro chaves.

São permitidas variantes destas configurações, desde que:

- a) Os arranjos serem previamente submetidos a aprovação da ONS.
- b) Possa evoluir para os padrões citados anteriormente.
- c) Tenha desempenho comprovado, igual ou superior aos padrões estabelecidos.

1.4 Componentes do Arranjo

Neste capítulo são apresentadas algumas análises sobre os principais componentes das subestações, em específico na SE Pimenta, que passa por obras de reforço e melhorias.

1.4.1 Sistema de Aterramento

O aterramento é de importância fundamental para uma instalação elétrica, sobretudo para garantir a segurança das pessoas, a integridade dos equipamentos e uma adequada operação do sistema. Este é dimensionado ponderando uma situação de falta para a terra e analisando os potenciais críticos gerados por esta situação [9].

O dimensionamento de uma geometria apropriada, para o controle de potenciais de passo e toque, é de extrema relevância para a segurança daqueles que transitarem por esta região. Esta geometria é delineada a partir de um processo iterativo, ou seja, parte-se de uma malha inicial onde os potenciais são avaliados. Ao verificar níveis críticos destes potenciais, a

geometria da malha se define com o objetivo de minimizar tais tensões provenientes de um curto para a terra. Pelas figuras (9) e (10), podemos elucidar algumas mudanças definidas no Escopo 1 do ANTEPROJETO da obra da SE Pimenta:

❖ **Premissas**

Em função da instalação do novo vão 12P, faz parte do escopo os seguintes serviços e não se limitando a estes:

- Drenagem, malha de aterramento;
- Fundações para: pilares, suportes de equipamentos, suportes de barramentos;
- Adequação e ampliação em canaletas e eletrodutos;
- Adequação no sistema básico de proteção contra incêndio.

A proteção de barras 345kV é do fabricante Siemens, modelo 7SS52, nesta proteção há unidade de bay reserva para o vão 12P.

A unidade de bay do BP87 será alimentada pelo enrolamento do TC de bucha do novo Trafo T3.

Figura 9 – Trecho do anteprojeto que determina reformas na Malha de Aterramento da SE Pimenta

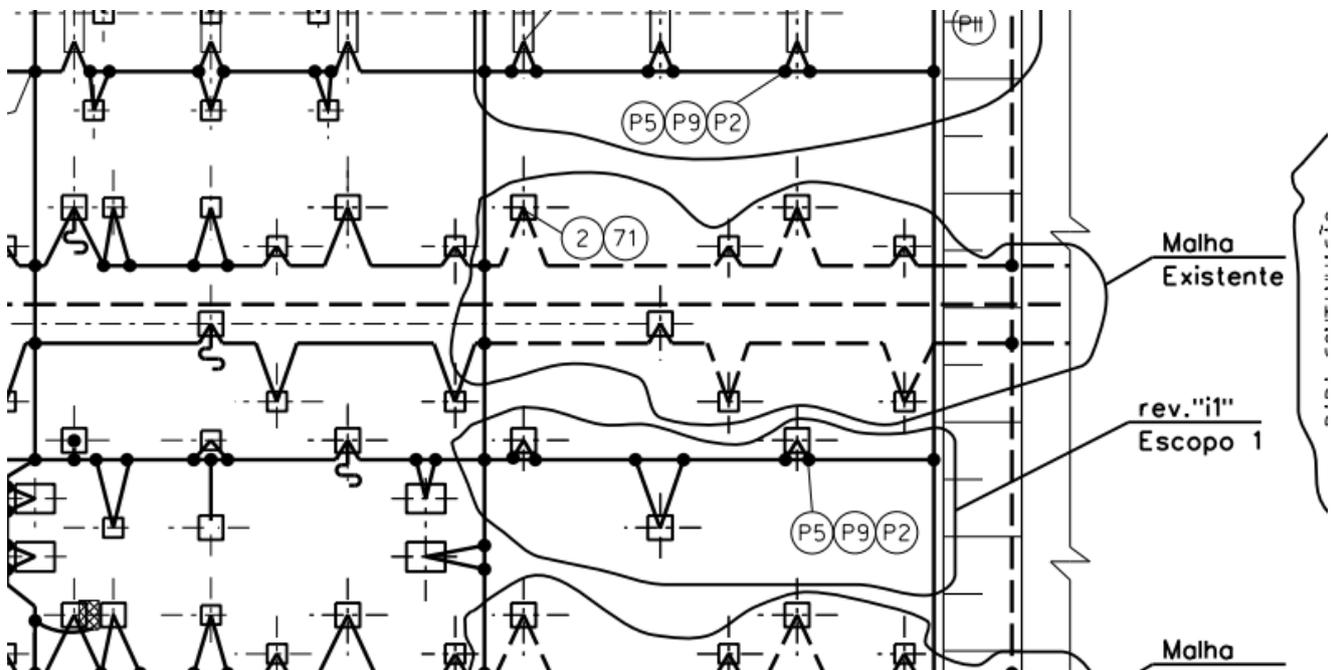


Figura 10 - Escopo 1 do projeto “SETOR 138KV - MALHA ATERRAMENTO – PLANTA”

1.4.2 Equipamentos do Arranjo

- a) Chaves Seccionadoras: são equipamentos de manobras ligados em série, projetados para interromper o circuito quando o mesmo está previamente desenergizado por um equipamento de proteção. Podem ter diferentes classificações como de abertura central, abertura vertical, abertura horizontal, entre outras variações, que serão mais adequadas a cada tipo de função e a cada tipo de arranjo dentro da SE [15].



Figura 11 – Chave Seccionadora do tipo semi-pantográfica de alcance Vertical de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV

- b) Disjuntor: equipamento ligado em série no circuito, destinado a interromper circuitos em casos de detecção de falha ou operar como equipamento de manobra, abrindo ou fechando circuitos que estejam operando em condições normais [13].



Figura 12 – Disjuntor de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV

- c) Pára-raios: são equipamentos ligados em paralelo, com a função de limitar as sobretensões de faltas ou de descargas atmosféricas, para prevenir danos aos equipamentos da subestação e garantir a segurança de pessoal [17].



Figura 13 – Para-Raio de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV

- d) Reatores em derivação: Em geral, são ligados diretamente ao barramento de saída das linhas, nos sistemas em tensões mais elevadas. Têm as funções de compensação reativa de linhas de transmissão, variação artificial do comprimento de linhas, redução de sobretensões em surtos de manobras, que são acentuados quanto maior seu comprimento. Desta forma, por exemplo, o efeito Ferranti em LT's ou as excessivas quedas de tensão em regime de carga elevada são minimizadas, e assim as tensões nas extremidades da linha são mantidas no valor desejado [15].



Figura 14 – Reatores em derivação

- e) Transformador: equipamento destinado à elevação do nível de tensão de operação, redução do nível de tensão e mudança de fase [13].



Figura 15 – Auto-Transformador Trifásico 345/138/13,8 kV da SE Pimenta 345/138 kV

- f) Transformadores de potencial (TP): são equipamentos ligados em paralelo como mostrado na Figura 16, destinados a medição e que têm a função de isolar o circuito de menor tensão também chamado de enrolamento secundário onde se localizam os instrumentos de medição e relés, do circuito de maior tensão, enrolamento primário [17].



Figura 16 – TP de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV

- g) Transformadores de corrente (TC): são equipamentos ligados em série como mostrado na Figura 17, que também se destinam a isolar o enrolamento primário que está conectado ao circuito de potência do enrolamento secundário, desempenhando as mesmas funções dos TP's, só que para correntes [13].



Figura 17 – TC de 345 kV da SE Pimenta 345/138 kV

Para TC's e TP's vale a relação de transformação [17]:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Assim as tensões primárias que são as equivalentes da rede são transformadas para as tensões de 120 V (ou 115 V) e 5 A (ou 1 A) para tensões e correntes respectivamente de TC's e TP's

2 Materiais e Métodos

O trabalho foi desenvolvido a partir de estudos de campo e participação de estágio na empresa Montago Construtora Eireli que proporcionou contato e experiência com a parte de obras realizadas em subestações durante os 6 meses de serviço, em especial, nas Subestações de Jaguara pertencente a Usina Hidrelétrica de Jaguara e na Subestação de Pimenta, ambas pertencentes ao estado de Minas Gerais e administradas pela Concessionária de Energia de Minas Gerais (CEMIG).

A partir desse estágio, foi possível entender os tipos de reforma na SE, as melhorias, ampliações, troca de equipamentos, trocas nos sistemas de supervisão e controle, análise de projetos e a partir disso, selecionar desenhos, fotos tiradas em visitas de campo à subestação, livros relacionados a equipamentos, montagem eletromecânica, construção de subestações e critérios para projetos de transmissoras de energia que possam elucidar um pouco do trabalho feito em prol da empresa e de forma a possibilitar um estudo e preparação de possíveis alunos que venham a trabalhar na área.

Realizou-se um trabalho de gestão de projetos e contratos, na qual todo o processo desde a abertura de licitação até a compra de equipamentos, instalação, e aprovação/execução veio sendo acompanhada de perto até o presente momento e que possibilitou um melhor entendimento sobre todas as áreas de atuação e ataque da empresa, especialmente, na parte eletromecânica.

São apresentados conceitos sobre subestações elétricas, classificação das subestações, os principais equipamentos existentes, as configurações de barras mais usuais, critérios para escolha do tipo de configuração de barra, sistemas de aterramento, a evolução do projeto até a fase executiva e os principais pontos a serem observados na elaboração do arranjo físico de subestações elétricas, sendo demonstrada a aplicação, principalmente, a partir do contato com a obra de reforços e melhorias da SE Pimenta.

