

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Bruno Gomes Aranha

**Gerenciamento de projetos de subestações de alta tensão em parques eólicos:
Estudo de caso**

Ilha Solteira
2022

BRUNO GOMES ARANHA

**Gerenciamento de projetos de subestações de alta tensão em
parques eólicos: Estudo de caso**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharelado em
Engenharia elétrica.

Nome do orientador

Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A662g Aranha, Bruno Gomes.
Gerenciamento de projetos de subestações de alta tensão em parques
eólicos: estudo de caso / Bruno Gomes Aranha. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
130 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro
Inclui bibliografia

1. Gerenciamento de projetos. 2. Gestão. 3. Subestação. 4. Alta tensão. 5.
Transmissão de energia elétrica. 6. Parques eólicos.

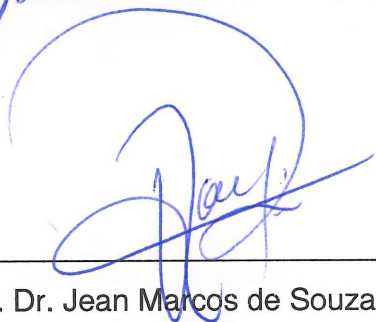

Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e oito dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois, o discente Bruno Gomes Aranha, matriculado sob o nº142054046, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, o Prof Dr Júlio Borges de Souza e o Doutorando Bruno Sereni, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Gerenciamento de projetos de subestações de alta tensão em parques eólicos: Estudo de caso**" obtendo a nota 9,5 (NOVE E MEIO) e conceito

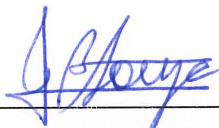
Aprovado.



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador-



Bruno Gomes Aranha
- discente-



Prof Dr Júlio Borges de Souza
- Membro da Banca -



Doutorando Bruno Sereni
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, que sempre se mantiveram fortes e apoiadores em toda minha vida e em minha evolução acadêmica. Sem seus esforços, amor, carinho e suporte, jamais seria possível pleitear um título acadêmico em uma universidade renomada e completa como a que estive.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todas as pessoas que posso considerar como amigos de faculdade, que fizeram da jornada mais leve e prazerosa na qual compartilhamos ótimos momentos juntos. Em especial aos colegas Fernando Hiratsuka Estavare e Marcos Henrique do Nascimento Sousa, que mesmos nas horas de maior volume de atividades e responsabilidades, sempre dedicaram seu tempo a um amigo com dificuldades e tornaram este meu momento possível, em meio aos diversos obstáculos.

Agradeço aos esforços dos professores, que continuamente e sabiamente seguem a jornada da educação e formam os profissionais do futuro em meio aos muitos problemas na educação brasileira.

Deixo também um grande agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, que me acompanha desde o início de minha busca pelo sucesso no mercado de trabalho e pelo apoio em todos os momentos desde então.

Um abraço a todos!

RESUMO

O trabalho proposto envolve as fases de concepção, execução e entrega de um projeto de uma subestação de alta tensão aplicada em um parque eólico, em modelo de empreitada global, em que a solução ao cliente é apresentada de forma completa. Para isso, serão apresentadas todas as etapas da construção de uma subestação, iniciando em sua fase de projeto e percorrendo pelas etapas de aquisição de equipamentos e materiais, obras civis, montagem eletromecânica de estruturas e equipamentos, comissionamento de pátio, cablagem, proteção, controle e telecomunicações da subestação, até o momento em que a obra se torna apta à energização visando redução de riscos e custos ao analisar o sequenciamento das atividades e estratégias de execução, sob os conceitos de gerenciamento e planejamento de projetos.

Palavras-chave: Gerenciamento de projetos, gestão, subestação, alta tensão, transmissão de energia elétrica, planejamento, gestão de tempo, gestão de custos, gestão de escopo, análise de riscos, parques eólicos, geração.

ABSTRACT

The proposed work involves the phases of conception, execution, and delivery of a project for a high voltage substation applied in a wind farm, in a “turn-key” model in which the solution is presented to the customer in a complete way. For this, all stages of the construction of a substation will be presented, starting in its design phase and going through the stages of purchasing and manufacturing of equipment and materials, civil works, electromechanical assembly of structures and equipment, commissioning of the yard, cabling, protection, control and telecommunications of the substation, until the moment when the work becomes suitable for energizing aiming at reducing risks and costs by analyzing the sequencing of activities and execution strategies, under the concepts of project management and planning.

Keywords: Project management, management, substation, high voltage, electricity transmission, planning, time management, cost management, scope management, risk analysis, wind farms, generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do sistema elétrico brasileiro.....	18
Figura 2 - Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro.....	18
Figura 3 - Capacidade instalada por fonte de energia no ano de 2017	19
Figura 4 - Capacidade instalada por fonte de energia no ano de 2021	20
Figura 5 – Sistema Interligado Nacional.....	21
Figura 6 – Arranjo geral de um parque eólico até sua integração com o SIN.....	22
Figura 7 – Modelo monofásico de parâmetros concentrados para Linhas de transmissão	23
Figura 8 - Corte de subestação isolada a ar AT/MT	26
Figura 9 – Diagrama unifilar do pátio em 500 kV de subestação isolada a ar	27
Figura 10 - Configuração em barra dupla com disjuntor e meio aplicada em SE 34,5/500 kV típica de parques eólicos	31
Figura 11 – Representação em diagrama unifilar de transformador com duplo secundário....	33
Figura 12 – Transformador 34,5/500 kV em operação.....	34
Figura 13 – Disjuntor à SF6 de alta tensão	35
Figura 14 – Mecanismo de autossopro para disjuntores AT	36
Figura 15 – Mecanismo de acionamento à mola para disjuntor de alta tensão	37
Figura 16 – Armário de comando e mecanismo de acionamento à mola para disjuntor de alta tensão	37
Figura 17 – Seccionador posicionado para isolamento de disjuntor	40
Figura 18 – Modelagem ilustrativa para Seccionador de Abertura Vertical.....	40
Figura 19 – Chave Seccionadora 500kV instalada em campo	42
Figura 20 – Chave Seccionadora 34,5kV instalada em campo	42
Figura 21 - Transformador de Corrente 500kV instalado em campo.....	44
Figura 22 – Transformador de Corrente 34,5kV instalado em campo	45

Figura 23 – Transformador de Potencial 500kV instalado em campo.....	46
Figura 24 – Transformador de Potencial 34,5kV instalado em campo.....	46
Figura 25 – Para-raio instalado em campo no setor de 500kV.....	48
Figura 26 – Para-raios instalados em campo no setor de 34,5kV.....	48
Figura 27 – Vista frontal de painel principal de proteção e controle para transformador de potência em testes	50
Figura 28 – Relé microprocessado Siemens modelo SIPROTEC 5	50
Figura 29 – Sala de painéis real de SE elevadora 34,5/500 kV aplicada a um parque eólico..	51
Figura 30 – Medidor de faturamento Schneider Eletric modelo ION 8650.....	52
Figura 31 – Painel de medição de faturamento	53
Figura 32 – Posicionamento do sistema de medição de faturamento no parque eólico	53
Figura 33 – Bobinas de bloqueio instaladas em suspensão.....	54
Figura 34 – Seção transversal de cabo OPGW.....	55
Figura 35 – Retificador tiristorizado para alimentação CC.....	56
Figura 36 – Banco de Baterias para alimentação CC instalado em campo.....	56
Figura 37 – Transformador de Serviço Auxiliar de pátio	57
Figura 38 – Transformador de Serviço Auxiliar instalado em rede de distribuidora local para alimentação na subestação.....	58
Figura 39 – Grupo motor-gerador com tanque externo instalado em subestação	58
Figura 40 – Painéis de Serviço Auxiliar CA e CC instalados em campo	59
Figura 41 – Pórticos metálicos do setor de 500 kV	60
Figura 42 – Pórticos de concreto do setor de 34,5 kV de uma SE aplicada em parque eólico	61
Figura 43 – Estruturas suportes para Chave Seccionadora 500 kV montadas em campo	61
Figura 44 – Formações para cabo de alumínio com alma de aço.....	62
Figura 45 – Cabo de alumínio em instalação em subestação para parque eólico.....	63
Figura 46 – Tubo de alumínio instalado em subestação para parque eólico.....	63
Figura 47 – Projeto de Conector de Alumínio.....	65

Figura 48 – Conectores instalados no setor de 34,5kV em subestação para parque eólico	65
Figura 49 – Isoladores de Pedestal em pátio de 500kV	66
Figura 50 – Isoladores de disco em pátio de 500kV	67
Figura 51 – Isoladores de disco associados às ferragens de fixação do barramento	67
Figura 52 – Cabos de força e controle 4x6mm ²	68
Figura 53 – Conector ST para fibra ótica.....	69
Figura 54 – Conector LC para fibra ótica	69
Figura 55 – Conector SC para fibra ótica.....	70
Figura 56 – Sequenciamento de execução da subestação	71
Figura 57 – Supressão vegetal	78
Figura 58 – Corte de solo	78
Figura 59 – Execução de aterro	79
Figura 60 – Platô concluído e liberado para demais atividades	79
Figura 61 – Execução de bacia de captação de óleo e base para Transformador 34,5/500 kV	80
Figura 62 – Locação de Fundação de Pórtico 500kV concluída	81
Figura 63 – Escavação de Fundação de Pórtico 500kV concluída.....	81
Figura 64 – Regularização de fundo de cava de Fundação de Pórtico 500kV concluído.....	82
Figura 65 – Instalação de armação de Fundação de Pórtico 500kV concluída	82
Figura 66 – Instalação de forma da base de Fundação de Pórtico 500kV aguardando escoramento.....	82
Figura 67 – Concretagem de Fundação de Pórtico 500kV em andamento	83
Figura 68 – Desforma de fustes de Fundação de Pórtico 500kV Concluída.....	83
Figura 69 – Reaterro de Fundação de Pórtico 500kV concluído.....	83
Figura 70 – Escavação de tubulão a partir de perfuratriz para fundação de pórtico de 34,5kV	84
Figura 71 – Drenagem de águas pluviais em execução	85
Figura 72 – Caixa separadora de água e óleo para transformadores em execução.....	86

Figura 73 – Meia-cana dos taludes	86
Figura 74 – Execução da fundação para parede corta-fogo pré-moldada	87
Figura 75 – Instalação dos pilares pré-moldados	87
Figura 76 – Içamento e encaixe das placas pré-moldadas	88
Figura 77 – Parede corta-fogo concluída	88
Figura 78 – Fundação da Casa de Comando	90
Figura 79 – Instalação de pilares pré-moldados da Casa de Comando.....	90
Figura 80 – Instalação de vigas pré-moldadas da Casa de Comando	90
Figura 81 – Execução de fechamento em alvenaria da Casa de Comando	91
Figura 82 – Casa de Comando concluída.....	91
Figura 83 – Escavação para instalação de canaletas.....	92
Figura 84 – Peças pré-moldadas para canaletas instaladas	92
Figura 85 – Canaletas concluídas e em recebimento de cabos de baixa tensão	93
Figura 86 – Muro de fechamento em execução.....	94
Figura 87 – Arruamento e britagem da subestação concluídos.....	94
Figura 88 – Chumbadores concretados junto à fundação de pórtico 500kV	95
Figura 89 – Pré-montagem de pórtico metálico para setor de 500kV	96
Figura 90 – Içamento, verticalização e montagem de trecho metálico de pórtico 500 kV	96
Figura 91 – Içamento, verticalização e fixação de pórtico 34,5 kV	97
Figura 92 – Pórtico 34,5kV em concreto com montagem em fase final.....	97
Figura 93 – Montagem de barramento do setor 500kV	98
Figura 94 – Montagem de barramento do setor de 34,5kV.....	99
Figura 95 – Montagem de Transformador 34,5/500 kV	100
Figura 96 – Montagem de Seccionadora 500kV	100
Figura 97 – Montagem de Disjuntor 500kV	101
Figura 98 – Montagem de equipamentos do pátio de 34,5kV.....	101

Figura 99 – Base metálica aguardando fixação de painel na casa de comando	102
Figura 100 – Escavação de vala e lançamento de cabo de cobre nu para malha de aterramento	103
Figura 101 – Molde para realização de solda exotérmica.....	103
Figura 102 – Solda exotérmica concluída.....	104
Figura 103 – Lançamento de cabos na canaleta de pátio	105
Figura 104 – Conectorização no armário de comando de equipamento.....	105
Figura 105 – Conectorização no painel na casa de comando.....	106
Figura 106 – Comissionamento local de equipamento	107
Figura 107 – Comissionamento de painéis a partir do sistema supervisorio	109
Figura 108 – Ciclo de vida de um projeto.....	110
Figura 109 – Conflito de interesses no gerenciamento de projeto	111
Figura 110 – Disciplinas de Gerenciamento de projetos	112
Figura 111 – Interdependência de atividades	114
Figura 112 – Probabilidade e custo de evento de risco ao longo do projeto em distribuição contínua.....	116
Figura 113 – Processo de aquisição para equipamentos de uma subestação	117
Figura 114 – Divisão de equipe usual para atendimento às disciplinas de gerenciamento de projetos.....	121
Figura 115 – Área da subestação após chuvas	124
Figura 116 – Fundação de pórtico 500kV alagada após chuva	125

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
STBD	Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Unesp	Universidade Estadual Paulista
SIN	Sistema Interligado Nacional
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
SE	Subestação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema
AEG	Aerogerador
RMT	Rede de Média Tensão
LT	Linha de Transmissão
FTTR	Função Transmissão Transformação
DJM	Disjuntor e Meio
TR	Transformador de Potência
kV	Quilovolts
MVA	Megavoltampere
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
NBR	Norma Brasileira
ONAN	Óleo Natural Ar Natural
ONAF	Óleo Natural Ar Forçado
Hz	Hertz
ms	milissegundos
TC	Transformador de Corrente

TP	Transformador de Potencial
SPCS	Sistema de Proteção, Controle e Supervisório
ANSI	American National Standards
OPLAT	Ondas Portadoras em Linha de Alta Tensão
OPGW	Optical Ground Wire
CC	Corrente Contínua
Vcc	Tensão em Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
TSA	Transformador de Serviço Auxiliar
AIS	Air Insulated Substation
TRT	Tensão de Reestabelecimento Transitória
NBI	Nível Básico de Isolamento
PMI	Project Management Institute
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
COVID-19	Corona Virus Disease 2019

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência ativa
V	Tensão
I	Corrente elétrica
R	Resistência elétrica
L	Indutância
C	Capacitância
k	Relação de transformação

SUMÁRIO

1. Introdução	17
1.1. Organização do Setor Elétrico Brasileiro	17
1.1.1. <i>Geração</i>	19
1.1.2. <i>Transmissão</i>	22
1.1.3. <i>Metodologia do estudo de caso</i>	23
2. Subestações de Alta Tensão Isoladas a Ar	26
2.1. Configuração do Barramento	28
2.2. Transformadores de Potência	32
2.3. Disjuntores	34
2.4. Chaves Seccionadoras	38
2.5. Transformadores de Corrente	42
2.6. Transformadores de Potencial	45
2.7. Para-raios	46
2.8. Sistema de Proteção, Controle e Supervisório	48
2.9. Sistema de Medição de Faturamento	52
2.10. Sistema de Telecomunicações	54
2.11. Serviços Auxiliares	55
2.12. Materiais de Montagem Eletromecânica	60
2.12.1. <i>Estruturas metálicas ou de concreto</i>	60
2.12.2. <i>Tubos e cabos condutores</i>	62
2.12.3. <i>Conectores</i>	64
2.12.4. <i>Isoladores</i>	66
2.12.5. <i>Ferragens de fixação de cadeia de isoladores de disco</i>	67
2.12.6. <i>Cabos de força e controle</i>	68
2.12.7. <i>Fibras ópticas</i>	68
3. Implantação	71
3.1. Especificações Técnicas, Projetos Executivos e Estudos Elétricos Básicos	72
3.2. Obras Civas	76
3.2.1. <i>Terraplenagem</i>	76
3.2.2. <i>Fundações</i>	80
3.2.3. <i>Drenagem</i>	85
3.2.4. <i>Parede corta-fogo</i>	86

3.2.5.	<i>Edificações</i>	89
3.2.6.	<i>Canaletas</i>	91
3.2.7.	<i>Urbanização</i>	93
3.3.	Montagem Eletromecânica e Elétrica	94
3.3.1.	<i>Montagem de Pórticos</i>	95
3.3.2.	<i>Montagem de Barramentos</i>	97
3.3.3.	<i>Montagem de Equipamentos</i>	99
3.3.4.	<i>Malha de aterramento</i>	102
3.3.5.	<i>Lançamento e Conectorização de Cabos de Baixa Tensão</i>	104
3.4.	Comissionamento	106
3.4.1.	<i>Comissionamento de Pátio</i>	107
3.4.2.	<i>Comissionamento de Cablagem</i>	108
3.4.3.	<i>Comissionamento dos Painéis</i>	108
4.	Gerenciamento de Projetos	110
4.1.	Escopo	112
4.2.	Custos	113
4.3.	Tempo	114
4.4.	Risco	115
4.5.	Aquisições	117
4.6.	Qualidade	118
4.7.	Integração.....	118
4.8.	Comunicação.....	119
4.9.	Recursos Humanos	120
5.	Resultados e Discussões	122
5.1.	Repetição de projetos de equipamentos	122
5.2.	Aplicação de disjuntores de alta tensão no pátio de 34,5kV	123
5.3.	Obras civis fora de época chuvosa.....	123
5.4.	Execução de parede corta-fogo antes da instalação dos transformadores 34,5/500 kV	125
5.5.	Montagem de barramentos aéreos antes dos equipamentos de alta tensão	126
6.	Conclusão	127
7.	Referências	128

1. Introdução

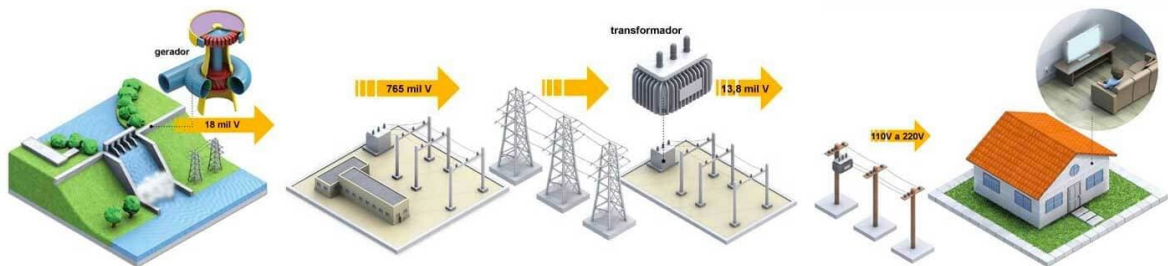
O setor elétrico brasileiro cresce constantemente, em paralelo com o crescimento do país, devido a este insumo ser de vital importância para o crescimento econômico e social de toda a população. Em linhas gerais, o sistema elétrico é composto pelas plantas de geração, linhas de transmissão, subestações e centros de distribuição, conforme presente adiante neste trabalho em mais detalhes, com exceção ao setor de distribuição. Para que tenhamos a possibilidade de um sistema nacional que seja interligado, se faz necessário que linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão e oriundas de diferentes pontos (tanto da geração como da distribuição) sejam coesas e, para este fim, temos as subestações, objeto do estudo.

Devido a transmissão de energia possuir intrínsecas necessidades de manobra e aumento recorrente de flexibilidade para o atendimento das demandas de carga de cada região, a interligação do sistema se torna cada vez mais complexa, utilizando variadas fontes de energia, bem como proporciona uma grande quantidade de combinações de diferentes caminhos de corrente elétrica por meio das linhas de transmissão. Com isso, o abastecimento de energia se torna cada vez mais completo, seguro, estável e confiável.

1.1. Organização do Setor Elétrico Brasileiro

A energia elétrica consumida em uma empresa ou residência depende de muitos outros agentes até seu efetivo consumo. O setor de geração inicia a cadeia, o setor de transmissão carrega essa energia por longas distâncias. Após as linhas de transmissão em conjunto às subestações elevadoras percorrerem todo o percurso anterior, temos a presença da subestação abaixadora. Nela, há uma redução do nível de tensão com o objetivo de distribuir a energia de forma mais confiável e segura aos consumidores finais do sistema. Devido às longas distâncias a serem percorridas pelas linhas de transmissão uma parcela da energia elétrica gerada é caracterizada como sendo as perdas do sistema, conforme será analisado adiante, sendo este um dos objetivos da implantação das subestações. Este arranjo, de forma macro, pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura do sistema elétrico brasileiro

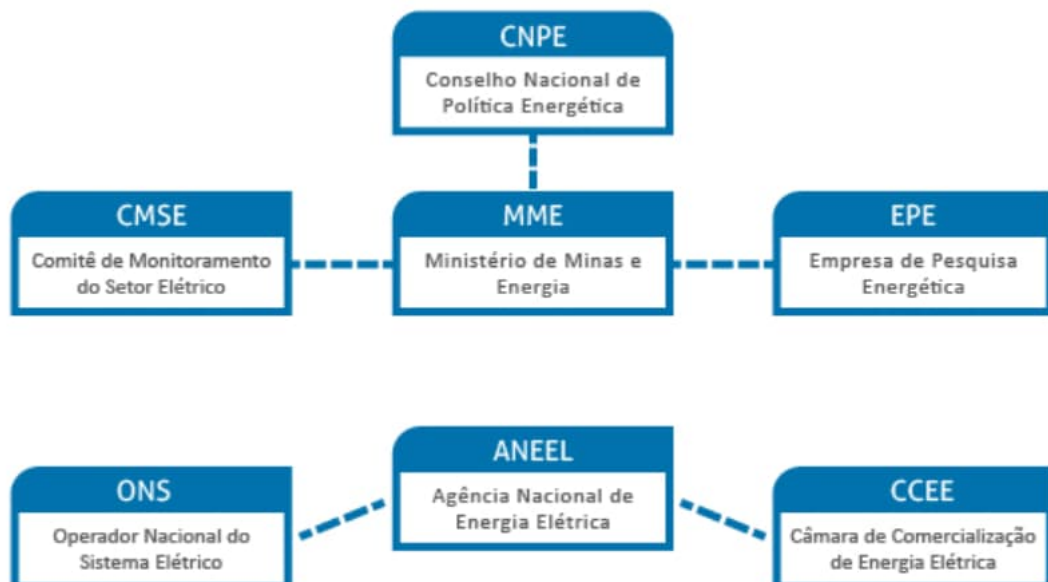


Fonte: (SCAPATICIO, 2016)

Na Figura 1, deve-se tomar como uma premissa que a imagem ilustra o sistema como sendo uma única cadeia. Contudo, o sistema se interliga por meio das linhas de transmissão, obtendo diversas rotas possíveis de escoamento da produção de energia.

Sendo o sistema elétrico um agente de enorme complexidade, se faz necessária a presença de agentes regulamentadores desse sistema, responsáveis, de forma geral, por sua integração, manutenção, operação, expansão e supervisão. No Brasil, tais agentes são parte do poder público e organizados, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro



Fonte: (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA, 2016)

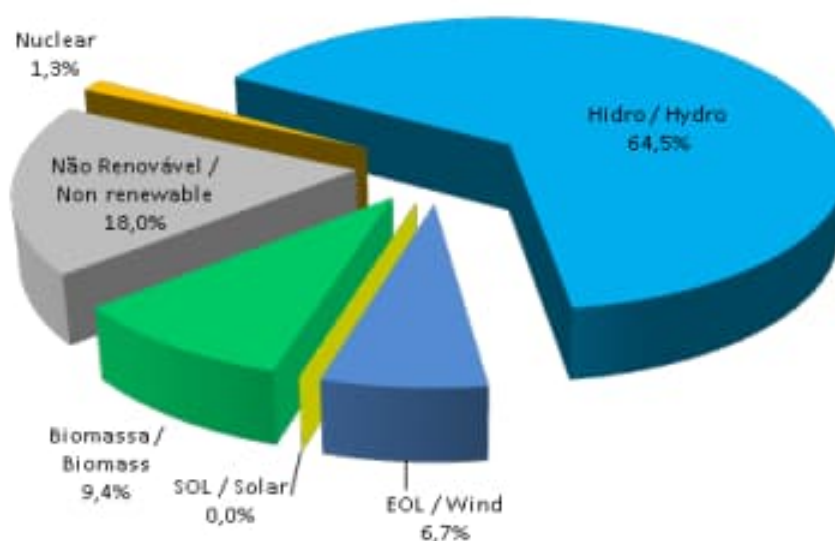
Ao considerar o mercado de execução, em modelo de empreitada global ou “turn-key”, de implantações de subestações elevadoras destinadas à geração de energia eólica, como o

objeto de estudo, as interfaces possíveis com tais agentes institucionais são direcionadas dentro deste mercado à ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, por meio dos leilões de concessão do setor de transmissão e também com o ONS, Operador Nacional do Sistema, no momento de comissionamento dos sistemas de proteção, controle e telecomunicações e durante a energização na entrada em operação comercial dos empreendimentos, devido às possíveis interfaces com o SIN, Sistema Interligado Nacional, cuja operação é de responsabilidade da ONS.

1.1.1. Geração

Inicialmente, na geração de energia, diversas fontes podem alimentar o sistema. A variedade dessas fontes é nomeada como matriz energética brasileira, sendo predominantemente renovável. Utilizando os dados de capacidade instalada e como base de análise o ano de 2017, tem-se a Figura 3.

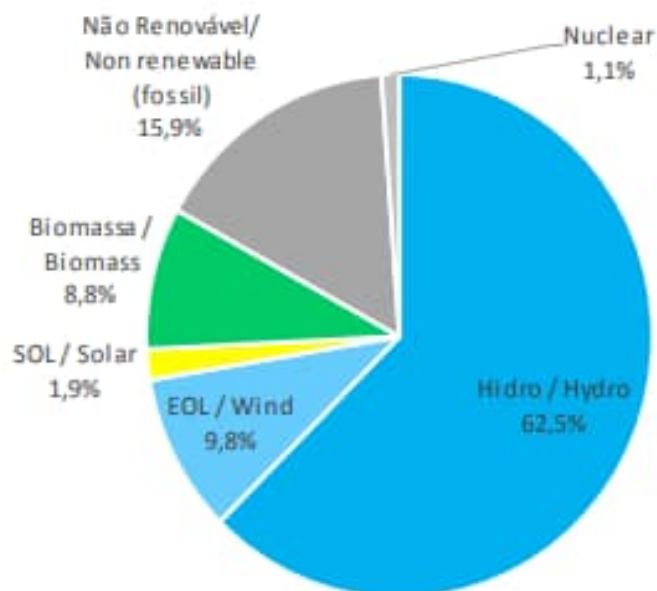
Figura 3 - Capacidade instalada por fonte de energia no ano de 2017



Fonte: (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2018)

Apesar de não ser a maior parcela instalada da geração brasileira, representando 6,7% da capacidade instalada do país em 2017, a energia eólica tem tomado cada vez mais força, principalmente na região nordeste do país, onde as características geográficas são favoráveis a essa forma de geração de energia renovável. O crescimento desta fonte de energia pode ser identificado no comparativo entre a Figura 3 e a Figura 4.

Figura 4 - Capacidade instalada por fonte de energia no ano de 2021

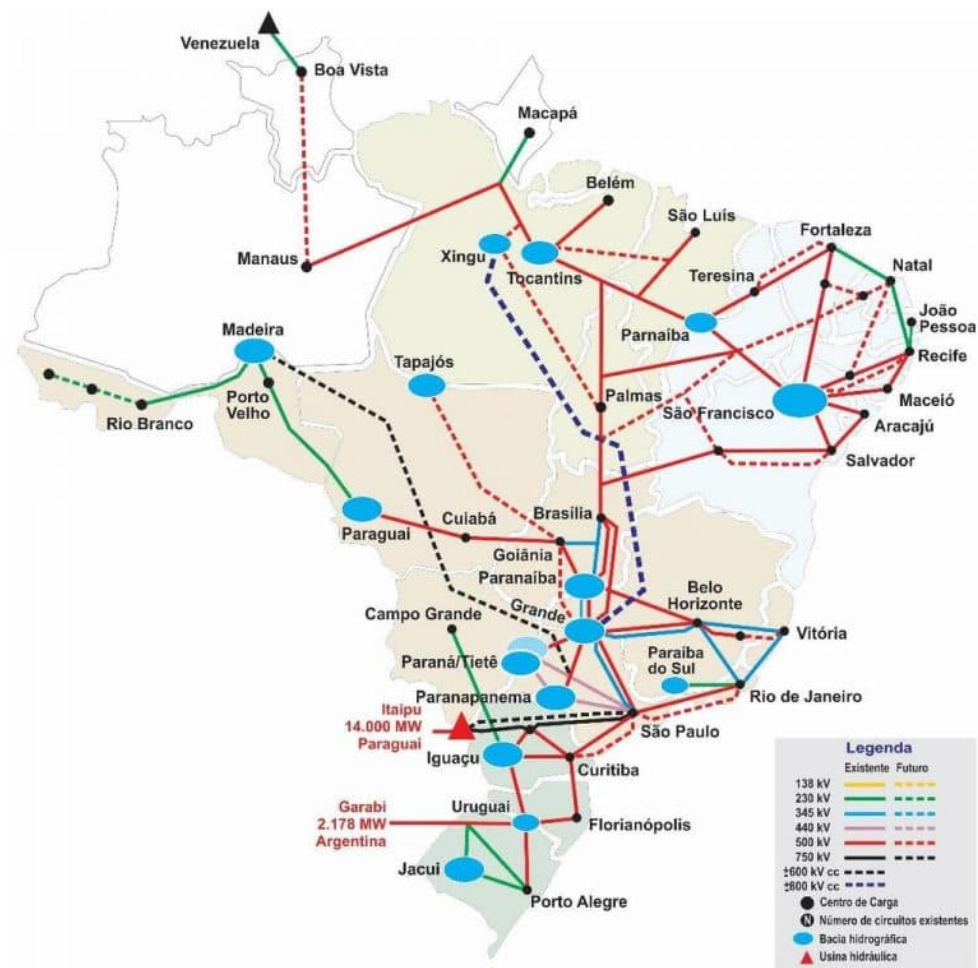


Fonte: (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2021)

Nota-se no comparativo entre as Figuras 3 e 4 um crescimento de 3,1% na presença de geração de fonte eólica no país nos últimos 4 anos em relação à toda matriz energética, sendo a taxa de crescimento atrelada somente a fonte eólica de, aproximadamente, 46%, o que evidencia o crescimento desta forma de geração de energia do país. O dado anterior ilustra também o potencial econômico, dado que o crescimento da geração eólica promove empregos diretos e indiretos no mercado de transmissão, devido aos recursos necessários desde a construção até a operação das subestações.