2.1 Etapas de Projeto

A decisão de se ampliar ou construir uma nova SE, é o resultado dos estudos de planejamento e desenvolvimento do sistema elétrico, para atender as previsões de evolução do mercado consumidor ou para interligar os sistemas elétricos possibilitando o intercâmbio de energia.

Até a concepção do projeto executivo de uma subestação, são feitos estudos iniciais de viabilidade e projeto básico. O roteiro de evolução do projeto apresentado neste capítulo, não estabelece uma sequência rígida de atividades, pois na maioria das vezes estes estudos, levantamentos e execuções são realizados por diferentes grupos ou pessoas, cada uma atuando em sua área específica e quase sempre simultâneas, de forma a possibilitar o andamento do projeto de forma mais rápida, encurtando o espaço de tempo, prevenindo atrasos e consequentemente prejuízos ao contratado e contratante do serviço. Durante a evolução, várias atividades são desenvolvidas em paralelo, podendo ocorrer a supressão de alguma etapa intermediária ou retorno a etapas precedentes no intuito de melhorar o projeto. A evolução do projeto vai se processando por aproximações sucessivas, com a finalidade de otimizá-lo pelo estudo de alternativas, pela variação de parâmetros, até que se alcance uma solução que seja técnica e economicamente satisfatória.

2.1.1 Estudos Iniciais

Nesta fase são avaliadas a viabilidade e a necessidade de se construir ou ampliar uma subestação. São coletados dados iniciais fornecidos pelas empresas de energia elétrica, como as potências da SE e as tensões de entrada e saída. Também são analisadas as configurações de barras a serem implantadas, a importância das cargas a serem supridas, assim como as consequências da interrupção parcial ou total do funcionamento da SE caso já seja existente. Desta forma, é possível definir critérios preliminares de funcionamento e níveis de defeito admissíveis para projeção do diagrama unifilar da subestação [19].

A partir do diagrama unifilar são efetuados:

- a) Listagem aproximada dos equipamentos necessários.
- b) Cronograma básico de execução.

c) Estimativa preliminar dos custos.

Assim, é possível a concessionária planejar a obtenção dos recursos necessários e incluir a subestação em seus cronogramas de obras e orçamento.

2.1.2 Anteprojeto

Etapa em que são realizadas análises do sistema como fluxo de potência, curto-circuito e sobretensões em linhas de transmissão. Os resultados obtidos a partir desta análise, complementados por estudos de coordenação de isolamento, permitem determinar as principais características elétricas da subestação e dos seus equipamentos. Em paralelo a estas análises, o diagrama unifilar é reexaminado em maior profundidade quanto a:

- a) Configuração de barras, efetuando-se confronto técnico e econômico das alternativas (ver capítulo 2.2).
- b) Subdivisão em bancos da potência de transformação e escolha do tipo de transformador quanto ao número de fases e de enrolamentos, verificando eventuais padrões estabelecidos pela ONS.
- c) Serviços auxiliares e respectivas fontes de alimentação alternativas, analisando-se o nível de confiabilidade, a necessidade de partida sem fontes externas e requisitos de continuidade para os serviços.

Ao definir o diagrama unifilar, pode-se avaliar a área requerida para a implantação da nova subestação, sendo desenvolvido um arranjo físico baseado em SE's similares. Para um mesmo diagrama é possível mais de um arranjo, sendo necessário um levantamento prévio dos terrenos disponíveis, que indicarão as alternativas que podem vir a ser requeridas para se adaptar ao layout do terreno.

Também são considerados fatores relacionados à natureza urbanística e o relevo do local. Pouco espaço disponível e eventuais restrições de relevo podem levar a utilização de SE's blindadas em SF6, SE's híbridas ou entradas subterrâneas. Assim, para cada opção estudada é realizado um levantamento de equipamentos atendendo às características básicas predefinidas e calculado o orçamento, incluem-se, custos com aquisição de terrenos, instalação do canteiro, sondagem, mobilização de pessoal, serviços de montagem, etc.

Escolhe-se então o local e o tipo de SE a ser implantada, comparando vantagens e desvantagens das diversas alternativas disponíveis em função do desempenho desejado, disponibilidade de recursos e outros fatores que afetam o custo da obra.

2.1.3 Projeto Básico

Consiste no desenvolvimento da alternativa selecionada para o que é indispensável à construção da subestação, e no levantamento de informações essenciais listadas a seguir: [9]

- a) Informações do terreno onde será situada a SE, como por exemplo, levantamento topográfico completo da área a ser utilizada, natureza e resistividade do solo complementadas por sondagens.
- b) Peculiaridades da região onde será situada a SE: relevo, clima, vias de acesso, rede telefônica e outros serviços públicos disponíveis, existência de oficinas para manutenção e reparos de equipamentos; possibilidade de alojamento temporário para o pessoal que irá construir a subestação e permanente para os profissionais de operação; posição e características das outras instalações da concessionária existente nas proximidades.
- c) Critérios operativos da concessionária: modo de operação da SE; requisitos para telecomando e supervisão; meios de comunicação com despacho de carga e outros órgãos da empresa.

Com os dados coletados, define-se os requisitos para equipamentos auxiliares, instalações subsidiárias, execução da obra e fase de operação. Pode-se também efetuar o dimensionamento básico da SE, preparando as etapas listadas abaixo:

- a) Diagrama unificar completo.
- b) Arranjo não detalhado da SE em planta, vista e seções típicas.
- c) Planta de situação com indicação das chegadas das LT's e das vias de acesso.
- d) Desenhos básicos de arquitetura das edificações.
- e) Definição dos critérios básicos para iluminação, aterramento, cabos de alimentação e controle, água, esgotos, drenagem, canaletas e infraestrutura em geral.
- f) Estimativa dos materiais necessários para construção e volumes de serviços envolvidos.
- g) Cronograma de execução e orçamento completo da obra.

- h) Memorial descritivo e documentação.
- i) Especificações técnicas para fornecimento, ensaios e remessa dos principais equipamentos da SE.
- j) Especificações para obras civis e montagem eletromecânica, e requisitos para instalação do canteiro.

Após aprovação pelos órgãos competentes, podem ter início as atividades executivas, tais como: aquisição do terreno, concorrências para compra dos equipamentos principais para execução das obras, após as quais será possível dar andamento à etapa seguinte do projeto.

2.1.4 Projeto Executivo

Esta é a última etapa na evolução no projeto de construção ou ampliação de SE's. Consiste na verificação dos desenhos dos fabricantes de equipamentos, adaptação do projeto básico às especificações dos equipamentos e detalhamento da instalação a ser realizada na subestação [9].

Os projetos executivos que abrangem a construção de uma subestação podem ser reunidos em quatro grupos [12]:

- a) Construção civil e arquitetura onde detalham-se: canaletas e caixas, drenagem, edificações, fundações, hidrosanitário, sondagem, proteção contra incêndio, requisitos para estruturas, terraplanagem e urbanização.
- b) Projeto elétrico e de proteção que abrange: estudos de proteção, arranjo dos painéis da casa de comando, *layout* construtivo dos painéis, diagramas de interligação, diagramas de serviços auxiliares, diagrama unifilar, lista de cabos, etc.
- c) Instalação eletromecânica, que inclui: arranjo físico dos equipamentos, dimensionamento dos condutores, detalhes de montagem dos equipamentos, eletrodutos e canaletas, iluminação, malha de aterramento e sistema de proteção contra descargas atmosféricas.
- d) Projeto de telecomunicações onde é detalhado: encaminhamento dos cabos ópticos que chegam pelas LT's, infraestrutura para os cabos e os equipamentos necessários para comunicação na subestação.

3 *Intervenção SE Pimenta*

Após as etapas de estudos iniciais, anteprojeto e projeto básico, chega-se então à etapa final, onde é elaborado o projeto executivo. Dentre os projetos executivos que envolvem a construção ou ampliação de uma subestação, o arranjo físico destaca-se por ser umas das etapas de maior responsabilidade e impacto nos demais projetos. Arranjo físico para uma subestação é a forma como o diagrama elétrico desenvolvido para a SE será construído, sendo elaborado com base no anteprojeto ou projeto básico, onde já foi efetuado estudos sobre a melhor opção a ser implantada, qual configuração de barras terá a SE, os equipamentos necessários e os impactos e custos gerados por esta escolha.

Para a configuração de barras escolhida para a subestação podem ser desenvolvidos diversos arranjos físicos, variando-se o tipo, a disposição e o modo de fixação de barramentos, equipamentos, etc. Dificilmente todos os requisitos poderão ser atendidos num mesmo arranjo de forma completa.

Durante a elaboração de um arranjo físico são definidos fatores como disposição e conexão entre equipamentos, escolha do tipo de estruturas suporte para os equipamentos e barramentos, determinação das zonas de segurança, arruamento para acesso dos equipamentos, locação de edificações necessárias à subestação (casa de comando, casa de reles, guarita), entre outros. Desta forma, neste capítulo são abordados os principais critérios envolvidos na elaboração do projeto executivo do arranjo físico.

Para facilitar o entendimento e apresentar uma forma organizada à aplicação destes conceitos, um roteiro com os principais pontos discutidos e observados na elaboração e desenvolvimento do projeto são listados a seguir:

- a) Condições topográficas e área disponível.
- b) Distâncias elétricas.
- c) Distâncias de segurança.
- d) Proteção contra incêndio.
- e) Definição das estruturas suportes.
- f) Locação das edificações.
- g) Barramentos rígidos e flexíveis.