Com o intuito de gerar, escoar e faturar a produção de energia eólica, sua geração deve ser integrada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ONS, 2022). A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade (ONS, 2022). Dessa forma, tanto a geração quanto a transmissão estão presentes em um parque eólico. sistema O SIN pode ser ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 – Sistema Interligado Nacional



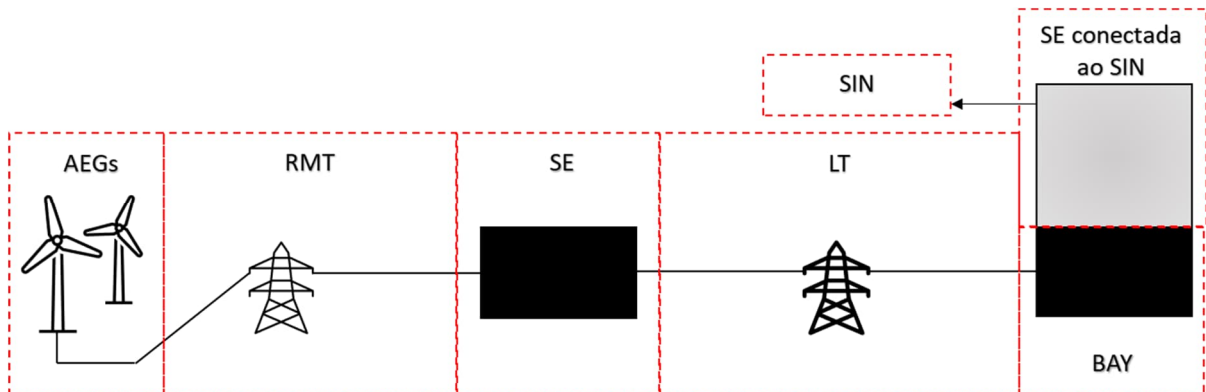
Fonte: (ONS, 2022)

No caso de um parque eólico, o sistema de geração e escoamento da produção até o SIN se dá por cinco agentes:

- AEGs - Geração dos aerogeradores (Setor de Geração)
- RMT - Rede de média tensão (Setor de Geração)
- SE - Subestação elevadora do parque eólico (Setor de geração e transmissão)
- LT - Linha de transmissão em alta tensão (Setor de transmissão)
- BAY - Vão de conexão da linha de transmissão com subestação existente integrada ao SIN (Setor de transmissão)

O posicionamento de instalação dos agentes supramencionados pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Arranjo geral de um parque eólico até sua integração com o SIN



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

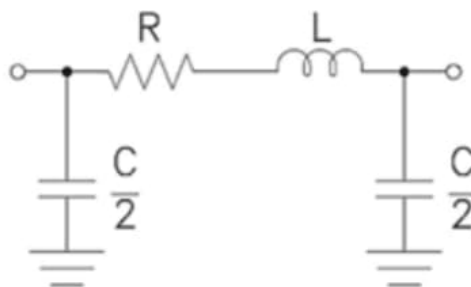
1.1.2. Transmissão

Tendo a geração de energia em vista, a produção oriunda dessa parcela do sistema elétrico é escoada dos locais de geração por meio de linhas de transmissão e subestações, elementos que caracterizam a transmissão de energia elétrica e integração entre a geração e distribuição para consumo. Para as subestações, existem duas classificações básicas: Subestação elevadora ou abaixadora. Esta classificação se dá devido às transformações de tensão presentes em cada tipo. No caso da subestação elevadora, há a conexão após a saída da geração e sua função é elevar a tensão nominal por meio de um transformador, incumbindo em redução da corrente nominal e esta conclusão é resultante da análise da equação 1 abaixo.

$$P = V * I \quad (1)$$

Sendo a potência ativa (P) constante na linha de transmissão em um cenário ideal, ao elevar a tensão (V) temos um decréscimo de corrente (I), para que a igualdade seja válida. No caso reverso, considerando um decréscimo de tensão, o efeito é o oposto, causando aumento na corrente. Utilizando um modelo monofásico de parâmetros concentrados em circuito π para representação da linha de transmissão, conforme Figura 7, temos uma forma simplificada (dentro às várias possíveis) de identificar e calcular a redução, por exemplo, de perdas ôhmicas na linha de transmissão neste processo.

Figura 7 – Modelo monofásico de parâmetros concentrados para Linhas de transmissão



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2021)

O parâmetro R , ilustra a resistência intrínseca ao condutor do cabo, L , a indutância do cabo, e C a capacitância. No caso do cálculo das perdas ôhmicas mencionadas anteriormente, é aplicável a lei de Joule sobre essa resistência, sendo possível quantificar as perdas por aquecimento, por exemplo.

Os benefícios agregados a esse processo de redução da corrente nas linhas de transmissão são, por exemplo, uma menor seção dos condutores, o que os tornam mais leves e mais baratos.

Além da redução das perdas no sistema, as subestações possuem a função de proteger e manobrar os elementos de transmissão. Embora operem em regime permanente em grande parte do tempo, os sistemas elétricos de potência devem ser projetados para suportar solicitações extremas de tensão e corrente (ARAÚJO E NEVES, 2005). Dentre os distúrbios possíveis do sistema, temos situações como a energização e religamento de linhas, ocorrência e eliminação de faltas, entre outros casos, que geram, esporadicamente, transitórios eletromagnéticos nas linhas de transmissão e nas subestações. Portanto, é função da subestação monitorar tais solicitações e com a utilização dos equipamentos instalados, adotar a contingência correta em cada caso.

1.1.3. Metodologia do estudo de caso

O estudo de caso consistiu no agrupamento de informações levantadas junto à profissionais experientes da área, a partir do acompanhamento de uma equipe real de gerenciamento de projetos de subestações aplicadas à parques eólicos e pesquisa bibliográfica.

É válido ressaltar o modelo de negócio de um projeto desta natureza. A empreitada global é uma forma de contratação de serviços e produtos, com o objetivo de executar o projeto por

completo, desde a sua concepção técnica até a entrega final. Portanto, todos serviços e produtos relacionados aos projetos executivos, equipamentos, obras civis, montagens eletromecânicas e elétricas, bem como comissionamento são contratados de uma única empresa.

As atividades foram acompanhadas por doze meses para o levantamento de informações e possíveis identificações de redução de custos e riscos em projetos dessa natureza. A busca consiste em encontrar tanto novas possibilidades de redução de risco e custos quanto práticas já adotadas pelo mercado.

O acompanhamento da equipe durante estes doze meses se deu em conjunto às fases de um projeto real executado por empresa privada do ramo de infraestrutura para subestações e fabricação de equipamentos de alta tensão. Apesar de doze meses aplicados, não houve o acompanhamento da fase de comissionamento da subestação, sendo os resultados procurados com ênfase nas fases de elaboração de projetos executivos, aquisições de suprimentos, planejamento do projeto e execução civil e montagens eletromecânicas.

As atividades de acompanhamento da equipe ocorreram durante estágio supervisionado, portanto, foram prestados serviços de auxílio para a equipe de projeto.

As atividades desenvolvidas e acompanhadas junto à equipe foram:

1. Elaboração, acompanhamento e atualização de cronograma executivo do projeto;
2. Participação em reuniões de coordenação e distribuição de atividades da equipe;
3. Diligenciamento de fornecedores;
4. Participação em reuniões de levantamento de lições aprendidas;
5. Participação em reuniões de atualização de status do projeto para o cliente;
6. Participação em reuniões de engenharia com cliente e fornecedores;
7. Participação em reuniões de acompanhamento de obra;
8. Participação em reuniões da equipe de compradores de materiais e equipamentos junto à equipe do projeto;
9. Aquisição de equipamentos e materiais sobressalentes;
10. Elaboração de materiais e participação em reuniões para apresentação de status do projeto à diretoria da empresa;
11. Participação em reuniões de levantamentos para contingenciamento de riscos;
12. Participação em reuniões de levantamento de projeções financeiras, fluxo de caixa e avanço de recebimento;

13. Visitas técnicas à obra de subestação para parque eólico em execução;

A partir do desenvolvimento das atividades supramencionadas e consulta aos profissionais experientes da área, espera-se encontrar boas práticas para redução de riscos e custos em projetos de implantação de subestação aplicada num parque eólico, conforme objetivo do trabalho.

Para a contextualização da proposta do trabalho, inicialmente serão abordados e explicados sucintamente os elementos de uma subestação, contando com a descrição dos equipamentos instalados, atividades de execução de um projeto e disciplinas de gerenciamento de projetos.

No Capítulo 1 foi introduzida a estrutura do setor elétrico brasileiro e dos setores de geração e transmissão, bem como a estrutura dos parques eólicos e metodologia do estudo de caso.

No Capítulo 2 serão explicitados todos os equipamentos e materiais necessários para a instalação completa de uma subestação, com o intuito de contextualizar a execução de um projeto de subestação aplicada a um parque eólico.

No Capítulo 3 são descritos os passos de execução de um projeto de uma subestação aplicada em um parque eólico.

No Capítulo 4 são abordados, de forma geral, as ferramentas para gerenciamento de projetos e respectivas aplicações.

No Capítulo 5 são elencados e desenvolvidos os resultados do estudo de caso.

No Capítulo 6 ocorre o fechamento e explanação das conclusões após desenvolvimento do estudo de caso.

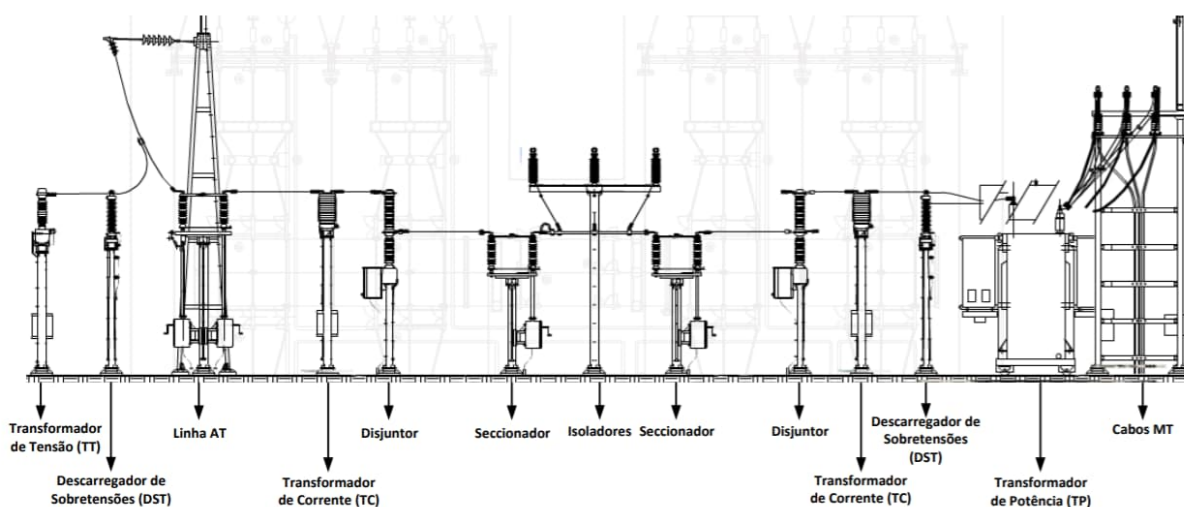
Durante todo o texto será possível ver a referência “ARQUIVO EMPRESA PRIVADA”. Devido aos direitos de imagem, a empresa não será citada neste trabalho.

2. Subestações de Alta Tensão Isoladas a Ar

A alta tensão empregada no sistema causa efeitos diversos no ambiente ao seu redor como, por exemplo, a presença de elevado campo eletromagnético ao redor dos condutores, assim como demonstrado na Lei de Ampère-Maxwell. Por sua vez, é certo dizer que o ar ao redor dos condutores de uma subestação é rico em campo magnético, induzindo corrente em outros condutores próximos ao de transmissão, até mesmo na própria estrutura que o suporta. Para que não haja presença de correntes fase-terra ou fase-fase, o ar atua como isolante entre os condutores de transmissão evitando a fuga fase-fase enquanto o sistema de aterramento é responsável por evitar as possíveis fugas fase-terra. A função do ar na subestação leva ao nome empregado para este tipo de sistema.

As subestações de alta tensão têm como objetivo transformar a tensão elétrica a fim de garantir maior eficiência do sistema elétrico, com segurança e confiabilidade. Dessa forma, sua especificação, construção e operação seguem diversos protocolos regidos pela ONS, denominados Procedimentos de Rede. Para que tudo seja seguido em conformidade, a implementação das subestações deve seguir tais protocolos e, para garantir as características desejadas de operação supramencionadas, há o emprego dos equipamentos das subestações. Uma subestação pode ser vista por um corte que elenca seus principais equipamentos de pátio conforme Figura 8.

Figura 8 - Corte de subestação isolada a ar AT/MT



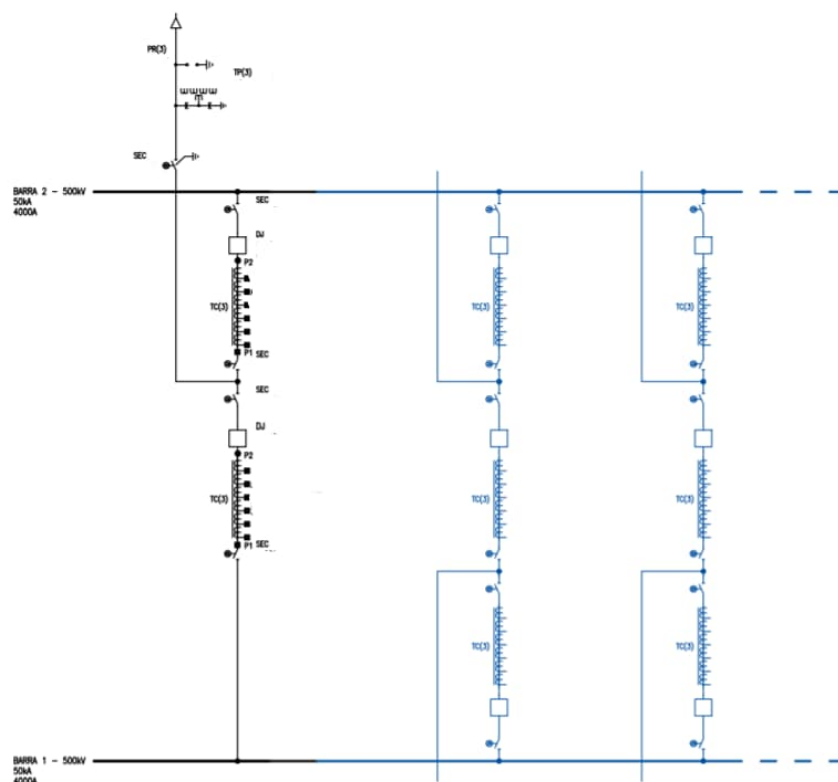
Fonte: (CARDOSO, 2013)

Neste corte é possível visualizar os 6 equipamentos principais de uma subestação de alta tensão isolada a ar, sendo eles:

- Transformador de potencial ou transformador de tensão;
- Para-raios ou descarregador de sobretensões;
- Transformador de corrente,
- Chave seccionadora ou seccionador;
- Disjuntor
- Transformador de potência.
- Isoladores de pedestal

Os equipamentos serão detalhados adiante neste trabalho. O corte da Figura 8 representa um único vão da subestação e esta pode ter mais vãos paralelos interligados por meio de barramentos como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama unifilar do pátio em 500 kV de subestação isolada a ar



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2020)

No caso da Figura 9, a representação em azul trata-se de futuras instalações já previstas na fase de projeto do primeiro escopo a ser executado. Não há representação dos

transformadores e do setor de média tensão. As referências aos clientes e os parâmetros técnicos dos equipamentos foram omitidos devido a necessidade de confidencialidade das informações.

Dentre todas as configurações de subestações possíveis, este trabalho será restrito às subestações elevadoras aplicadas em gerações advindas de parques eólicos e com transformação de tensão de 34,5 kV para 500 kV e tal característica pode ser resumida como Função Transmissão Transformação ou simplesmente FTTR (ONS, 2021). A configuração de uma subestação para essa aplicação pode ser dividida para estudo em quatro setores, os quais são explicitados a seguir.

- Pátio de alta tensão: Possui tensão nominal em 500 kV, onde são instalados os equipamentos de AT e onde há a presença do chamado encabeçamento da linha de transmissão de AT no barramento, conforme descrito na Figura 9.
- Setor de transformação: Localidade da subestação onde ocorre, de fato, a transformação da tensão sendo caracterizada pela presença do transformador de potência.
- Pátio de média tensão: Composto pelo pátio de equipamentos de MT e a chegada da rede de média tensão, responsável por conectar a subestação ao parque eólico.
- Casa de Comando: Edificação em que são instalados todos os equipamentos responsáveis por controlar e supervisionar a operação da subestação de forma remota e prover alimentação elétrica aos circuitos auxiliares dos equipamentos das demais áreas.

2.1. Configuração do Barramento

Assim como demonstrado na Figura 9, presente no item anterior, para uma subestação isolada a ar elevadora 34,5/500 kV, há uma definição prévia da disposição elétrica entre equipamentos, barras e circuitos, nomeada como configuração do barramento. Um circuito é composto por cada ramo que se une às barras, ou seja, uma linha de transmissão que ancora nas barras é um circuito, assim como um transformador ancorado nas barras também representa um circuito. Dessa forma, a quantidade de circuitos é a soma da quantidade de linhas e transformadores ancorados às barras. O termo “configuração de barra” pode ser entendido como sendo a maneira pela qual os equipamentos do pátio de manobras estão conectados, ou seja, a conectividade elétrica da subestação (FRONTIN, 2013).

Diversas configurações de barramentos são possíveis, indo das mais simples, operativamente, às mais complexas. Em linhas gerais, ao acrescentarmos redundâncias e contingências aumentamos a confiabilidade, segurança e flexibilidade de operação. Contudo, o

custo para a implementação se torna elevado a cada ganho dessas características. Abaixo, são explicitadas todas as configurações de barramentos conhecidas (FRONTIN, 2013).

- BS – Barra Simples;
- BP+T – Barra Principal e Transferência;
- BPS+T – Barra Principal Seccionada e Transferência;
- BD-Ds-3 ch – Barra Dupla com Disjuntor Simples a Três Chaves;
- BD-Ds-4 ch – Barra Dupla com Disjuntor Simples a Quatro Chaves;
- BD-Ds-5 ch – Barra Dupla com Disjuntor Simples a Cinco Chaves;
- BD-Ds-3 e 4 ch – Barra Dupla com Disjuntor Simples a Três e Quatro Chaves;
- BD+T – Barra Dupla e Transferência com Disjuntor Simples a Três e Quatro Chaves;
- BDS-Ds-4 ch – Barra Dupla Seccionadas com Disjuntor Simples a Quatro Chaves;
- AN – Anel Simples;
- ANM – Anel Múltiplo;
- BD-D1/2 – Barra Dupla com Disjuntor e Meio;
- BD-D1/2-M – Barra Dupla com Disjuntor e Meio Modificado;
- BD-D1/3 – Barra Dupla com Disjuntor e Um Terço
- BD-Dd – Barra Dupla com Disjuntor Duplo

Subestações com isolamento a ar devem adotar uma das seguintes configurações para os arranjos de barramento, em função de sua classe de tensão: Barramentos de tensão igual a 230 kV, arranjo barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves; Barramentos de tensão igual ou superior a 345 kV, arranjo barra dupla com disjuntor e meio (ONS, 2021).

Tendo em vista a SE objeto de estudo de caso, será considerado neste trabalho o segundo caso supramencionado, utilizando a configuração de barramento de BD-D1/2 – Barra Dupla com Disjuntor e Meio que possui também a terminologia DJM. Esta configuração recebe este nome por conta do quantitativo necessário de disjuntores para proteger os circuitos de linha e transformação ser uma vez e meia a quantidade de circuitos, ou seja, no caso de 4 circuitos, são necessários 6 disjuntores. Dado o alto nível de tensão presente nas barras, no setor de 500 kV, faz-se necessário, além de atender ao procedimento de rede em caso de conexão à Rede Básica, uma configuração de desempenho elevado quando o interesse é a segurança na operação,

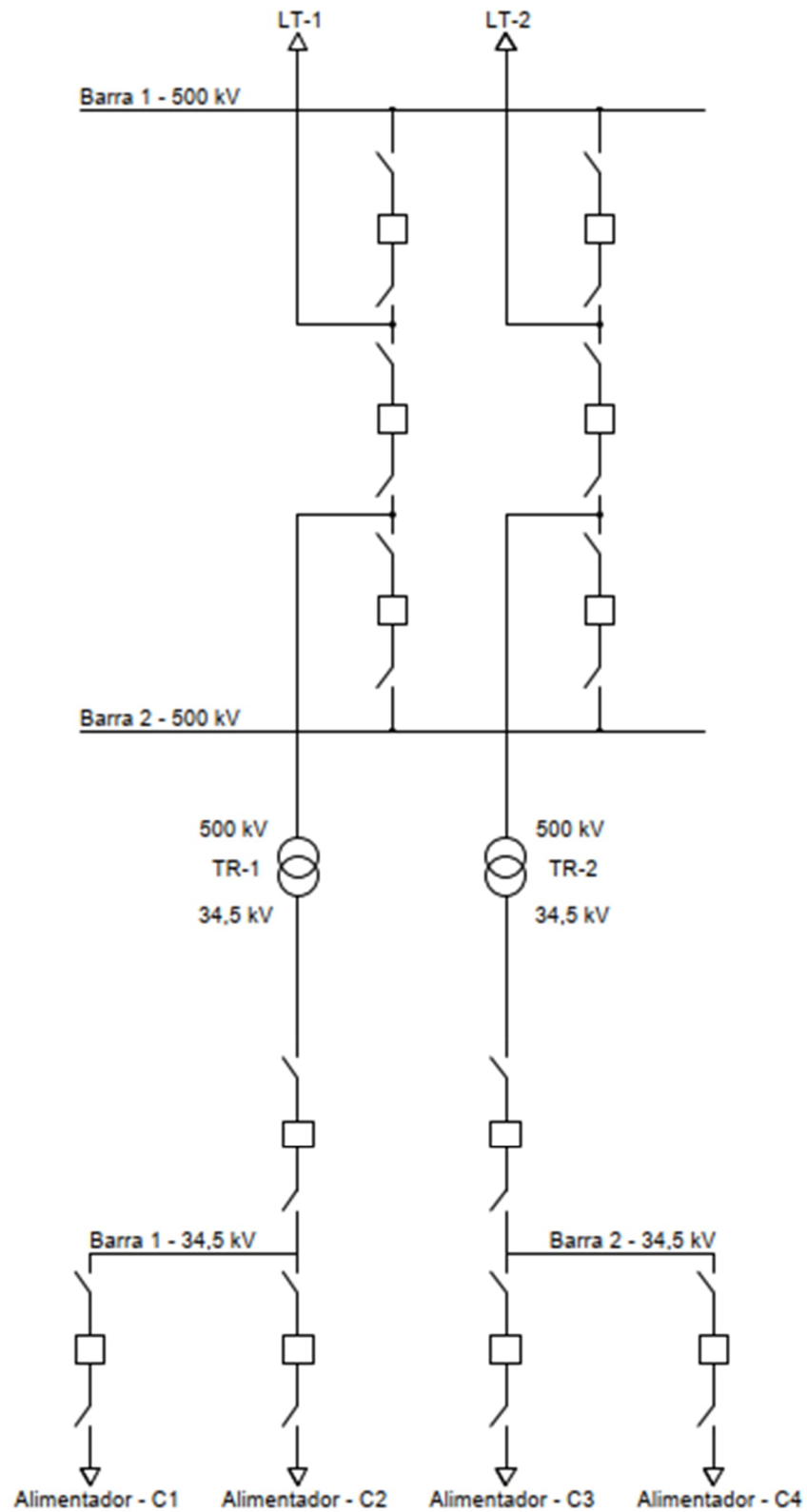
requisito ao qual a configuração DJM atende com maestria, devido às diversas configurações possíveis que podem ser estabelecidos em caso de falhas ou contingências. Em conjunto à segurança, possui boa flexibilidade operativa, facilidades para a sua expansão e fácil visualização dos equipamentos no pátio de manobras, devido ao arranjo físico adotado: equipamentos instalados entre as barras (FRONTIN, 2013).

A seguir, será possível identificar a representação completa de uma SE 34,5/500 kV aplicadas em parques eólicos, por meio de um diagrama unifilar, onde a configuração DJM é adotada ao pátio de 500 kV, conforme Procedimento de Rede. Na imagem, foram representados somente os equipamentos de transformação e manobra, sendo:

- Quadrados: disjuntores, tanto de alta quanto de média tensão;
- Seccionamentos: Chaves Seccionadoras, tanto de alta quanto de média tensão;
- TR-1/2: Transformadores de Potência 34,5/500 kV;
- Alimentador – C1/4: Entradas de circuitos de geração advindas dos parques eólicos;
- Barras 1/2 – 34,5 ou 500 kV: Barramentos Equipotenciais.

A Figura 10 é base conceitual para o entendimento da função de uma subestação elevadora aplicada em parques eólicos, bem como a configuração de barramento de alta tensão em DJM. A potência gerada é advinda dos circuitos alimentadores e possui sua tensão elevada pelas unidades transformadoras. O pátio de alta tensão, por sua vez é o responsável por escoar a produção de energia elétrica aos centros consumidores, por meio das linhas de transmissão, bem como realizar a proteção das linhas de transmissão e dos transformadores. Baseado na análise do diagrama unifilar, ao utilizar a configuração em DJM é possível identificar que existem vários caminhos de corrente elétrica possíveis, de acordo com o estado de cada disjuntor, seja ele aberto ou fechado, seja por falhas ou contingências do sistema, como a manutenção, por exemplo. As chaves seccionadoras permitem a manutenção dos disjuntores de forma segura, isolando-os por completo dos condutores em alta tensão e permitindo um contato humano seguro. No unifilar elaborado foram considerados somente quatro circuitos alimentadores, contudo, é usual que se tenham mais de vinte circuitos alimentadores por SE, sendo cada circuito composto por um ou mais aerogeradores. Os instrumentos de medição e as chaves seccionadoras dos circuitos que isolam cada circuito, não foram representados na Figura 10 e serão correlacionados mais a frente neste trabalho.

Figura 10 - Configuração em barra dupla com disjuntor e meio aplicada em SE 34,5/500 kV típica de parques eólicos



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

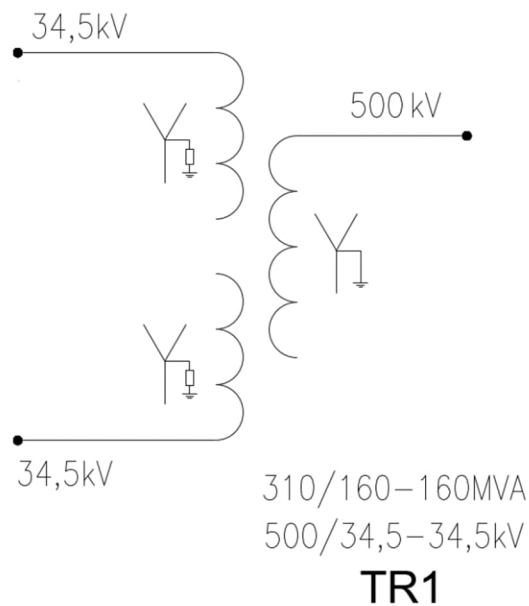
2.2. Transformadores de Potência

Estes equipamentos podem ser considerados como o coração de uma SE elevadora. São estes os responsáveis pela transformação da tensão que desencadeará os ganhos supramencionados no item 1.1.2. e são o ponto de intersecção entre a geração e a transmissão.

A potência aparente nominal nestes equipamentos, em geral, situa-se entre 150 e 300 MVA, quando aplicados em SEs para parques eólicos e na grande maioria dos casos são máquinas trifásicas. No caso da aplicação disposta, com transformação de 34,5 para 500 kV, a constante de relação de transformação (k) é de aproximadamente 14,49, em valores nominais. É válido ressaltar que é considerado um fator de variação nas tensões nominais presentes nos terminais de alta e baixa tensão, sendo de cinco por cento (5%) em geral, tanto para condição de subtensão como sobretensão. Contudo, essa consideração é premissa consolidada na fase de projeto dos transformadores. Dessa forma, estes equipamentos são projetados para que suportem às condições de variação de tensão. Além disso, os aerogeradores podem chegar durante sua operação a uma tensão de 36 kV em casos de sobretensões derivadas de ventos mais intensos que os usuais, devido às características intermitentes do vento, sendo 1,5kV acima dos valores nominais do pátio da SE e, portanto, em conjunto às demais características anteriormente mencionadas se faz necessária a consideração de variação de tensão nos terminais dos transformadores e equipamentos do setor de 500 kV. É comum a implementação de comutadores por derivação em carga nestes equipamentos, sendo estes equipamentos responsáveis por controlar o TAP dos transformares a fim de manter a tensão o mais próximo possível dos valores nominais, sem o desligamento do sistema.

Construtivamente, há uma característica especial nestes transformadores para a aplicação proposta. Devido ao grande número de ramificações dos circuitos alimentadores e a considerável relação de transformação utilizada, temos uma alta corrente elétrica, tanto nominal quanto de curto-circuito presente nos terminais de tensão nominal de 34,5 kV. Para contornar essa questão técnica, são projetados, fabricados e empregados transformadores com duplo secundário, caracterizando um circuito divisor de corrente, o que minimiza estes efeitos de parâmetros elevados de corrente nominal e corrente de curto-circuito. A Figura 11 representa o transformador com duplo secundário via diagrama unifilar.

Figura 11 – Representação em diagrama unifilar de transformador com duplo secundário



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2020)

O fluido isolante utilizado é o óleo mineral e é considerado no projeto do equipamento um sistema de ventilação forçada, composto de um ventilador e um radiador, onde o óleo mineral percorre e resfria. Esta condição eleva a capacidade de condução de corrente e permite que o equipamento tenha um maior rendimento ao resfriar. As condições de ventilação são duas:

1. ONAN – Óleo Natural Ar Natural: movimentação do óleo e do ar nos radiadores por convecção simples;
2. ONAF – Óleo Natural Ar Forçado: movimentação do óleo por convecção natural e ar forçado com o emprego de ventiladores;

A norma ABNT NBR 5356, em suas várias partes, é o documento que regulamenta a especificação, projeto, fabricação, ensaios de aceitação em fábrica e utilização do equipamento. Na Figura 12 é possível identificar um transformador de potência, com todas as características supramencionadas, montado e com seu óleo mineral já tratado, pronto para operação.

Figura 12 – Transformador 34,5/500 kV em operação



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2021)

2.3. Disjuntores

Com a característica de manobra e proteção dos sistemas de potência, os disjuntores são equipamentos complexos e com elevada responsabilidade no funcionamento das subestações. Os mesmos, têm variadas atribuições durante a operação das SE's como: à interrupção das correntes de curto-circuito em intervalos curtíssimos de tempo, isolamento de pontos elétricos dos barramentos (quando em seu estado aberto) e interromper correntes de valores nominais de operação, de menores amplitudes. Logo, podem ser elencados como os grandes responsáveis pelas alterações físicas da configuração do barramento. Os diversos tipos de solicitações realizadas o caracterizam como os equipamentos de maiores incumbências numa SE e maiores necessidades de manutenção.