É preciso salientar também que as principais concessionárias transmissoras de energia elétrica possuem cada uma, seus próprios critérios básicos para elaboração de projetos

eletromecânicos para subestações, atendendo sempre as diretrizes exigidas pela concessionária que irá operar a Subestação.

3.1 Arranjo Físico

Nesta etapa do arranjo, as características do terreno e a área disponível para construção ou ampliação da subestação são avaliadas, buscando-se sempre sua utilização de forma otimizada. O local ideal para construção de uma subestação é o que permite seu desenvolvimento em um só plano, minimiza a terraplenagem do terreno, permite fácil acesso para montagem e manutenção, reserva de espaço para expansões futuras e não requer fundações complexas e caras.

Uma topografia irregular leva a subdividir a SE em plataforma de níveis diferentes, mantendo-se sempre que possível, setores de mesma tensão num só nível, ou pelo menos módulos de mesma função, possibilitando assim, a redução da terraplenagem. Ao se desenvolver o arranjo físico de uma subestação, deve-se fazer um confronto econômico das soluções para utilização da área disponível, utilizando maior ou menor número de plataformas, e levantando em conta as variações nos custos de terraplenagem, muros de arrimo, drenagem, fundações e estruturas.

Na SE Pimenta 345/138 kV, é fácil de se identificar na Figura 18 a subdivisão em plataformas por níveis de tensão, e um dos locais reservados para possíveis expansões durante a fase de projeto, sendo preparado para a criação de um novo vão e recebimento de uma nova entrada de LT.

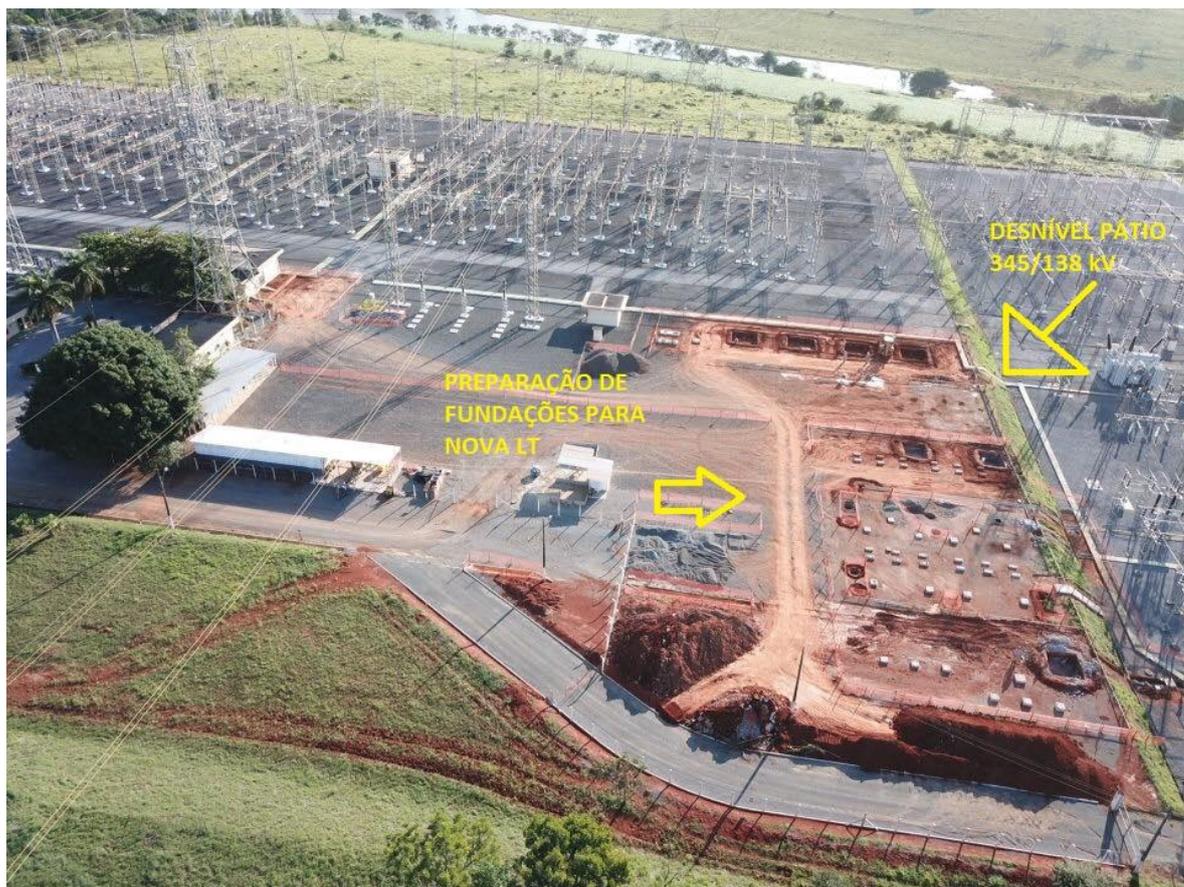


Figura 18 – Implantação de nova LT no pátio 138 kV da SE Pimenta 345/138 kV

O vão 4K indicado na Figura 18, vem sendo preparado segundo normativas do escopo 1 do anteprojeto, que prevêem instalação de 1 seccionador tripolar, 3 TC's de 138 kV, 3 TP's também de 138 kV e suportes, isoladores, vigas, sistemas de aterramento, etc, para que uma nova saída de Linha possa ser instalada e a SE possa ser interligada a CSN.

Quando o espaço disponível é insuficiente para alojar o arranjo ideal, podem ser consideradas as seguintes alternativas para se otimizar a utilização do espaço disponível:

- a) Uso exclusivo de barramento rígido em lugar de barramento flexível.
- b) Uso do equipamento compacto, tais como seccionadoras pantográficas, semi-pantográficos ou verticais reversos em lugar daqueles de abertura vertical ou abertura horizontal.
- c) Adoção de arranjos mais compactos.
- d) Adoção de arranjos híbridos, com parte dos equipamentos e/ou barramentos blindados.
- e) Emprego de SE totalmente blindada em SF₆, inclusive com entradas subterrâneas, pois o espaço requerido pelas chegadas aéreas de LT de EAT ainda é considerável.

Na SE Pimenta, é identificável o uso combinado de barramentos rígidos com os flexíveis e seccionadoras semi-pantográficas para uma minimização do arranjo. Não foi utilizado nenhum tipo de equipamento blindado em SF6 e nenhum tipo de entrada de linha subterrânea.

Entradas subterrâneas são usadas principalmente em subestações localizadas em meio a grandes centros onde as distancias elétricas e de segurança são difíceis de serem mantidas em meio a grande urbanização, tornando inviáveis a chegada das linhas aéreas e viabilizando as entradas subterrâneas mesmo que sendo um projeto mais caro e que demande mais trabalho.

3.2 Distâncias Elétricas

Nesta fase da elaboração do arranjo, são empregadas as distâncias mínimas de segurança durante o faseamento, conexão dos equipamentos e distribuição dos barramentos pelo pátio da SE. Atentar-se para o emprego das distâncias mínimas na elaboração do arranjo é de grande importância para permitir o perfeito funcionamento da subestação.

Distâncias elétricas constituem no isolamento das partes energizadas de uma subestação, utilizando o ar como meio isolante. Esta separação deverá suportar as sobretensões em 60Hz, os impulsos atmosféricos e os impulsos de manobra. Em EAT, a influência preponderante na determinação destes espaçamentos é a dos impulsos de manobra.

Os espaçamentos elétricos exigidos em uma subestação podem ser entre fases e entre partes vivas e terra.

- a) Distâncias elétricas entre partes vivas e terra: tais espaçamentos constituem no afastamento mínimo entre as partes energizadas e qualquer outro elemento que esteja entre o ar e o circuito energizado e que possa servir de caminho para a corrente elétrica até a terra, como superfícies metálicas e estruturas de concreto;
- b) Distâncias elétricas entre fases: é afastamento mínimo exigido entre as fases de um mesmo circuito ou para um circuito adjacente. O cálculo destes espaçamentos, deve ser feito segundo as recomendações da International Electrotechnical Commission (IEC) verificando-se, porém, sua aplicabilidade e a possível ocorrência dos fatores não considerados nas mesmas. Em qualquer caso, devem ser pelo menos 10% superiores aos espaçamentos fase-terra correspondentes, para que uma eventual descarga se dê preferencialmente para a terra.

As distâncias mínimas são constantemente analisadas durante a elaboração do arranjo físico, e tem grande influência na utilização do espaço disponível. É de grande importância que estes afastamentos sejam respeitados para que as chances de desligamentos inesperados de circuitos sejam minimizadas, assim como os riscos de manutenção, operação e habitação da Subestação.

A Tabela 1 apresenta os valores mínimos adotadas para afastamento entre fases e fase-terra.