Os disjuntores devem ter tempos máximos de interrupção em 60 Hz de 2 ciclos para as classes de tensão de 800, 550, 460 e 362 kV e 3 ciclos para as classes de tensão de 242, 145 e 72,5 kV (ONS, 2021). Portanto, para a aplicação deste trabalho, os disjuntores do pátio de alta tensão, para o atendimento do procedimento de rede, devem interromper a corrente em, aproximadamente, 33,33 ms, o que reflete o texto supramencionado quanto ao intervalo de tempo de interrupção.

Para uma SE aplicada em parques eólicos com tensão 34,5/500kV, em geral, os disjuntores são distribuídos em polos, sendo um por fase. Cada polo possui seu próprio armário de comando e mecanismo de acionamento. A proteção, controle e supervisão destes equipamentos será conectada aos armários por uma das pontas do cabeamento. A outra ponta é conectada ao painel de proteção, controle e supervisor, bem como ao painel de serviços auxiliares para a alimentação dos circuitos auxiliares do disjuntor. A Figura 13 demonstra um disjuntor à SF₆, de tensão nominal 420kV, instalado em uma subestação.

Figura 13 – Disjuntor à SF₆ de alta tensão



Fonte: (SIEMENS ENERGY, 2021)

Na Figura 13 é possível identificar os três polos do disjuntor, bem como seus isoladores suporte e armários de comando próximos ao solo.

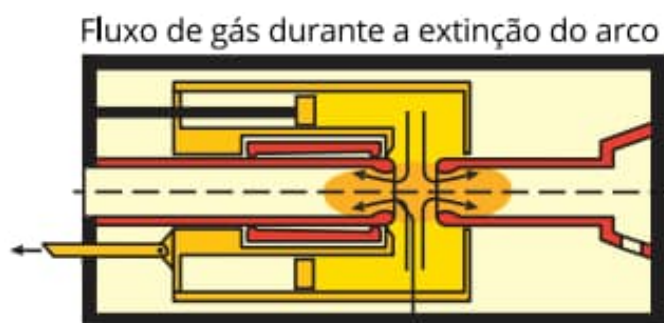
Construtivamente, os disjuntores podem ser distinguidos de acordo com sua forma de interrupção de corrente e seu material responsável pela isolação e extinção de arcos elétricos no momento da abertura e fechamento dos contatos. De acordo com os materiais empregados, os tipos de disjuntores são:

1. Disjuntor à óleo: Pode ser subdividido em duas vertentes nomeadas “pequeno volume de óleo” e “grande volume de óleo”;
2. Disjuntor à Ar Comprimido: Câmara dos contatos do disjuntor, por meio de admissão, recebe ar comprimido de reservatório pressurizado;
3. Disjuntor à SF₆: Utilização de hexafluoreto de enxofre por sua característica estável, inerte e ótima rigidez dielétrica;
4. Disjuntor a Vácuo;

Para o emprego na aplicação deste trabalho, comumente é utilizado o Disjuntor à SF_6 , devido às vantagens em relação aos disjuntores à óleo e ar comprimido, que garantem maior confiabilidade do equipamento.

No caso específico do disjuntor do pátio de 500kV, usualmente pode-se notar a existência de câmara dupla para extinção do arco, em que uma possui o SF_6 pressurizado em seu interior. Durante o movimento do contato móvel, há maior pressurização do SF_6 no interior do equipamento, especificamente no ponto de ocorrência de arco elétrico, realizando o “jateamento do gás”, extinguindo os arcos elétricos das operações de abertura e fechamento com velocidade e segurança. As técnicas de interrupção que partem desse princípio são nomeadas como autossopro, autocompressão estática e autocompressão dinâmica e a Figura 14 ilustra os mecanismos internos do equipamento e a forma de interrupção.

Figura 14 – Mecanismo de autossopro para disjuntores AT



Fonte: (FRONTIN, 2013)

Na Figura 14 é possível identificar o movimento de pressurização do gás exatamente no ponto de ocorrência do arco elétrico, sendo este ponto identificado na cor laranja. Os contatos de linha dos equipamentos, onde ocorrem efetiva transmissão de energia elétrica são destacados em vermelho. Por sua vez, em amarelo, está identificado o SF_6 pressurizado.

Na Figura 10 deste trabalho os disjuntores podem ser identificados pelos quadrados, conforme representados na imagem.

Para que seja possível compreender a aplicação dos Serviços Auxiliares mais a frente neste trabalho se faz necessário entender o mecanismo de acionamento dos disjuntores. O movimento interno dos contatos é, em geral, através de acionamento à mola para a aplicação proposta. Para que a mola empurre o contato móvel, ela é carregada por meio de um mecanismo motorizado, motor esse alimentado pelo sistema de Serviços Auxiliares da subestação. A mola é comprimida e travada, caracterizando o disjuntor na posição de circuito fechado. Ao ser solicitada a abertura

do disjuntor a mola tem sua energia potencial liberada e empurra o contato móvel, desconectando os contatos de linha e pressurizando o SF₆, paralelamente. O carregamento da mola é motorizado e para isso se faz necessário contatos disponíveis no armário de comando do disjuntor para alimentação destes motores. Nas Figuras 15 e 16 é possível identificar o mecanismo de acionamento à mola bem como o armário de comando dos disjuntores à SF₆.

Figura 15 – Mecanismo de acionamento à mola para disjuntor de alta tensão



Fonte: (SIEMENS ENERGY, 2021)

Figura 16 – Armário de comando e mecanismo de acionamento à mola para disjuntor de alta tensão



Fonte: (SIEMENS ENERGY, 2021)

Na Figura 16, pode ser notar um armário de comando completo, já com o mecanismo de carregamento da mola de acionamento alocado, bem como todos os contatos e bornes para medição de sinais lógicos, como posição aberta ou fechada do disjuntor e contatos de alimentação do motor de carregamento da mola.

Em linhas gerais, a ação de proteção e interrupção dos circuitos de transmissão é realizada pelos disjuntores, contudo, este equipamento não trabalha sozinho. Para que o sistema de proteção, controle e supervisão identifique os momentos de necessidade de abertura do disjuntor para a finalidade de proteção, se faz necessário a supervisão dos sinais de tensão e corrente presentes nos ramos onde o respectivo disjuntor está instalado. Para isso, são instalados Transformadores de Instrumento no pátio, conforme serão explicitados mais adiante neste trabalho. Além disso, e com a função de somente de manobra, é possível solicitar de forma remota a abertura e fechamento do disjuntor por meio dos sinais de controle aplicados pelos relés digitais dos painéis de Proteção e controle, que serão mostrados mais à frente.

2.4. Chaves Seccionadoras

Segundo a NBR 6935, chave é um dispositivo mecânico que na posição aberta assegura uma distância de isolamento, e na posição fechada mantém a continuidade do circuito elétrico nas condições especificadas (MAMEDE, 2005). É válido ressaltar que no texto anterior é citada a norma NBR 6935, substituída pela ABNT por um conjunto de normas elencadas como: ABNT NBR IEC 62271-1:2020, 62271-200:2007 e 62271-102:2006. A chave seccionadora deve ser capaz de abrir um circuito cuja corrente é de natureza desprezível e tensão no contato fixo possui variação irrisória, portanto, seus comandos de abertura e fechamento dependem diretamente do atual status dos disjuntores que estão atrelados a estes equipamentos bem como a variação de tensão nas barras. Dessa forma, a função de uma chave seccionadora é isolar os equipamentos no pátio da SE para que seja possível a um ser humano, de forma segura, realizar manutenções e reparos nos demais equipamentos.

Uma chave seccionadora pode ser dividida em partes. São elas:

- Circuito principal: Condutor(es) instalado(s) nos equipamentos responsáveis por seccionar o circuito no qual o equipamento está inserido;
- Circuitos Auxiliares e de Comando: Responsáveis pelo controle de operação, encaminhando e atuando os sinais de abertura e fechamento das chaves;

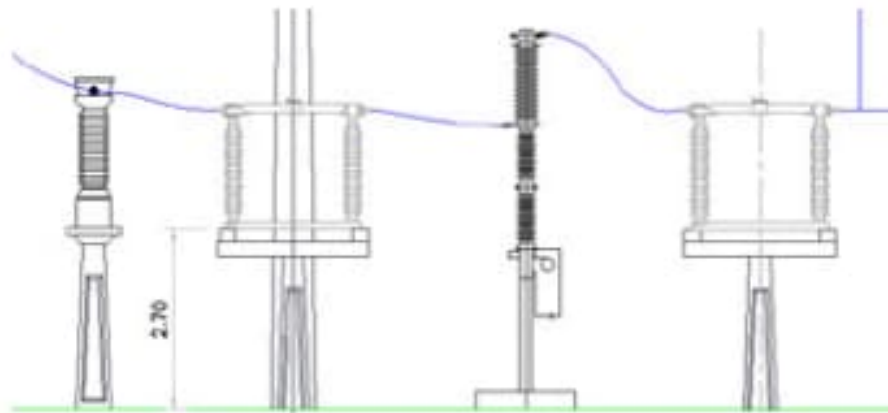
- Polos: É a união do circuito principal, incluindo os terminais de conexão com o sistema de transmissão;
- Contatos: Peças metálicas responsáveis por assegurar o contato mecânico dos condutores intrínsecos da chave. São divididos em contatos fixos e móveis;
- Terminais: Parte condutora responsável pela conexão ao sistema de transmissão;
- Dispositivo de Operação: É aquele através do qual se processa a abertura ou fechamento dos contatos principais do seccionador (MAMEDE, 2005);
- Dispositivo de Bloqueio: É o dispositivo mecânico que indica ao operador a posição assumida pelos contatos móveis principais, após a efetivação de determinada manobra (MAMEDE, 2005);

Podem ser tanto unipolares quanto tripolares e possuem diversas formas construtivas, que variam de acordo com a necessidade de espaço físico e especificações técnicas. Segundo a bibliografia (MAMEDE, 2005), os tipos construtivos são de acordo com a sua forma de abertura do circuito principal e são eles:

- Seccionadores de abertura lateral singela (ALS)
- Seccionadores de abertura central (AC)
- Seccionadores de dupla abertura lateral (DAL)
- Seccionadores de abertura vertical (AV)
- Seccionadores pantográficos
- Seccionadores de haste vertical

Para a aplicação de uma subestação para parque eólico em 500 e 34,5 kV o modelo mais comum é o de abertura vertical, devido ao seu menor custo e devido as regiões geográficas onde são instaladas e coordenação de isolamento necessária para o pátio de 500kV, o espaço físico não é um limitante para este tipo de movimentação dos circuitos principais. Na aplicação proposta e em linhas gerais, são utilizadas chaves tripolares, de abertura vertical. Na Figura 10, demonstrada anteriormente, pode-se identificar pelo posicionamento das chaves sua função de isolamento, isolando cada ramo do circuito de transmissão se abertas e na Figura 17 é possível ver a representação ilustrativa dessa função.

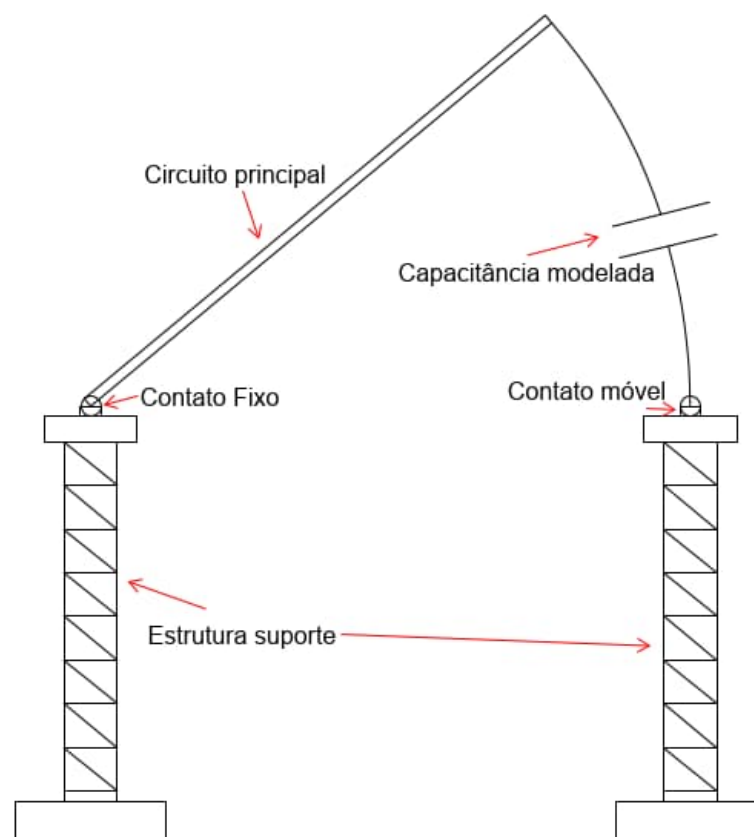
Figura 17 – Seccionador posicionado para isolamento de disjuntor



Fonte: (FRONTIN, 2002)

O cálculo e modelamento de uma chave seccionadora que garante a isolação quando na posição aberta pode ser ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Modelagem ilustrativa para Seccionador de Abertura Vertical



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Entre o contato móvel (contato cujo circuito principal está distante do terminal na posição aberta) e a extremidade do circuito principal, pode ser modelada uma capacitância. O que caracteriza a capacitância é a presença de um meio dielétrico (ar atmosférico), entre dois condutores e a presença de uma diferença de potencial entre os pontos condutores. Não será abordado o método de cálculo, sendo a imagem somente ilustrativa para representar a função do seccionador. A chave não deve possuir a presença de arco elétricos quando na posição aberta.

Além das seccionadoras comuns, há o emprego de chaves de aterramento acopladas ao seccionador de entrada de linha, com a função de isolar a linha de transmissão em casos de contingências, como manutenção da linha de transmissão, por exemplo.

Para a realização da operação mecânica dos seccionadores de abertura vertical associados ao pátio de 500kV são utilizadas seccionadoras motorizadas, de forma geral. A movimentação ocorre por um motor de baixa tensão instalado no armário de acionamento das chaves. Um mecanismo de transferência deste torque faz com que a chave se movimente a partir da rotação do motor. Sendo motorizado, o comando de abertura e fechamento pode ser realizado de forma remota, partindo do sistema de proteção e controle da SE, sendo assim, não é necessária a presença humana no pátio da SE para a operação da chave, reduzindo riscos de segurança do trabalho. Para o pátio de 34,5kV o acionamento de abertura ou fechamento pode ser manual ou motorizado, variando de acordo com a especificação de cada transmissora. Contudo, o acionamento manual possui menor custo pois o equipamento é mais barato além de poupar recursos que seriam destinados a compra de cabos de baixa para o acionamento remoto das chaves. Sendo a tensão 34,5kV o risco da exposição à eletricidade no pátio, apesar de ainda existente, ainda é menor, o que viabiliza a utilização do acionamento manual. Nas Figuras 19 e 20 podem ser vistas chaves instaladas em campo, numa SE aplicada em parques eólicos.

Figura 19 – Chave Seccionadora 500kV instalada em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 20 – Chave Seccionadora 34,5kV instalada em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

2.5. Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados (MAMEDE, 2005). Inicialmente, não é factível que o sistema de proteção, controle e supervisor de uma subestação realize medições, de forma direta, de correntes como as nominais dos circuitos de

transmissão, devido à sua alta intensidade. Para isso, aplicam-se os transformadores de corrente, que metaforicamente podem ser descritos como “os olhos da proteção e controle”, coletando as correntes nos barramentos onde ocorre a transmissão, de forma que o sistema de proteção e controle possa receber a informação sem danos físicos causados pelas altas correntes. Portanto, estes equipamentos funcionam com o intuito de compatibilizar a grandeza física “corrente elétrica” entre os circuitos de alta e média tensão do setor de transmissão com a baixa tensão presente nos equipamentos de controle e proteção. Os transformadores de corrente usualmente são nomeados de forma abreviada, sendo chamados apenas de TCs e será utilizada essa notação a partir desse momento.

As características construtivas dos TCs são diversas e podem variar para cada aplicação. Segundo a bibliografia (MAMEDE, 2005), os tipos construtivos são:

- TC tipo barra;
- TC tipo enrolado;
- TC tipo janela;
- TC tipo bucha;
- TC tipo núcleo dividido;
- TC tipo com vários enrolamentos primários;
- TC tipo com vários núcleos secundários;
- TC tipo com vários enrolamentos secundários;
- TC tipo derivação no secundário

Em parques eólicos os tipos construtivos dos TCs a serem empregados podem variar de acordo com a especificação técnica e padronização de cada empresa transmissora. Em geral, os TCs possuem múltiplos enrolamentos secundários, visto a necessidade de encaminhar o mesmo sinal de corrente medido para diferentes funções dentro da subestação, como proteção, supervisão, medição de faturamento da geração eólica etc. Para que os TCs enviem a mesma informação ao sistema de proteção, controle, supervisão e medição de faturamento, os TCs são projetados com múltiplos enrolamentos a fim de prover enrolamento específico para cada função.

O posicionamento dos TCs numa SE é dado de acordo com cada nó presente no arranjo, de forma a obter dados de todas as correntes presentes no pátio de média e alta tensão para posterior aquisição do sistema de proteção, controle e supervisão. Em linha com a lei dos nós de

Kirchhoff e o princípio da continuidade elétrica, os nós presentes no circuito de transmissão identificam os pontos de alteração da intensidade de corrente, definindo então os pontos elétricos de locação dos TCs.

Para a aplicação em subestações para parques eólicos, os TCs referentes ao pátio de 500kV são monofásicos (um por fase) e instalados em estruturas dedicadas exclusivamente a cada equipamento. Já no setor de 34,5kV os equipamentos também são monofásicos, contudo, sua instalação se dá numa única estrutura compartilhada com os demais equipamentos, devido as menores dimensões dos equipamentos. As correntes medidas nos terminais são coletadas via cabo elétrico do terminal secundário de cada TCs e conectados um pequeno painel, chamado caixa de junção, que une todos os sinais e, via borne, conectam cada sinal respectivo cabo que leva o valor medido aos painéis de controle, proteção etc.

Nas Figuras 21 e 22 são explicitados os TCs instalados em campo para os pátio de 500 e 34,5kV respectivamente.

Figura 21 - Transformador de Corrente 500kV instalado em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 22 – Transformador de Corrente 34,5kV instalado em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

2.6. Transformadores de Potencial

Os transformadores de potencial são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com a da rede à qual estão ligados (MAMEDE, 2005). Os transformadores de potencial usualmente são nomeados de forma abreviada, sendo chamados apenas de TPs e será utilizada essa notação a partir desse momento.

De formal dual ao transformador de corrente, estes equipamentos atuam de forma a compatibilizar a grandeza “tensão elétrica” entre equipamentos que trabalham em diferentes tensões nominais, sendo de sua responsabilidade coletar em nível de tensão adequado as informações presentes no sistema de alta tensão e disponibilizá-las aos sistema de proteção, controle, supervisão e medição de faturamento em baixa tensão. Assim como nos TCs, os TPs são projetados com múltiplos enrolamentos a fim de prover enrolamento específico para cada função.

Construtivamente podem ser divididos em transformadores de potencial do tipo indutivo e tipo capacitivo, sendo aplicados para tensões menores que 138kV os indutivos e iguais ou maiores que 138 kV utiliza-se o tipo capacitivo (MAMEDE, 2005).

Em SEs destinadas a coleta de geração eólica, é possível identificar os dois tipos de transformadores de potencial, visto a existência dos pátios de alta e média tensão presentes. Sua instalação se dá em pontos equipotenciais, como nos barramentos, por exemplo.

A aplicação dos TPs em subestações destinadas a parques eólicos é completamente dual aos TCs, com exceção aos pontos em que são instalados no arranjo físico e diagrama unifilar.

Nas Figuras 23 e 24 são explicitados os TPs instalados em campo para os pátios de 500 e 34,5kV.

Figura 23 – Transformador de Potencial 500kV instalado em campo



Fonte: (ARTECHE, 2022)

Figura 24 – Transformador de Potencial 34,5kV instalado em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

2.7. Para-raios

Os para-raios possuem a função de proteger o sistema de transmissão de sobretensões, sejam elas de fontes externas como descargas atmosféricas ou sobretensões de fontes internas, inerentes às manobras de chaves seccionadoras e disjuntores devido ao regime transitório intrínseco da reconfiguração do circuito, bem como de correntes oriundas de faltas de curto-

circuito. Seu funcionamento é pautado em resistência não linear, ou seja, em condições nominais opera como uma chave aberta em relação ao sistema de aterramento. Ao sentir em seus terminais uma elevada variação de tensão, a resistência cai drasticamente fazendo com que se caracterize como uma chave fechada, dissipando a corrente induzida associada a sobretensão existente para a malha de aterramento.

Os tipos construtivos mais comuns são separados de acordo com o material empregado para a função de resistência não-linear. São os materiais:

- Carboneto de Silício
- Óxido de Zinco

A diferença construtiva se dá além do material. No caso dos para-raios que utilizam o Carboneto de silício há a presença de centelhador em série com o material, que basicamente são “espaços vazios”, visando dissipar a energia das sobretensões, característica não presente nos para-raios de óxido de zinco. O submódulo 2.6 dos procedimentos de rede da ANEEL, em seu capítulo 4.7, estipula que para as SEs conectadas à rede básica o material a ser empregado é o óxido de zinco, sem a presença de centelhadores.

Dois são os parâmetros principais para a definição dos valores nominais dos para-raios e são eles o nível básico de isolamento dos equipamentos a serem protegidos (NBI) e a corrente de curto-circuito do sistema. Devem ser instalados para-raios nas entradas de LT e nas conexões de unidades transformadoras de potência, de reatores em derivação e de bancos de capacitores não autoprotégidos (ONS, 2021). Em linha com o procedimento de rede, a instalação se dá em quatro pontos na SE 34,5/500 kV para parque eólico.

1. Encabeçamento das Linhas de Transmissão
2. Alta do Transformador 34,5/500 kV
3. Baixa do Transformador 34,5/500 kV
4. Encabeçamento das Redes de Média Tensão

Considerando os pontos supracitados, observa-se que os para-raios possuem a função de proteger os equipamentos das sobretensões, com destaque especial ao transformador de potência da SE e independentemente do setor da subestação em que haja uma fonte interna ou externa de sobretensão, ambos os lados são protegidos.

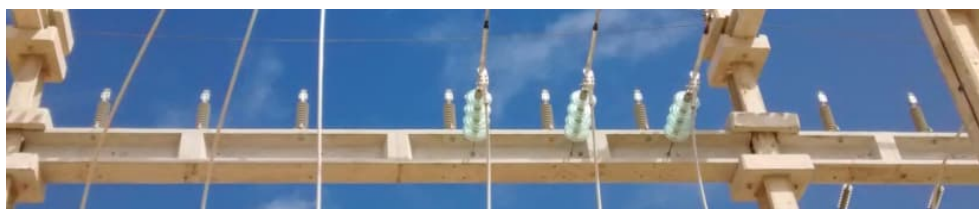
Nas Figuras 25 e 26 são explicitados os para-raios instalados em campo para os pátios de 500 e 34,5kV, respectivamente.

Figura 25 – Para-raio instalado em campo no setor de 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 26 – Para-raios instalados em campo no setor de 34,5kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

2.8. Sistema de Proteção, Controle e Supervisório

O cérebro de uma subestação, o sistema de proteção, controle e supervisório, de forma abreviada SPCS, é responsável por toda a operação da SE. É um sistema altamente complexo, que interconecta, automatiza, monitora e processa todas as solicitações durante a operação do sistema de transmissão. Seu funcionamento é baseado no input dos dados de tensão e corrente enviados pelos TPs e TCs e dos sinais de cada equipamento. Com as informações que recebe, processa a ação necessária, seja ela de proteção, controle ou supervisão de informações dos equipamentos.

De forma macro, é composto por painéis, cada qual com seu projeto específico, sendo subdivididos por função e setores da subestação, ou seja, cada painel possui função específica

e atua em equipamentos específicos. A redundância é algo presente tratando-se da parcela do SPCS dedicada à proteção dos transformadores de potência e das linhas de transmissão, aumentando sua confiabilidade e permitindo a manutenção frequente e segura dos painéis. Portanto, temos dois tipos de atuação, a principal e a alternada, que compõe painéis idênticos e caracterizam a redundância do SPCS.

Para a aplicação numa SE 34,5/500 kV para parques eólicos, a quantidade de painéis de SPCS depende da quantidade de circuitos alimentadores que ancoram no setor de 34,5kV, da quantidade de transformadores de potência 34,5/500 kV e linhas de transmissão que ancoram no setor de 500kV. Considerando o mais usual que é empregado no mercado atualmente, a subestação para escoamento da geração de um parque eólico possui os seguintes quantitativos para especificação e projeto do SPCS:

- 1 Linha de Transmissão 500kV;
- 2 Transformadores de Potência trifásicos 34,5/500 kV;
- 30 Circuitos Alimentadores 34,5kV, em geral;

Com as informações acima é possível identificar rapidamente que a subestação possuirá dois painéis dedicados à linha de transmissão e quatro aos transformadores.

O procedimento de rede da ONS caracteriza a rede de média tensão (união dos circuitos alimentadores) como responsabilidade da geração, portanto, não informa a necessidade de redundância no SPCS dedicado a este setor. Dessa forma, um único painel pode realizar a função de proteger, controlar e supervisionar mais de um circuito alimentador, sendo somente limitados ao tamanho físico e consequentemente a capacidade de instalação de equipamentos internos aos painéis. Em geral, um painel comporta a proteção, controle e supervisão de 4 circuitos alimentadores resultando em média em 8 painéis para esta função. A Figura 27 demonstra a vista frontal de um painel em fase de testes para uma SE para parque eólico.

Figura 27 – Vista frontal de painel principal de proteção e controle para transformador de potência em testes



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Os dados do cliente e de fabricação foram omitidos na imagem anterior, devido à confidencialidade das informações.

Atualmente os equipamentos principais empregados internamente aos painéis são os inteligentes e sofisticados relés microprocessados, onde se programa a lógica de proteção de abertura e fechamento de disjuntores em caso de perturbações, bem como processa todas os comandos de abertura e fechamento das chaves seccionadoras quando possuem acionamento remoto, por exemplo. Os detalhes internos dos painéis são complexos e não serão detalhados neste trabalho. Na Figura 28 é exemplificado um modelo de relé microprocessado presente no mercado atualmente.

Figura 28 – Relé microprocessado Siemens modelo SIPROTEC 5



Fonte: (SIEMENS, 2022)

Estes poderosos relés substituem a infinidade de pequenos equipamentos eletromecânicos que antigamente eram necessários para o SPCS. Neles são programadas todas as lógicas com base nas especificações de curto-circuito, sobre e subtensão, sobre e subcorrente entre outras diversas funções que são listadas e codificadas pela tabela ANSI.

Devido a fragilidade, principalmente ao contato com umidade, os painéis são instalados protegidos de intempéries dentro da casa de comando e possuem sala dedicada exclusivamente ao seu posicionamento e instalação na SE. Para que receba todas as informações do pátio da SE, uma grande quantidade de cabos faz a conexão dos painéis com o campo por meio de canaletas de alvenaria que percorrem o solo enterradas ao longo do pátio e fazem o encaminhamento de todos os cabos elétricos para os painéis, entregando as informações de tensão e corrente dos TPs e TCs, bem como enviando os sinais de controle aos disjuntores e seccionadores. Uma sala completa, contendo todo o SPCS bem como os sistemas de medição de faturamento e telecomunicações, que serão vistos mais a frente, é ilustrada na Figura 29.

Figura 29 – Sala de painéis real de SE elevadora 34,5/500 kV aplicada a um parque eólico



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

O supervísório é a interface do SPCS com o ser humano. Nele encontram-se os monitores e softwares desenvolvidos para a operação do sistema, onde pode-se encontrar os sinais que são recebidos, dados em tempo real, status de equipamentos (chaves seccionadoras abertas ou fechadas, por exemplo) bem como ocorre a integração com os aerogeradores, recebendo os sinais de cada torre geradora e visualizando-os pelos softwares da geração.

2.9. Sistema de Medição de Faturamento

Além da motivação social, a geração de energia também possui a motivação comercial de obter lucro a partir do investimento no setor de energia. No caso de uma geração, como um parque eólico, a energia gerada é vendida e seu faturamento é definido com base na potência gerada. Dado que a potência é o equivalente a multiplicação da tensão pela corrente, o sistema de medição de faturamento, com base nas informações recebidas das medições dos TCs e TPs, realiza essa multiplicação, calcula e registra o ganho financeiro da geração. O mercado de energia e sua regulação não serão abordados neste trabalho.

Construtivamente, o sistema de medição de faturamento é composto por painéis dedicados exclusivamente à essa atividade e que recebem, via conexão elétrica, os dados de um dos enrolamentos dos TCs e TPs e por meio de um instrumento de medição de faturamento associado às informações de tensão e corrente, faz o cálculo do faturamento do parque eólico. A Figura 30 exemplifica, com um modelo comum de mercado, o medidor de faturamento.

Figura 30 – Medidor de faturamento Schneider Eletric modelo ION 8650



Fonte: (SCHNEIDER ELETRIC, 2022)

Comercialmente, não é interessante ao agente gerador que perca seus registros de faturamento, portanto, há a redundância dos medidores nos painéis, havendo a medição principal e alternada, assim como nos painéis de SPCS. Além disso, para que não haja perda no rastreamento da medição de faturamento, o TC de cada tronco de circuito alimentador envia seu sinal de corrente para seu respectivo medidor, possibilitando o faturamento da energia gerada agrupando o faturamento de três circuitos alimentadores, em geral.

Os painéis do sistema de medição de faturamento possuem chaparias muito similares aos de SPCS, de forma que na Figura 29 há a presença destes painéis e sem uma imagem mais próxima aos painéis de medição de faturamento não se nota a diferença. A Figura 31 exemplifica um painel de medição de faturamento.

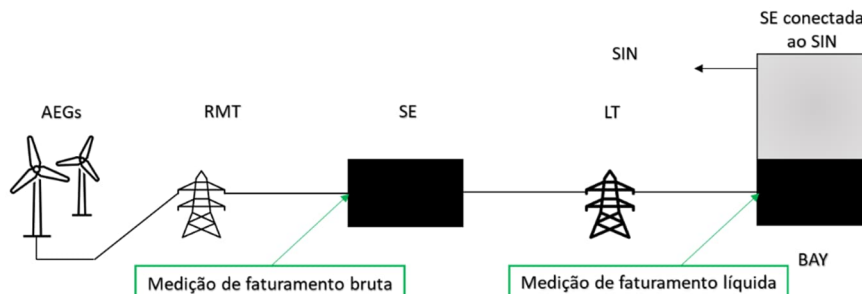
Figura 31 – Pannel de medição de faturamento



Fonte: (METRUM, 2022)

Para que se calcule as perdas em termos financeiros, no sistema de transmissão, instalam-se dois sistemas de medição de faturamento num parque eólico sendo um na fronteira entre a rede de média tensão oriunda dos aerogeradores, chamado de medição de faturamento bruta e outro após a linha de transmissão na subestação que possui a fronteira com a rede básica, chamado de medição de faturamento líquida. Cruzando as informações coletadas por ambos os painéis pode-se calcular, financeiramente, as perdas entre a entrada do setor de 34,5kV na subestação do parque eólico e a fronteira com o SIN. A Figura 32 ilustra a posição de instalação do sistema de medição de faturamento.