Tensão Nominal (kV)	NI a impulso atmosférico (kV crista)	Distancia Mínima Fase-Terra (m)	Distancia mínima Fase-Fase	Surto de Manobra Máxima admissível (kV Crista)
138	550	1,10	1,25	535
138	650	1,30	1,45	590
230	850	1,70	1,90	695
230	900	1,80	2,00	720
230	950	1,90	2,10	750
230	1050	2,10	2,30	790
345	1050	2,40	2,70	850
345	1050 a 1175	2,90	2,70	950
345	1175 a 1625	3,40	3,50	1050
460	1300 a 1550	4,10	4,30	1175
500	1300 a 1550	4,10	4,30	1175
500	1425 a 1800	4,80	6,30	1300
750	1550 a 2100	5,60	7,10	1425

Tabela 1 – Distâncias elétricas mínimas

As distancias de fase-terra e fase-fase, indicados na Tabela 1, são considerados mínimos para elaboração de qualquer projeto em subestação, porém cada concessionária transmissora de energia elétrica do Brasil possui seus próprios critérios básicos para elaboração de projetos eletromecânicos. A Tabela 2 apresenta os afastamentos mínimos adotados para as subestações da CEMIG Geração e Transmissão, para 138kV, NBI 550KV e que estão sendo adotados na obra da SE Pimenta para construção de barramentos aéreos no patio de 138 kV.

DISTANCIAS MÍNIMAS ENTRE PARTES RIGIDAS			
TENSÃO kV	NBI (kV)	FASE-FASE	FASE-TERRA
138	550	150 cm	107 cm

Tabela 2 – Distâncias elétricas mínimas CEMIG

A Figura 19 exemplifica a aplicação do afastamento mínimo entre fases e fase-terra, durante a elaboração do arranjo físico da SE Pimenta, usando-se as distâncias mínimas apresentadas na tabela 2, sendo 1,07 metros entre fase-terra e 1,50 metros entre fase-fase.

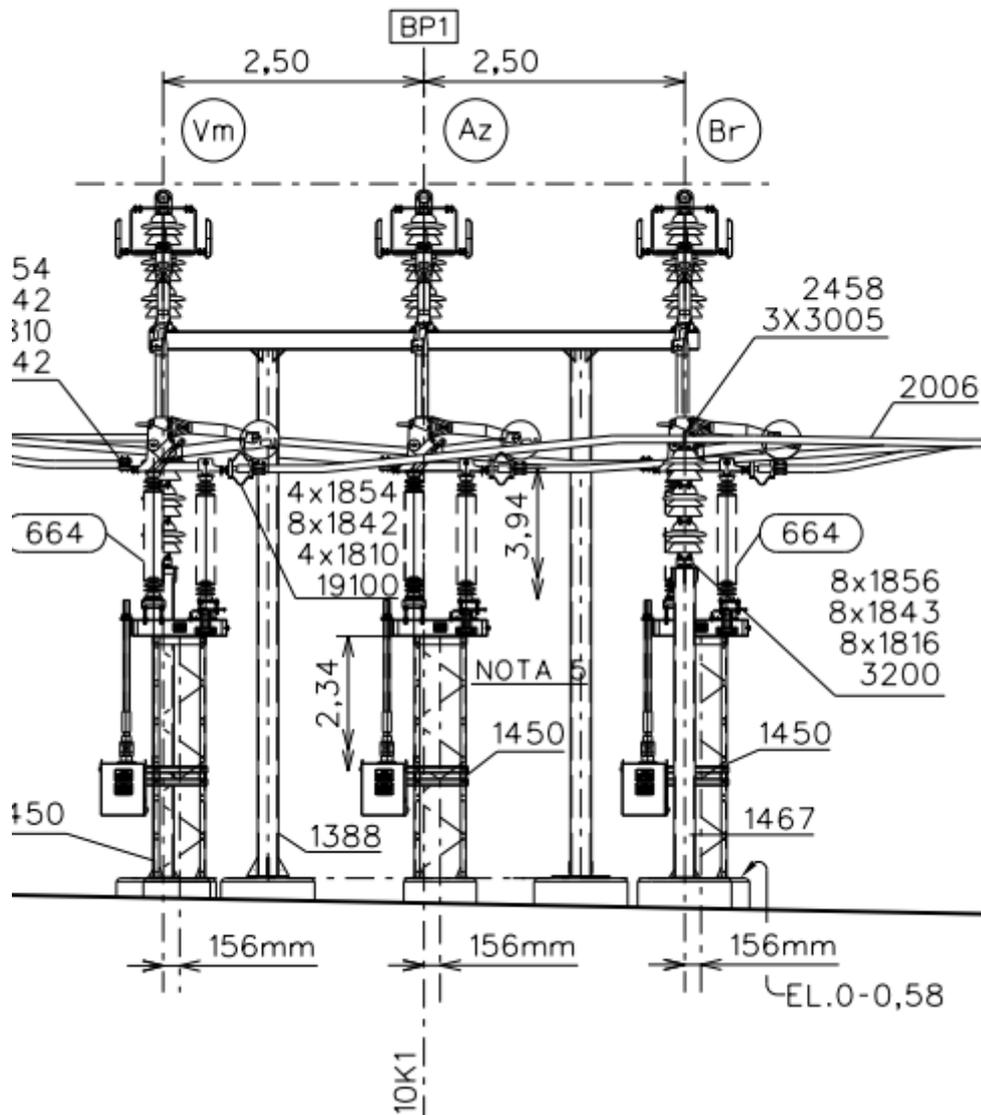


Figura 19 – Afastamento entre fase-fase no pátio 138 kV da SE Pimenta 345/138 kV

3.3 Distâncias de Segurança

Assim como na análise das distâncias elétricas para evitar possíveis curtos circuitos fase-fase ou fase-terra, é preciso garantir também distâncias de segurança para permitir as atividades necessárias durante o funcionamento da SE, como serviços de manutenção e acesso de veículos.

Em EAT a segurança do pessoal normalmente é assegurada pelo afastamento das partes vivas em relação ao solo. O afastamento entre o solo e as partes energizadas dos barramentos e equipamentos deve permitir a livre movimentação dos técnicos de manutenção, considerando a envoltória das posições ocupadas, levando-se em conta braços estendidos e ferramentas portadas. Desta forma, o afastamento mínimo a ser adotado deve ser maior que o alcance de um homem mais a separação entre fase e terra. Em algumas áreas do pátio da SE também é necessário considerar o acesso de veículos, para auxiliar as atividades de manutenção.

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em seus critérios de projetos estabelece na Tabela 3, a altura mínima para as estruturas suporte para barramentos e equipamentos, e as distâncias mínimas entre as partes energizadas de barramentos ou equipamentos e o solo.

Tensão (kV)	Distancia (m)	Altura minima do Suporte
13,8	3,00	2,05
23	3,00	1,05
34,5	3,00	2,50
69	3,40	2,50
138	4,40	2,34
161	4,40	2,34
230	4,40	2,34
345	5,80	2,34
500	8,00	2,34

Tabela 3 – Distâncias de segurança

Visando a uniformização das estruturas a serem utilizadas para instalação dos equipamentos, as concessionárias de energia padronizam o projeto de suas estruturas suportes. No patio de tensão 138 kV, foi-se utilizado um suporte com exatamente a altura já determinada

na Tabela 3 de 2,34 metros e que quando somada com a altura do TC também respeitam a altura mínima total de segurança, como pode ser visto através da Figura 20 de parte do corte do arranjo a ser implementado na SE.

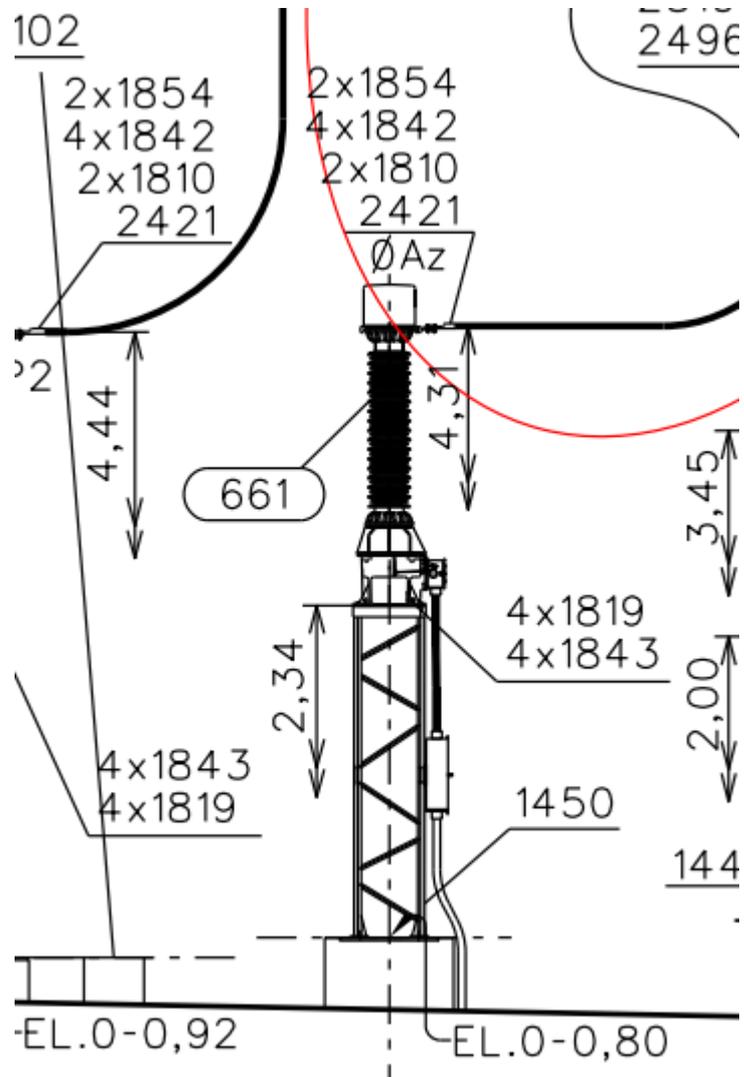


Figura 20 – Corte da SE com ênfase em um TC de 138 kV e sua Estrutura Suporte

Logo, é de suma importância analisar se a altura total, soma entre as alturas do equipamento e estrutura, atenderão as distâncias de segurança recomendadas. Caso a altura total em relação ao solo não entenda as distâncias recomendadas, é possível realizar a compensação na fundação para estrutura, alterando a mesma, até que se atenda as distâncias mínimas recomendadas.