Figura 32 – Posicionamento do sistema de medição de faturamento no parque eólico



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

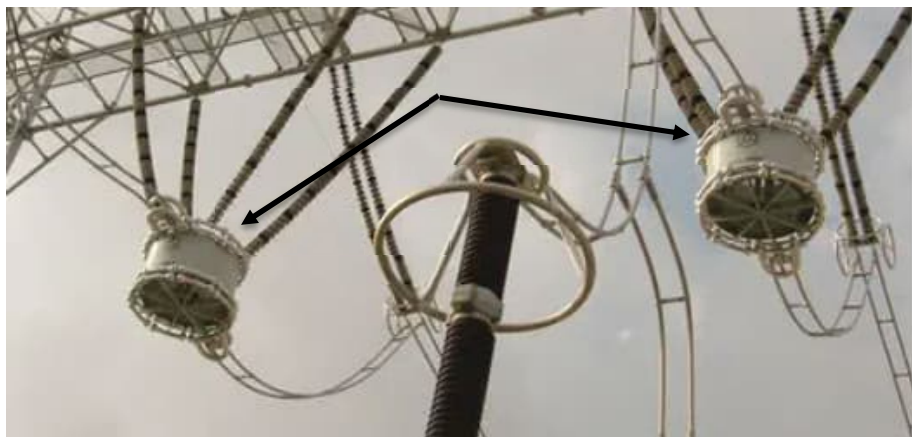
2.10. Sistema de Telecomunicações

O sistema de telecomunicações é responsável pela circulação de informações de voz e dados entre subestações bem como aos centros de operação e o ONS. Os dados enviados podem ser parâmetros elétricos da SE, status de equipamentos (aberto ou fechado, por exemplo) entre outras informações, além de permitir o comando e supervisão remoto das SEs. Para que as informações sejam transmitidas, entre as subestações, um meio físico para encaminhamento dos dados se fazem necessários e são realizados pela linha de transmissão. Os dois sistemas mais usuais são:

- OPLAT: Ondas Portadoras em Linha de Alta Tensão;
- OPGW: do inglês, Optical Ground Wire;

O sistema OPLAT utiliza os próprios cabos da linha de transmissão que interliga a subestação e o ponto de conexão à SE existente para o envio de informações. Os dados são enviados por meio de ondas portadoras que são demoduladas na chegada à SE existente por meio de um filtro de frequência em alta tensão e para compor este filtro, equipamentos específicos são utilizados, sendo o mais característico deles a bobina de bloqueio. A Figura 33 ilustra a bobina de bloqueio instalada em campo.

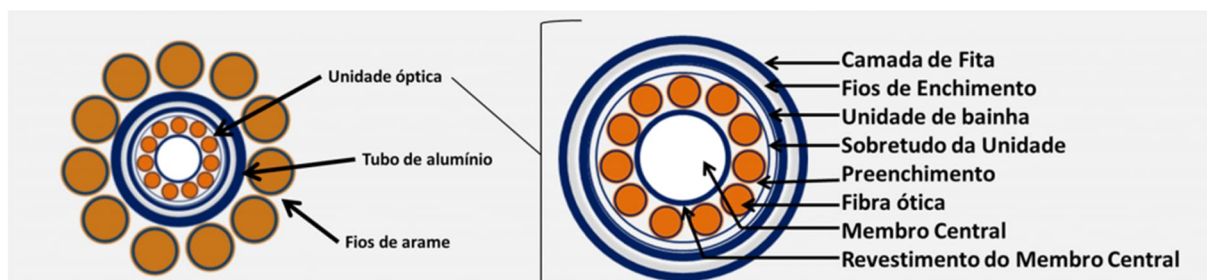
Figura 33 – Bobinas de bloqueio instaladas em suspensão



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2020)

O sistema de comunicação via OPGW, é composto por um cabo diferenciado na linha de transmissão. Como o próprio nome em inglês já diz, o cabo OPGW é o cabo de aterramento da linha. Contudo, seu núcleo possui fibras óticas responsáveis pelo encaminhamento das informações de telecomunicação. A Figura 34 exemplifica o cabo OPGW.

Figura 34 – Seção transversal de cabo OPGW



Fonte: (ELETRONET 2022)

Para o tratamento das informações e correto endereçamento interno na SE, um painel de telecomunicações, muito similar aos de SPCS e medição de faturamento, centraliza todos os sinais recebidos pelos sistemas de telecomunicação das linhas de transmissão e os endereça fisicamente, em geral via fibra ótica, ao supervisor concluído o enlace da comunicação. Na figura 29 há um painel de telecomunicações instalado na casa de comando, contudo, sua chaparia é similar aos demais e sem imagem mais próxima não se identifica a diferença.

2.11. Serviços Auxiliares

A alimentação elétrica de todos os sistemas instalados na subestação, os serviços auxiliares possuem a função de abastecer todos os sistemas da subestação com energia em baixa tensão. Apesar da transmissão efetiva de energia elétrica ocorrer em alta tensão, os relés dos painéis de SPCS, motores de disjuntores e chaves seccionadoras, circuitos de iluminação e tomadas, entre outros equipamentos na SE, são alimentados em baixa tensão, de forma a serem mais seguros para operação e manutenção. Além disso, a alimentação não é exclusivamente em corrente alternada, possuindo também alimentações em corrente contínua. Metaforicamente, atua como o sistema cardíaco da SE necessitando serem confiáveis e seguros, portanto, possuem contingências e redundâncias no caso de indisponibilidade.

Conforme a ANEEL solicita no procedimento de rede, submódulo 2.6, a alimentação CC deve ser provida por dois conjuntos compostos de retificadores e banco de baterias independentes para os sistemas de proteção, controle, supervisor e mais dois conjuntos para o sistema de telecomunicações. Em geral, o SPCS é alimentado em 125 Vcc e o sistema de telecomunicações em 48 Vcc e para subestações aplicadas a parques eólicos, possuem em geral dois retificadores e bancos de baterias em tensão nominal 125Vcc para o SPCS e mais dois retificadores e bancos de baterias em tensão nominal 48Vcc para o sistema de

telecomunicações. Além da contingência de possuir duplicidade de retificadores e de banco de baterias, ainda há a necessidade de as baterias serem dimensionadas para atenderem as cargas CC por no mínimo 5 horas para o SPCS e 10 horas para o sistema de telecomunicações, solicitado pelo mesmo submódulo do procedimento de rede da ANEEL. As Figuras 35 e 36 ilustram os equipamentos de alimentação em corrente contínua.

Figura 35 – Retificador tiristorizado para alimentação CC



Fonte: (TEKSEA, 2022)

Figura 36 – Banco de Baterias para alimentação CC instalado em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Para a alimentação CA, a confiabilidade é ainda mais exigida, sendo solicitado pelo procedimento de rede da ANEEL, em seu submódulo 2.6 a necessidade de duas fontes de

alimentação associado a um grupo motor-gerador, a base de combustível fóssil para o caso de indisponibilidade das duas fontes iniciais.

As duas fontes principais (com exceção do grupo motor-gerador) podem ser distribuídas especificadas pelo submódulo 2.6 do procedimento de rede ANEEL como:

- a) Uma fonte externa proveniente da distribuidora local e outra interna da própria subestação; ou
- b) Duas fontes internas da própria subestação.

As fontes internas da subestação devem ser providas por meio de terciário de transformador existente ou por meio de transformador convencional dedicado para esse fim a ser instalado pelo agente (Procedimento de Rede, submódulo 2.6). Dessa forma, as maneiras de alimentar em corrente alternada os equipamentos de uma subestação são:

- Utilização transformador dedicado para alimentação de equipamentos coletando energia elétrica de terciário do transformador de potência principal em média tensão e distribuí-la em baixa tensão aos sistemas da SE;
- Utilização transformador dedicado para alimentação de equipamentos coletando energia elétrica de rede de concessionária de distribuição local em média tensão e distribuí-la em baixa tensão aos sistemas da SE;
- Utilização de grupo motor-gerador.

Os transformadores utilizados com a finalidade de alimentação de equipamentos são usualmente nomeados como transformadores de serviços auxiliares ou somente TSA. As Figuras 37, 38 e 39 ilustram os equipamentos instalados em campo.

Figura 37 – Transformador de Serviço Auxiliar de pátio



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 38 – Transformador de Serviço Auxiliar instalado em rede de distribuidora local para alimentação na subestação



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

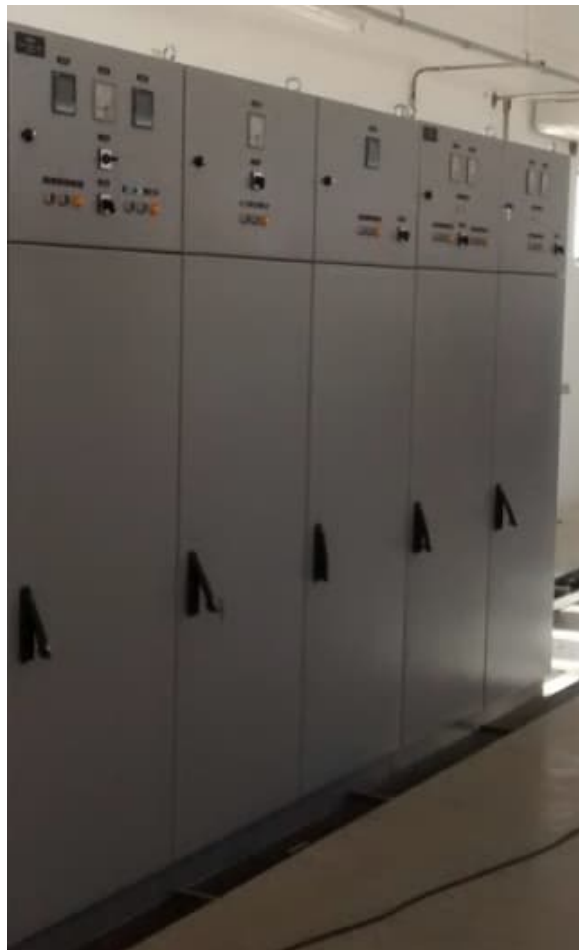
Figura 39 – Grupo motor-gerador com tanque externo instalado em subestação



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Para uma interligação entre alimentações e equipamentos de forma segura, é previsto painéis dedicados para este fim, chamados painéis de serviços auxiliares, sendo diferentes entre cada tipo de alimentação. Em geral, possuímos dois painéis em alimentação CC e dois painéis em alimentação CA, que coletam, distribuem e garante a coordenação da lógica de alimentação dos equipamentos de pátio e demais circuitos. De forma simplificada, os painéis de serviços auxiliares atuam como um grande quadro geral similar ao de uma residência convencional. A Figura 40 ilustram os painéis CA e CC instalados em campo.

Figura 40 – Painéis de Serviço Auxiliar CA e CC instalados em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

Todos estes equipamentos são interligados às cargas por meio de cabeamento e protegidos em diversos níveis. A lógica de controle é advinda do sistema de SPCS. Portanto, a especificação e interligação de todo o sistema de serviços auxiliares é algo complexo, dependente da diversas variáveis.

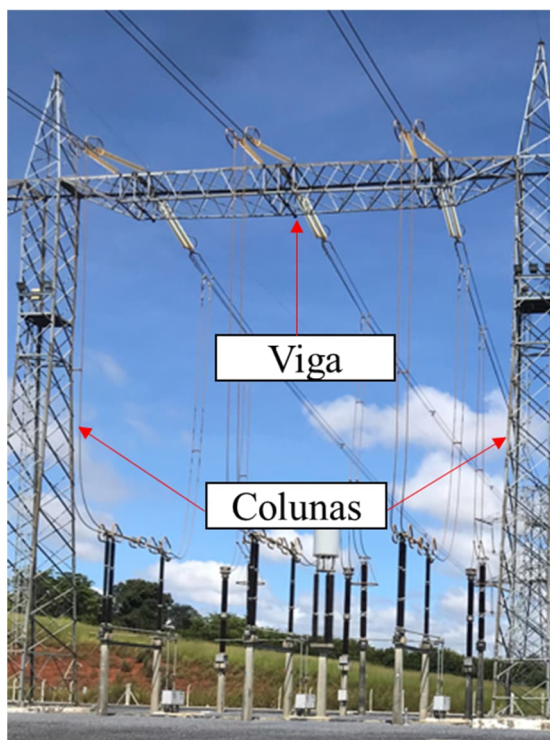
2.12. Materiais de Montagem Eletromecânica

Uma subestação para interconectar os equipamentos nos pátios de transmissão e promover o escoamento de energia necessita dos materiais de montagem eletromecânica. A nomenclatura “eletromecânica” ilustra que além da transmissão de energia elétrica em alta ou média tensão, estes materiais possuem esforços significativos, devido a tração de cabos, peso de equipamentos entre outras finalidades.

2.12.1. Estruturas metálicas ou de concreto

As estruturas de uma subestação são empregadas nos pórticos em que são ancorados os barramentos e a linha de transmissão, bem como nos suportes dos equipamentos de pátio. Os pórticos são estruturas compostas por, no mínimo, duas colunas e uma viga, formando um arco que promove a fixação de outros materiais de montagem, conforme Figura 41.

Figura 41 – Pórticos metálicos do setor de 500 kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Numa SE aplicada em parques eólicos, o mais usual é que os pórticos do setor de 500kV sejam metálicos e os pórticos do setor de 34,5kV sejam de concreto. Já para os suportes de equipamentos do setor de 500kV a demanda é variada entre estruturas de concreto e metálicas, sendo a escolha de acordo com as especificações técnicas de cada transmissora e a questão

financeira de custo das estruturas. No setor de 34,5kV é válido ressaltar que a grande maioria dos equipamentos são fixados na própria estrutura dos pórticos, sendo necessária estrutura dedicada apenas aos disjuntores, por serem os maiores equipamentos. A Figura 42 exemplifica o pórtico de 34,5kV.

Figura 42 – Pórticos de concreto do setor de 34,5 kV de uma SE aplicada em parque eólico



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

Os pórticos possuem a função de sustentação dos cabos e tubos condutores já as estruturas para suporte de equipamentos, como seu nome já sugere, são empregadas para a base de equipamentos e os elevam à altura dos barramentos, respeitando as distâncias elétricas dos estudos de coordenação de isolamento realizados previamente ao projeto executivo da SE. A Figura 43 exemplifica a aplicação das estruturas suportes.