3.4 Proteção Contra Incêndios

Nesta etapa do projeto são analisados os critérios que podem ser adotados para minimizar os riscos de incêndio em uma subestação. A NBR 13231 estabelece os requisitos mínimos exigíveis para proteção contra incêndio em subestações elétricas de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. A aplicação desta norma em arranjos eletromecânicos tem como objetivo prever separação física entre equipamentos que apresentem considerável risco de incêndio e explosão, para as edificações do pátio e entre equipamentos da subestação.

Em EAT os equipamentos que apresentam considerável risco de incêndio e explosão, são transformadores e reatores. Estes equipamentos considerados críticos na análise de risco de incêndio, devem atender às condições de isolamento e separação de riscos de incêndio previstas na norma, de modo a prevenir que a falha de um equipamento provoque incêndio às edificações ou equipamentos adjacentes. A NBR 13231 define o termo “separação de riscos de incêndio” como sendo os recursos que visam separar fisicamente edificações ou equipamento, que podem ser feitas através de [20]:

- a) Áreas livres.
- b) Barreiras de proteção.
- c) Anteparos e/ou paredes de material incombustível.

Desta forma, visando minimizar custos e espaço, este risco é controlado construindo paredes de material incombustível entre transformadores e reatores atendendo as mínimas distâncias de afastamentos previstas na norma. Estas paredes também são chamadas de parede corta-fogo (PCF). A norma determina que a PCF deve ser resistente ao fogo por 2 horas e atender aos seguintes requisitos, referentes a sua dimensão [20]:

- a) Dimensão estendida de 0,3m (altura) e 0,6m (comprimento), além dos componentes do transformador.
- b) Distância livre mínima de separação física de 0,5m entre a parede e o equipamento protegido.

Na figura 21, podemos ver o projeto da parede corta-fogo projetada para proteção das fases do novo banco de transformador a ser instalado na SE Pimenta.

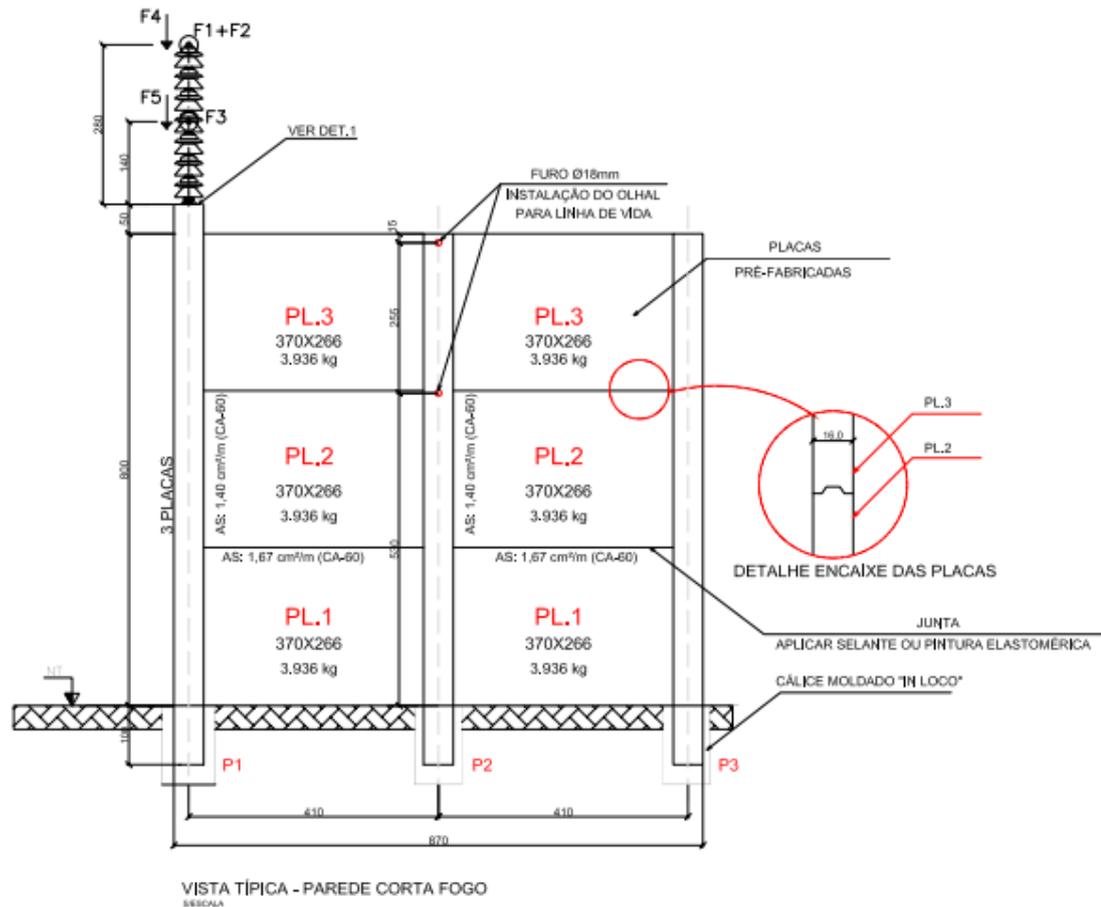


Figura 21 – Projeto PCF para Banco de Transformadores SE Pimenta 345/138 kV

Na figura 22, podemos ver as fundações do novo banco de transformadores sendo realizadas para criação da nova entrada de Linha e com os espaçamentos adequados para instalação das PCF's.



Figura 22 – Fundação dos Banco de Transformadores SE Pimenta 345/138 kV

3.5 Definição das estruturas suportes

Nesta seção são abordados os principais critérios a serem considerados na escolha do tipo de estrutura a ser utilizada. A escolha do tipo de estrutura mais adequada para construção da SE pode gerar economia de custo e prazo de forma significativa, e mesmo assim, é algo que constantemente passa de forma desapercibida na elaboração do projeto.

A finalidade das estruturas e suportes dentro de uma subestação é a de sustentar os equipamentos, tubos de alumínio dos barramentos rígidos e os cabos dos barramentos flexíveis de alumínio, mantendo um afastamento seguro do solo a fim de evitar a ocorrência de curto-circuito entre fases, e entre as fases e a terra como já foi explicado anteriormente.

Concreto e aço galvanizado são os materiais mais utilizados na sua fabricação. Decidir qual material utilizar é fundamental para economia neste item. Existem ocasiões em que o concreto poderá ser o mais adequado, mas para as subestações de grande porte ou quando existe a perspectiva de ampliações futuras utiliza-se o metal.

3.5.1 Estruturas de Concreto

As estruturas de concreto são normalmente fabricadas pela obra, o que não ocorre com os pórticos em função da maior responsabilidade e dos estudos de cargas envolvidos. Eles podem ser concretados no local, ou pré-moldados em canteiros montados especialmente para esta finalidade na obra. O segundo processo apresenta como vantagens menores custos e maior velocidade de produção. A opção entre os processos deve levar em conta a qualidade de suportes a serem fabricados, o prazo, o consumo de material e mão de obra envolvida.

Na SE Pimenta não estão sendo utilizados nenhum tipo de estrutura de concreto por ser uma obra de reforma e melhorias tornando o prazo curto. Estes tipos de estruturas demandam um maior tempo de produção e transporte, assim em obras deste tipo, costumam não ser muito recomendadas para que não ocorram atrasos e a Concessionária, no caso a CEMIG, não fique prejudicada nos seus devidos tempos de energização e deserregização e venha a causar multas e danos pela falta de energia em determinados locais alimentados pela SE.



Figura 23 – Estruturas de Concreto para equipamentos e barramentos flexíveis

3.5.2 Estruturas de Aço Galvanizado

Em subestações elétricas, as estruturas e suportes metálicos são fabricados em chapas de aço galvanizadas a quente e aparecem sob a forma de três projetos:

- Treliça.
- Perfil metálico.
- Tubular.

A estrutura treliçada é a mais usual e aplicada em subestações elétricas. Sua forma construtiva é basicamente formada por uma série de chapas dobradas aparafusadas, formando uma série de ângulos, de tal forma que os vãos sem apoio entre os parafusos, são bastante curtos. É mais leve e resistente que a estrutura em perfil metálico, necessitando porém, muito mais porcas, arruelas, parafusos, tempo e mão de obra para a sua montagem.

Na Figura 24, podemos identificar o projeto de estruturas treliçadas do tipo EG-3 para para-raios adquiridos e que estão em processo de aprovação na CEMIG. Estas estruturas são usadas para atingir as alturas mínimas padronizadas e para que os custos de fabricação dos equipamentos sejam minimizados visto que os materiais das estruturas metálicas são bem mais baratos que montar equipamentos com alturas maiores.

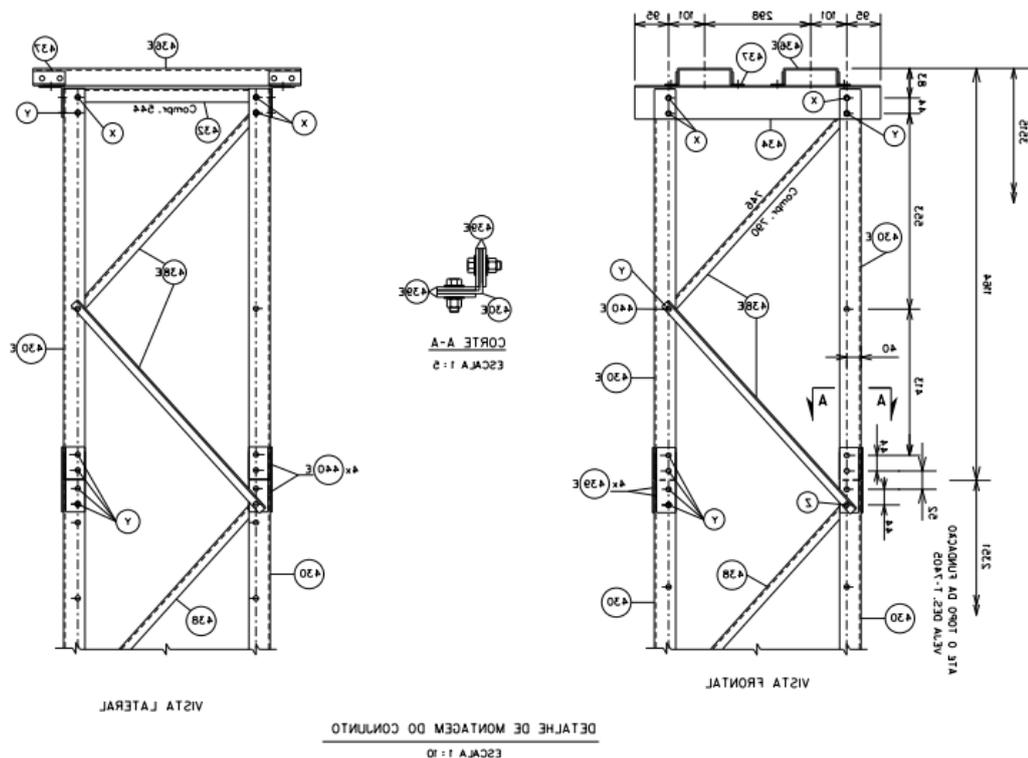


Figura 24 – Estrutura treliçada para suporte EG-3 de Para-Raios

3.5.3 Requisitos

Após a escolha do tipo de estrutura a ser implantada, é feita uma compatibilização das mesmas com os equipamentos que serão adquiridos, para se verificar os requisitos mínimos exigidos para as estruturas, checando-se:

- a) As dimensões dos furos e espaçamento entre eles, necessários para fixação dos equipamentos.
- b) Os esforços elétricos e mecânicos requeridos pela operação do equipamento, peso, curto circuito, vento.
- c) Possíveis interferências para acesso dos dutos às caixas de terminais dos equipamentos.
- d) Possibilidade de fixação de caixas de concentração na estrutura.
- e) Manutenção do padrão de estruturas existentes, caso seja ampliação de uma SE, atentando para os requisitos citados anteriormente.

3.6 Locação das Edificações

Nesta etapa do arranjo são verificadas as necessidades de cada uma das edificações de apoio, e são feitas as locações das mesmas no pátio da SE, atendendo aos critérios propostos. Em SE's com boa disponibilidade de área, é usual locar casas de comando para abrigar painéis da subestação e edificações de apoio, para auxiliar todas as atividades necessárias ao funcionamento da SE, como operação e manutenção. Entre as edificações que são necessárias à uma subestação pode-se citar:

- a) Casa de comando.
- b) Casa de relé.
- c) Guarita.
- d) Oficinas e almoxarifados.

3.6.1 Casa de Comando

A casa de comando ou casa de controle, tem como função abrigar os painéis e cubículos necessários ao funcionamento da subestação. Também têm como finalidade, abrigar as salas para operação e comando remoto subestação. Deve ter o menor tamanho possível, compatível com o equipamento a ser alojado e com as funções a serem realizadas na mesma. Deve ser situada o mais central possível da SE, para minimizar a extensão dos circuitos de controle, proteção e medição, podendo haver ajustes para melhorar seu acesso ou evitar problemas de interferência elétrica. A Figura 25 exemplifica o posicionamento da casa de comando da SE Pimenta, sendo a mesma localizada próxima ao centro da área utilizada.



Figura 25 – Vista aérea da Subestação

Como parte do Escopo 1 do anteprojeto de reforços e melhorias na SE Pimenta, estão sendo implantados uma nova entrada de linha e novos equipamentos que antes não existiam, fazendo-se necessário uma ampliação da casa de comando para locação dos novos painéis de supervisão e controle dos equipamentos e consequentemente da Linha pelo Operador Nacional

do Sistema. Na figura 26, observa-se pela parte amebada, a ampliação da casa de controle existente para locação dos novos painéis:

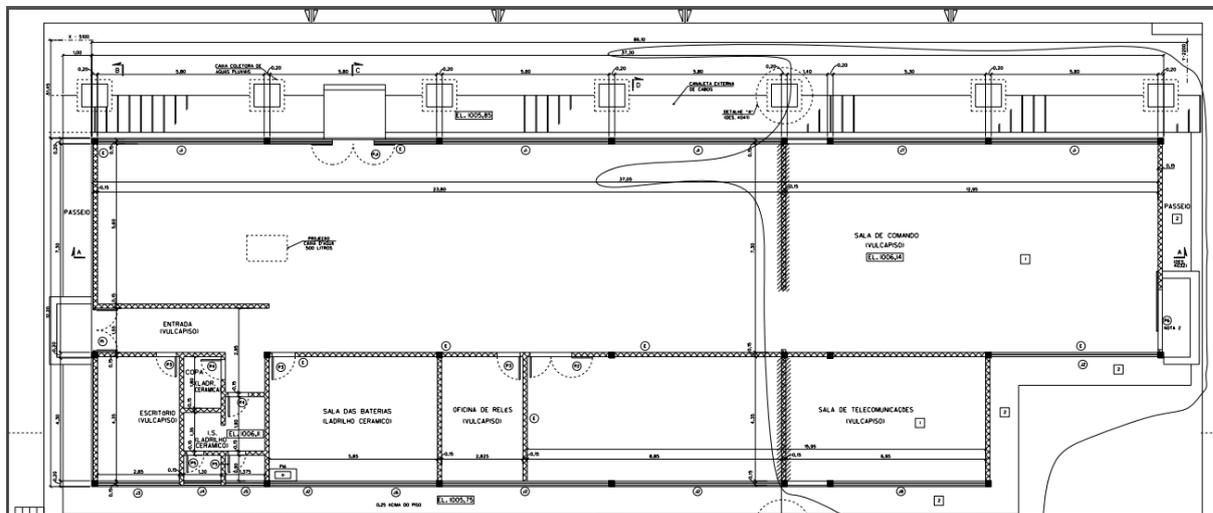


Figura 26 – Ampliação casa de comando

O Escopo 1 do anteprojeto de reforços e melhorias na SE Pimenta, representa um dos maiores escopos e um dos principais para ampliação da SE pelo fato de uma Linha nova estar sendo implementada, e se fazendo necessário uma grande ampliação da Casa de Comando.

3.6.2 Oficinas Almojarifado

No caso das subestações situadas distantes dos centros de manutenção de suas respectivas concessionárias, algumas vezes verifica-se a necessidade de locar edificações de apoio, como almojarifados e oficinas, para permitir atividades de manutenção, pequenos reparos e abrigo para sobressalentes. Em caso de defeito, os equipamentos de EAT dificilmente podem ser consertados no local, requerendo-se então a substituição dos componentes danificados por sobressalentes.

Os fatos acima expostos acarretam na racionalização dos serviços de manutenção, deixando a cargo dos operadores da subestação substituições rotineiras e rápidas de materiais simples, que não requerem técnica ou cuidados especiais (lâmpadas, fusíveis de BT). A reserva adequada destes materiais e atividades de manutenção são realizadas nestas edificações.

Estas edificações são comumente locadas próximo ao acesso da subestação e das vias principais de circulação, para limitar o tráfego de pessoas e veículos. Para subestações de menor porte, o almoxarifado e a oficina poderão ficar adjacentes ou incorporadas à casa de comando.

3.6.3 Guarita

São necessárias em SE's muito extensas, em que o portão de acesso à subestação fica distante da casa de comando. Tem como função controlar o acesso à subestação. Neste caso, a guarita normalmente será locada adjacente à entrada principal da SE, no lado interno da cerca. Deve ter condições de alojar o serviço de vigilância da subestação, sendo dotada de instalações sanitárias e de meios de comunicação com a casa de comando e com a rede telefônica local.

3.6.4 Casa de Relés

São construídas em subestações muito extensas, geralmente de 500kV ou acima, quando é verificada a necessidade de se descentralizar os painéis de proteção a fim de reduzir as cargas de TP's e TC's e os problemas de indução e interferência nos cabos de controle. Devem ser projetadas de forma simples e funcional, por se tratar de edificações sem áreas específicas de ocupação humana, contendo, normalmente, a sala de relés e a sala de baterias, requerendo apenas um andar. Havendo menor quantidade de cabos que na casa de controle, estes podem ser acomodados em canaletas, dispensando-se a sala de cabos em nível inferior.

Os critérios utilizados para as casas de relés são semelhantes aos critérios para as casas de comando, devendo ter o menor tamanho possível, compatível com o equipamento a ser alojado e com as funções a serem realizadas na mesma. Deve ser situada, quando possível, próxima ao baricentro da SE, para minimizar a extensão dos circuitos de controle, proteção e medição, podendo haver ajustes para melhorar seu acesso ou evitar problemas de interferência elétrica.

3.7 Barramentos rígidos e flexíveis

Transformar um diagrama elétrico em um arranjo físico é uma tarefa complexa. Os barramentos são uma parte fundamental deste processo para permitir o fluxo de energia pela subestação. Eles podem ser do tipo rígido ou flexível, ambos os tipos apresentando vantagens e desvantagens. Para SE's de EAT é, geralmente, vantajosa a conjugação dos dois tipos.

Nesta etapa do projeto é feita a escolha dos locais onde os mesmos serão aplicados, avaliando-se os prós e contras para se fazer a melhor escolha para cada tipo de situação, buscando-se sempre a otimização da área utilizada e das estruturas suportes que serão necessárias.

A complexidade dos cálculos e das etapas envolvidas nos dimensionamentos dos barramentos, inviabilizam a abordagem do mesmo neste trabalho, sendo necessário um estudo detalhado para esta abordagem. As vantagens e desvantagens de cada tipo de barramento, e os critérios para escolha serão apresentadas a seguir.

3.7.1 Barramentos rígidos

Frequentemente utilizado para barramentos principais, que ficarão em nível inferior e para trechos de alta corrente onde não seja prático o uso de condutor flexível. Os condutores rígidos levam vantagens sobre os condutores flexíveis nos seguintes aspectos:

- a) Suportam melhor as solicitações térmicas, de vento, e curto circuito.
- b) Solicitam menor esforço, peso e fundação das estruturas suporte.
- c) Permitem expansões e modificações, que não exigem estruturas de grande porte e podem ser facilmente cortados e emendados.
- d) Facilidade de inspeção, por ser comumente instalado a menor distância do solo.
- e) Exigem menor área ocupada e altura das estruturas, por ter menor deflexão.

Na Figura 11 apresentada em capítulos anteriores, pode-se identificar a utilização de barramentos rígidos para conexão das chaves semi-pantográficas de alcance vertical ao barramento do arranjo. Sua utilização possibilitou a menor utilização do espaço, além de permitir modificações e expansões que estão previstas para a SE.

A construção de barramentos rígidos requer algumas peculiaridades, podendo-se citar:

- a) Utilização de coluna de isoladores para garantir o isolamento entre o barramento energizado e a estrutura suporte (Figura 11).
- b) Tampões anti-coronas nas extremidades, para amenizar os efeitos do campo elétrico nas extremidades do barramento.
- c) Conexões soldadas ou aparafusadas para a união entre os tubos.
- d) Fixação dos barramentos rígidos das colunas de isoladores, utilizando-se anéis anti-coronas e conectores que permitem o travamento, movimentação ou expansão dos tubos.

Para implantação da nova Linha, uma extensão do barramento rígido já existente no patio 138 kV será realizada de acordo com a Figura 27.

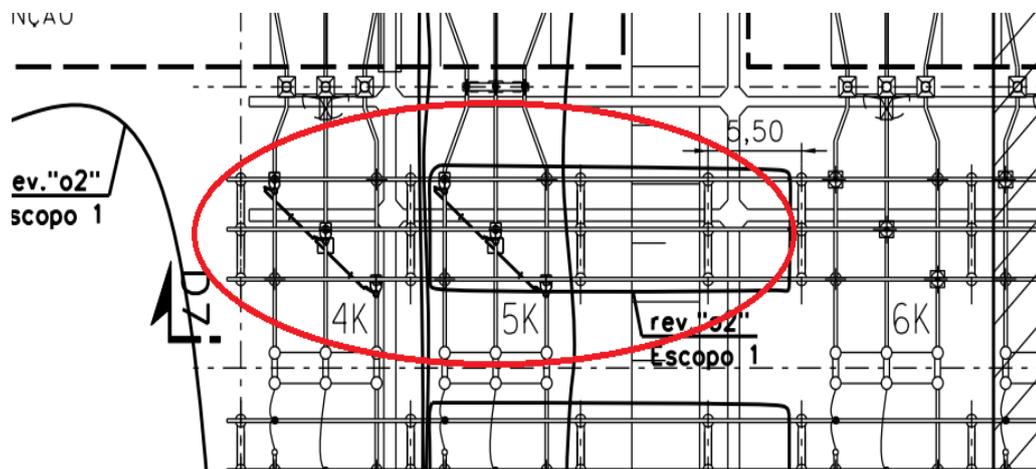


Figura 27 – Extensão Barramento existente

Esta extensão do barramento permitirá a união do patio de 138 kV a nova Linha e manobras de carga dentro da subestação através do fechamento de disjuntores e chaves, aumentando assim a capacidade de potencia da Subestação de Pimenta e minimizando as falhas de alimentação de cargas das Linhas. Usualmente, as configurações de barras das subestações são sempre feitas através de barramentos rígidos.

3.7.2 Barramentos flexíveis

São utilizados para ligações em níveis superiores, como pode ser observado na Figura 28 para interligar equipamentos e ou saídas de LT's, que podem vencer vãos longos, para

ligações muito curtas e conectar barramentos que estão em níveis diferentes. levam vantagens sobre os condutores rígidos nos seguintes aspectos:

- Número menor de caminhos de fuga para a terra, por ter menor número de isoladores em lances longos.
- Facilidade na construção, pelo fato de condutores rígidos solicitarem número maior de estruturas e fundações, maior cuidado no alinhamento e execução das soldas.

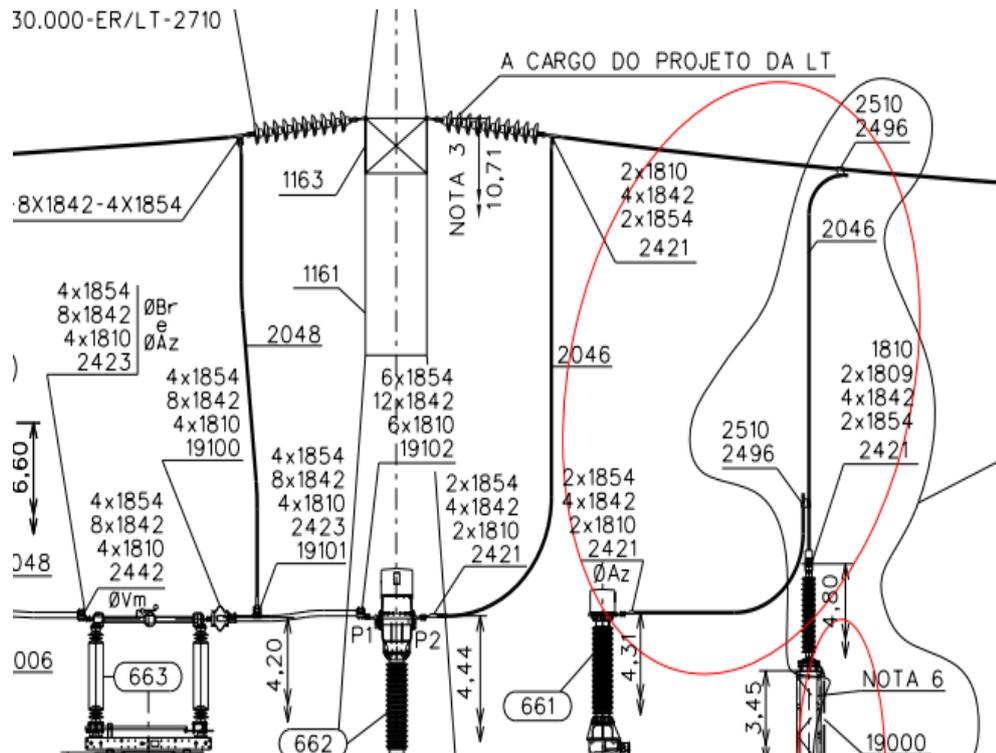


Figura 28 – Barramentos Flexíveis

Estes barramentos são utilizados em grande maioria para realizar jumpeamentos dos barramentos aéreos (que também são considerados Barramentos Flexíveis, porém pelo fato de serem utilizados em LT's levam esse nome) para equipamentos em solo ou como forma de interligação entre os próprios equipamentos.

4 Conclusão

Neste trabalho, buscou-se abordar de uma forma geral as etapas envolvidas na elaboração do arranjo físico para uma subestação, onde foi mostrado a evolução do projeto até a fase de execução. Apresentou-se os principais aspectos a serem discutidos na concepção do

projeto. Foi também usado fotos e exemplificações da obra em andamento na SE Pimenta 345/138 kV para contextualizar o conteúdo abordado e ajudar na explicação dos mesmos

Mostrou-se a complexidade na montagem de uma subestação e todos os critérios que devem ser analisados do início ao fim, lembrando que a demanda energética de Minas Gerais e do Brasil como um todo está sempre em ascensão, e que no futuro pode ser que a SE construída precise passar por reformas para melhorar o funcionamento da mesma e a uma melhor integração do Sistema de rede básica do Brasil.

Ficou bastante claro que hoje as reformas pela qual a SE analisada passa, só está sendo possível graças a um bom planejamento do Arranjo quando foi realizada sua construção. Em contato com a obra é fácil perceber locais reservados especialmente para possíveis ampliações e pontos onde as fundações de equipamentos e estruturas de suporte já estão prontas desde o início da sua construção para possíveis ampliações futuras.

O trabalho foi feito tendo como base os projetos e contatos com diferentes obras em andamento. Pelo fato da obra ter iniciado por volta de Setembro de 2018 e ter previsão de término em meados de 2025, não foi possível entrar em contato com muitas situações práticas sobre a troca de equipamentos, inspeções dos mesmos, inserção das novas linhas, etc.

Para levantamentos de informações no tocante a construção de uma arranjo de uma SE, conclui-se que um arranjo físico bem elaborado permite uma boa economia de custos, alta confiabilidade do Operador do Sistema, alta segurança para os trabalhadores e pessoas envolvidas nas obras e no controle da Subestação, otimização do tempo que também leva a uma economia de custos para concessionária e construtora e boa operacionalidade para que além da segurança, os trabalhadores possam manusear e trabalhar nas instalações da SE sem maiores dificuldades.

SE's são instalações cuja vida útil prevista pode variar entre 25 e 50 anos, e para que esta longevidade seja possível é de fundamental importância que a subestação possa operar e funcionar sem nenhuma restrição. Neste contexto, nota-se a relevância de um arranjo físico corretamente dimensionado, otimizado e que requer mínima utilização dos recursos.

Contudo, assim como ocorre em alguns setores da indústria, a construção e as ampliações das subestações são bastantes práticos e não puramente teóricos, onde é muito comum que estes conhecimentos fiquem restritos às empresas e profissionais que atuam nesta área. Desta forma, os temas abordados neste trabalho que de alguma forma não foram detalhados, poderão vir a ser complementados em publicações futuras, à medida em que estudos sobre o tema são realizados de forma aprofundada e divulgados amplamente.

O presente trabalho servirá como consulta para elaboração de arranjos físicos para subestações elétricas isoladas a ar em extra alta tensão, possibilitando ao projetista realizar um confronto das vantagens e desvantagens sobre as decisões que poderão ser tomadas durante a elaboração do projeto, bem como das possibilidades de otimização do projeto e dos aspectos de segurança e confiabilidade a serem analisados.

Ao longo do processo, uma das principais dificuldades encontradas foram de superar questões burocráticas que Concessionária impõe sem perder o prazo estipulado para obra. O cronograma de execução é constantemente revisado e é considerado uns dos pontos principais na execução da obra, pois será ele que possibilitará todo o planejamento da obra e seus possíveis respectivos atrasos, que é algo que tanto concessionária quanto construtora não desejam para a execução da obra pelo fato das multas exorbitantes geradas causadas pelos atrasos.

Na Figura 29 pode-se identificar os conceitos apresentados ao longo do trabalho e critérios envolvidos na elaboração de um arranjo sendo aplicados na configuração do arranjo da SE Pimenta.

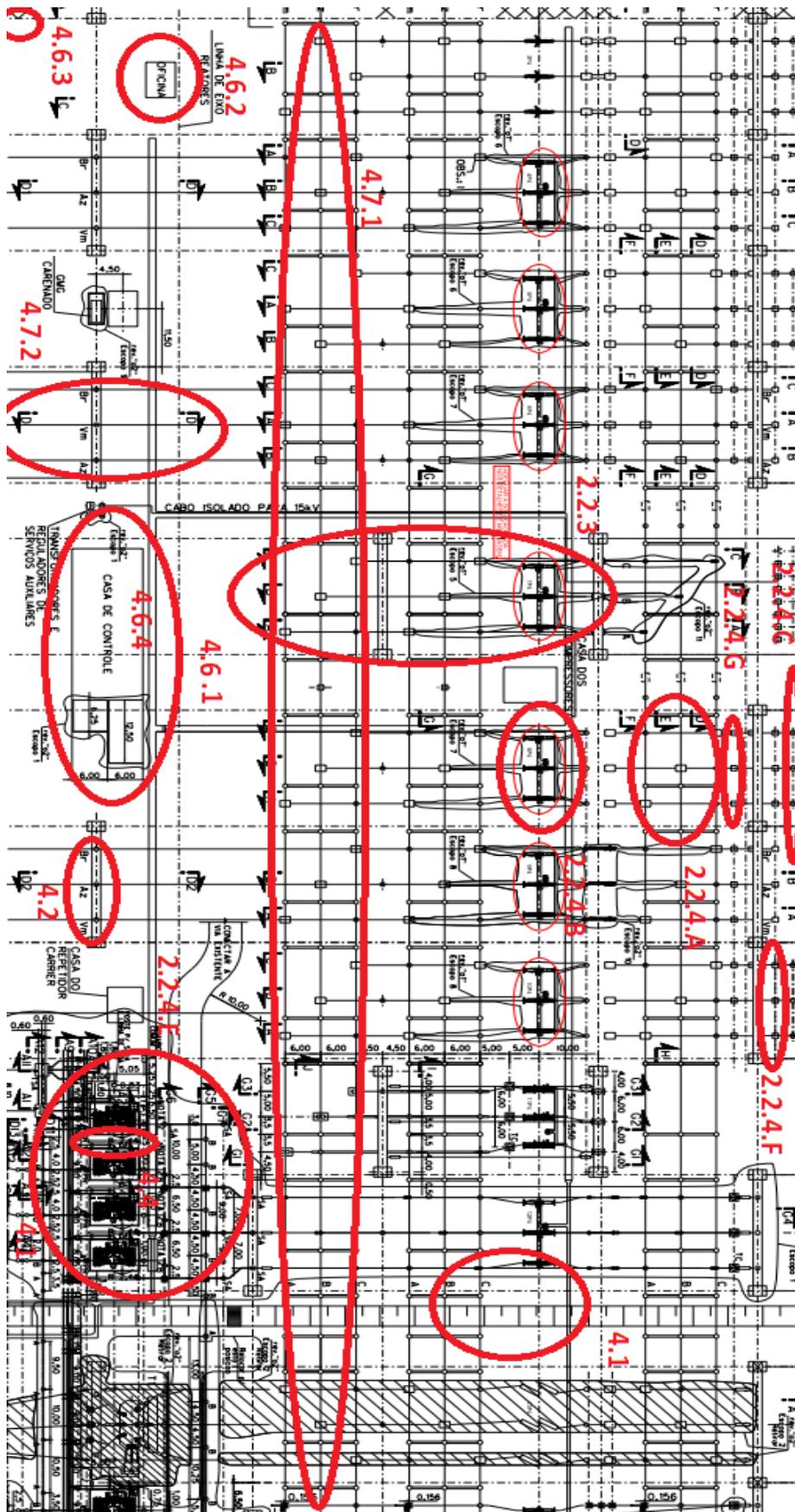


Figura 29 – Arranjo SE Pimenta 345/138 kV

Referências Bibliográficas

- [1] ONS – Operador Nacional do Sistema. **Módulo 2 (submódulo2.3) dos Procedimentos de Redes–Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações**. Rio de Janeiro, RJ, versão 2.0-2011.
- [2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA/EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Brasília: MME/EPE, 2018.
- [3] ANEEL – **CONCEITUAÇÃO DA REDE BÁSICA E SUA COMPOSIÇÃO – Regulamento Referencia Nº 9** – Brasília, Julho de 1998
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL - **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 414, DE 9 DE SETEMBRO DE 2010**
- [5] ANEEL – **MÓDULO 3, ACESSO AOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO** – 03 de Junho de 2005.
- [6] IEC – International Electrotechnical Commission – **IEC 60038: Standard Voltages** – [S.l], julho de 2002.
- [7] GUSTAVO LUIZ, UFRJ – **SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS** – FEVEREIRO DE 2012
- [8] ENERGISA – **NTU-005.3-REV.2.0 – CRITÉRIOS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE SUBESTAÇÕES TIPO METROPOLITANA** – MAIO DE 2018
- [9] MCDONALD, JOHN D. – **“Electric Power Substations Engineering”**
- [10] MIGLIATO, L. F. S - **Análise de metodologia para otimização da tomada de decisão da configuração de barramento de subestações**. São Carlos, novembro de 2017.
- [11] AMPLA – **SUBESTAÇÕES DE 138;69 E 34,5 kV CRITÉRIO DE PROJETO** – RIO DE JANEIRO, JANEIRO 2010.

- [12] CEMIG Geração e Transmissão S.A - <https://gedex.cemig.com.br/> - **SISTEMA DE GESTÃO DE DOCUMENTOS** – 04 de Junho de 2019.
- [13] MEIRELES, D. - **Aplicabilidade De Subestações Compactas Isoladas A Gás Em Grandes Centros Urbanos: Proposta De Procedimento Aplicado À Expansão Do Sistema Elétrico**. Belo Horizonte, fevereiro de 2010.
- [14] CEMIG Geração e Transmissão S.A – **ANTEPROJETO Substituição do Transformadores T1 e T2 Reforços e Melhorias** – Pimenta , 27 de junho de 2017.
- [15] FURNAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – **Construção de subestações, Montagem Eletromecânica, Volume I**. Rio de Janeiro, agosto de 2006.
- [16] FURNAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – **Construção de subestações, Montagem Eletromecânica, Volume II**. Rio de Janeiro, agosto de 2006.
- [17] FURNAS - **Centrais Elétricas Brasileiras S.A.** – **Construção de subestações, Montagem Eletromecânica, Volume III**. Rio de Janeiro, agosto de 2006.
- [18] FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília, 2013.
- [19] ONS – Operador Nacional do Sistema. **SUBMÓDULO 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos**. Rio de Janeiro, Dezembro de 2016.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13231/2015, Proteção contra incêndio em subestações elétricas**, junho 2015.