Figura 43 – Estruturas suportes para Chave Seccionadora 500 kV montadas em campo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

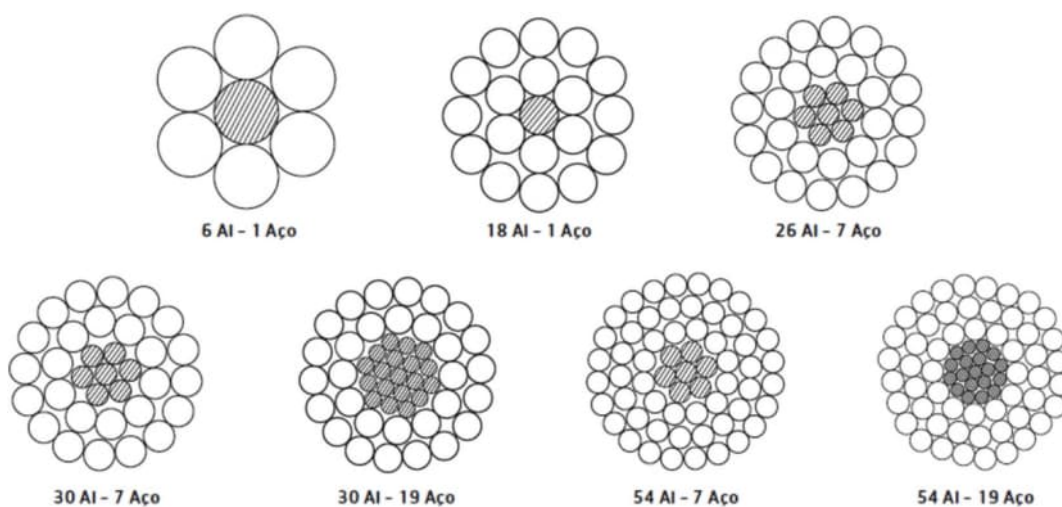
2.12.2. Tubos e cabos condutores

Realizam a conexão elétrica do sistema de transmissão e conduzem potência elétrica ao longo da subestação. Devido ao efeito pelicular dos condutores, há casos em que são empregados tubos para a condução da corrente, contudo, o maior volume é de cabos flexíveis. O metal de maior utilização em condutores elétricos para sistema de potência é o alumínio, devido ao seu baixo custo de mercado, quando comparado ao cobre, intensamente empregado nas instalações prediais, comerciais e industriais (MAMEDE, 2005). Em geral, devido ao ganho de temperatura causado pelo efeito Joule, os cabos de alumínio são nus para aplicação aérea, como no caso da AIS para um parque eólico.

Aplicando estes materiais na subestação para parque eólico, o mais usual é a utilização dos cabos de alumínio flexíveis nos barramentos do pátio de 500 kV bem como na interligação de equipamentos deste mesmo setor e a combinação de cabos flexíveis e tubos de alumínio no setor de 34,5kV, devido a sua maior intensidade de corrente elétrica. Os cabos mais utilizados são os de múltiplas camadas circulares e concêntricas, com alma de aço ou sem, conforme especificados pelas normas ABNT NBR 7270 e ABNT NBR 7271.

São fixados na rede aérea pelos conectores de alumínio e ferragens de cadeia de isoladores (ancoragem ou suspensão) que serão explanados mais a frente deste trabalho. As Figuras 44 e 45 ilustram a forma construtiva e a instalação em campo dos condutores, respectivamente.

Figura 44 – Formações para cabo de alumínio com alma de aço



Fonte: (PRYSMIAN, 2022)

Figura 45 – Cabo de alumínio em instalação em subestação para parque eólico



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

A instalação dos tubos, no setor de 34,5kV é exemplificada pela Figura 46.

Figura 46 – Tubo de alumínio instalado em subestação para parque eólico



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Além dos condutores supracitados, numa SE também se faz presente os cabos de cobre nus para o aterramento da subestação. Devido à grande área e quantidade de equipamentos e estruturas a serem aterrados, usualmente aplica-se uma malha, quadriculada para o aterramento. Os cabos de cobre nus, além da malha, aplicam-se nos rabichos, condutores que interligam as carcaças de equipamentos, estruturas, e outros materiais metálicos à malha de aterramento.

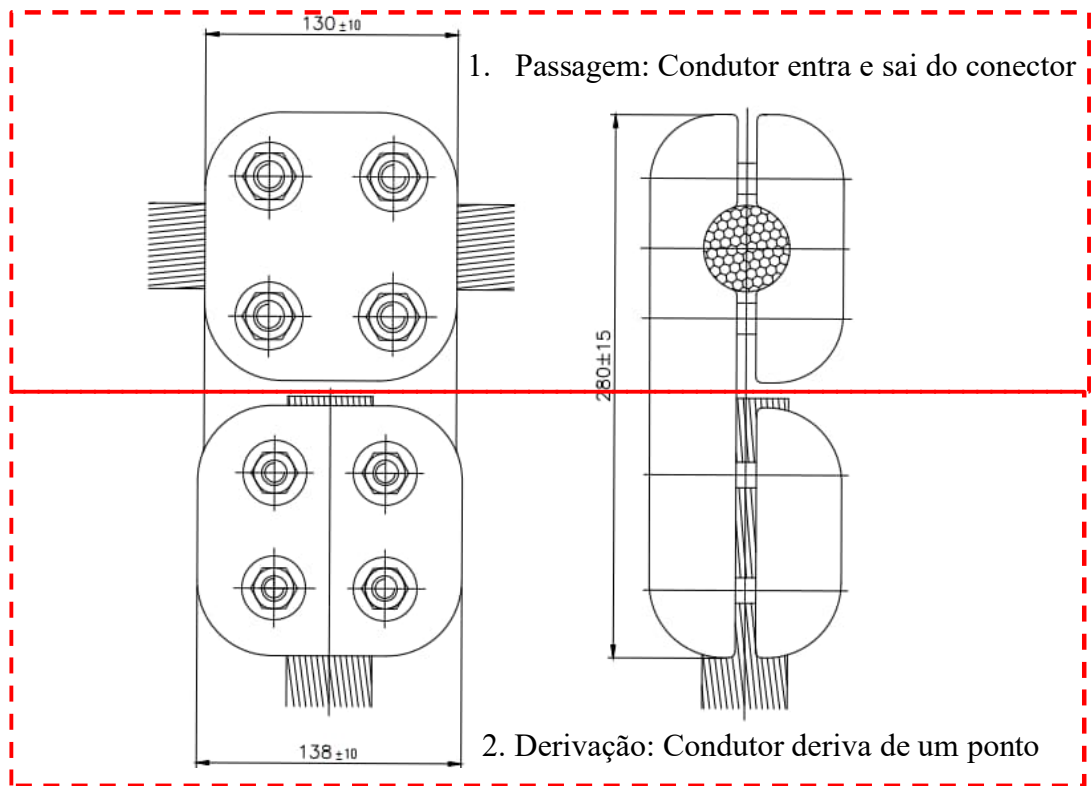
2.12.3. Conectores

Promovem a fixação entre condutores de alumínio e equipamentos, bem como a garantia correta das distâncias entre os condutores, espaçando-os. Os conectores podem ser fabricados em alumínio ou cobre, sendo os mais comuns em subestação para parques eólicos os que utilizam o alumínio como matéria-prima. Seu projeto deve prever o método de instalação de cada cabo e equipamentos, visto que são adquiridos sob medida para cada caso de aplicação. Podem unir tubos, barras, cabos a equipamentos, de acordo com a necessidade do ponto de instalação. Devem ser previstos os esforços aos quais serão submetidos, de acordo com o peso do material instalado, bem como garantir a capacidade de condução de corrente necessária ao sistema de transmissão, ou seja, possuem funções elétricas e mecânicas.

A fixação dos condutores ocorre por meio de nichos projetados para receber os condutores e sua fixação se dá pela prensagem dos nichos por meio de parafusos específicos. A especificação dos conectores pode ser consultada na ABNT NBR 11788. Os conectores são listados de acordo com o projeto eletromecânico da SE e assim adquiridos, conforme sua aplicação. Por serem empregados nas posições onde são instalados os condutores, são encontrados tanto no pátio de 500kV quanto no pátio de 34,5kV de uma subestação aplicada a um parque eólico.

Os conectores, em geral, conforme seu tipo de conexão, sendo os mais comuns para conexão entre cabos, entre tubo e cabo e entre tubo e tubo. Além disso, é levado em consideração a conexão elétrica dos barramentos, a capacidade de condução de corrente suportada pelo conector e se os condutores somente passam pelos condutores, caracterizando uma conexão de passagem, ou derivam um nó elétrico, o que caracteriza uma conexão de derivação. A Figura 47 exemplifica, por meio de um projeto, as conexões de passagem e derivação.

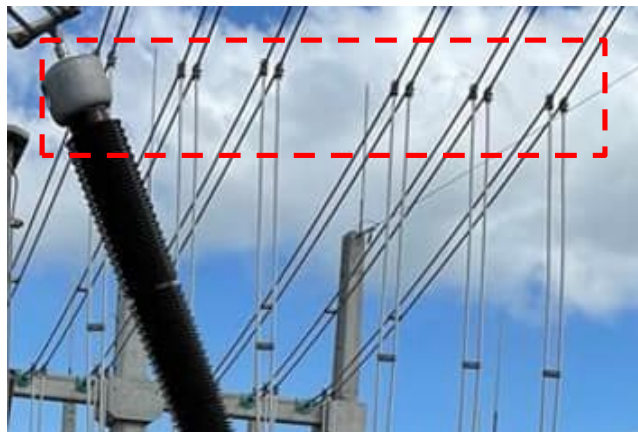
Figura 47 – Projeto de Conector de Alumínio



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Este tipo de aplicação do conector de alumínio na SE para parque eólico, é nomeado de ligação em “T” entre cabo de alumínio simples na passagem e derivação (cabo-cabo). Eletricamente, o conector ilustrado acima opera como um simples nó dentro do circuito de transmissão. A Figura 48 ilustra a instalação do conector supramencionado.

Figura 48 – Conectores instalados no setor de 34,5kV em subestação para parque eólico



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

2.12.4. Isoladores

Os isoladores são elementos sólidos dotados de propriedades mecânicas capazes de suportar os esforços produzidos pelos condutores. Eletricamente, exercem a função de isolar os condutores submetidos a uma diferença de potencial em relação à terra (estrutura suporte) ou em relação a um outro condutor de fase (MAMEDE, 2005).

Na aplicação de uma subestação para parque eólico, estes materiais possuem função de suporte de equipamentos, suporte de condutores, suspensão e ancoragem de cadeias de isoladores, garantindo a que não haja fuga de corrente para a terra, ou quebras do dielétrico do ar. São categorizados em isoladores de apoio e isoladores de suspensão, ou seja, a primeira categoria caracteriza esforços de compressão enquanto a outra de tração, sendo ambas as categorias presentes numa SE.

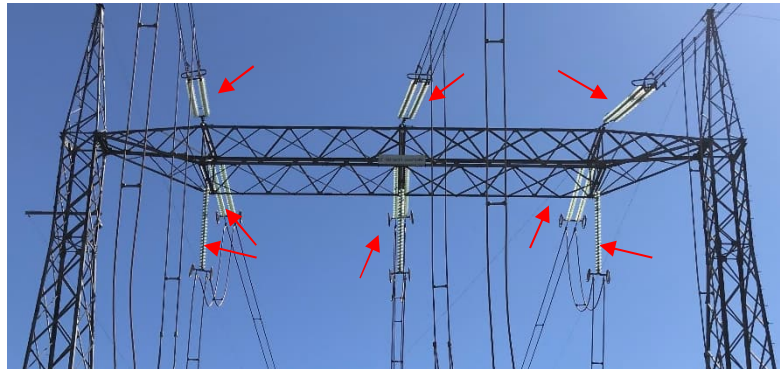
A matéria-prima utilizada para a fabricação destes materiais são a cerâmica (porcelana), vidro e polímeros como o epóxi. Numa SE para parque eólico o usual é que tenhamos os isoladores de apoio, também chamados como isoladores de pedestal em material cerâmico e isoladores de suspensão e ancoragem, também chamados como isoladores de disco, em vidro ou material polimérico. Os isoladores de pedestal são utilizados na sustentação de barramentos no pátio de 500kV e de 34,5kV e nos suportes dos equipamentos. Já os discos são associados às ferragens de cadeia que veremos mais adiante neste trabalho, com a função de sustentar, por suspensão e ancoragem, condutores que são fixados nas estruturas dos pórticos e são alocados de forma horizontal. As Figuras 49 e 50 exemplificam a aplicação dos isoladores em campo.

Figura 49 – Isoladores de Pedestal em pátio de 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 50 – Isoladores de disco em pátio de 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

2.12.5. Ferragens de fixação de cadeia de isoladores de disco

São materiais utilizados associados às estruturas metálicas ou de concreto dos pórticos da subestação. Possuem a função de fazer a fixação dos condutores horizontais nas estruturas e suportar os esforços originados deles. Para garantir a isolação destes condutores de forma que não haja faiscamento com as estruturas (Condução de corrente pelo ar), são associados aos isoladores de disco que permitem distanciar os condutores das estruturas. Não possui função elétrica no sistema, sendo somente solicitada por esforços mecânicos.

Além da fixação dos condutores de transmissão de energia, também fixam o cabo para-raios das estruturas metálicas, cabos estes com a função de proteção contra descargas atmosféricas, instalados nas extremidades das estruturas. A Figura 51 demonstra a aplicação das ferragens de fixação.

Figura 51 – Isoladores de disco associados às ferragens de fixação do barramento



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

2.12.6. Cabos de força e controle

Tendo em vista o sistemas instalados na casa de comando e cada respectiva comunicação com o pátio, temos a presença de diversos tipos de cabos de baixa tensão na subestação. São utilizados tanto para os circuitos de força (alimentação) dos equipamentos e sistemas como no circuitos de controle dos painéis dos equipamentos e sistemas da SE.

Em geral, utilizam-se cabos de várias veias, ou seja, um único cabo possui internamente ao seu isolamento vários cabos agrupados. Seu dimensionamento é baseado nos métodos clássicos de cálculo de critério de capacidade de corrente, queda de tensão e suportabilidade de curto-circuito, da mesma forma como são projetados nas instalações prediais e industriais.

São utilizados no envio dos sinais dos equipamentos para casa de comando, bem como na comunicação para atuação de proteções e sinais de controle. Além disso, também são empregados nos circuitos de iluminação e tomadas da casa de comando e demais edificações de uma subestação e o material condutor utilizado é o cobre.

Para a aplicação de uma subestação e a conexão entre equipamentos e painéis, o método de instalação usado é subterrâneo e os cabos são alocados em canaletas de alvenaria executadas para este fim, com o intuito de realizar o encaminhamento dos cabos entre pátio e casa de comando. A Figura 52 ilustra um cabo de força e controle.

Figura 52 – Cabos de força e controle 4x6mm²



Fonte: (ELETROMAC, 2022)

2.12.7. Fibras ópticas

Com a função de envio de informações entre sistemas digitais, as fibras ópticas estão presentes na SE na interligação entre relés e principalmente no sistema de telecomunicações. Em geral, os painéis da SE, sejam do SPCS, sistema de telecomunicações, medição de

faturamento ou retificadores, trocam informações entre si e com o supervisor, conjunto de telas que mostram a partir de interface homem-máquina os parâmetros do sistema.

As fibras ópticas estão presentes também na linha de transmissão, no sistema OPGW, como já explanado anteriormente e a conexão das fibras da linha de transmissão com o sistema de telecomunicações se dá por meio de mais fibras ópticas que levam os sinais à casa de comando.

As fibras ópticas não são de fácil união como um cabo elétrico. Sua emenda é mais complexa e o processo é chamado de fusão de fibra óptica. Este processo ocorre somente na caixa de emenda, painel instalado no pátio em que os sinais do cabo OPGW ficam disponibilizados e a fusão com as fibras ópticas internas da SE são necessárias.

Para a conexão entre painéis, entre relés, entre outras comunicações via fibra óptica interna à casa de comando, as fibras são na verdade cordões óticos, já fabricados com o comprimento e conectores pré-estipulados. Em geral, são utilizados os conectores do tipo ST, LC e SC e ambas as pontas da fibra óptica são conectorizadas ainda em fábrica e a especificação do conector a ser utilizado depende da entrada disponível no equipamento em que será conectada a fibra óptica. As Figuras 53, 54 e 55 exemplificam os conectores para fibras ópticas.

Figura 53 – Conector ST para fibra ótica



Fonte: (NEXTCABLE, 2022)

Figura 54 – Conector LC para fibra ótica



Fonte: (NEXTCABLE, 2022)

Figura 55 – Conector SC para fibra ótica



Fonte: (NEXTCABLE, 2022)

3. Implantação

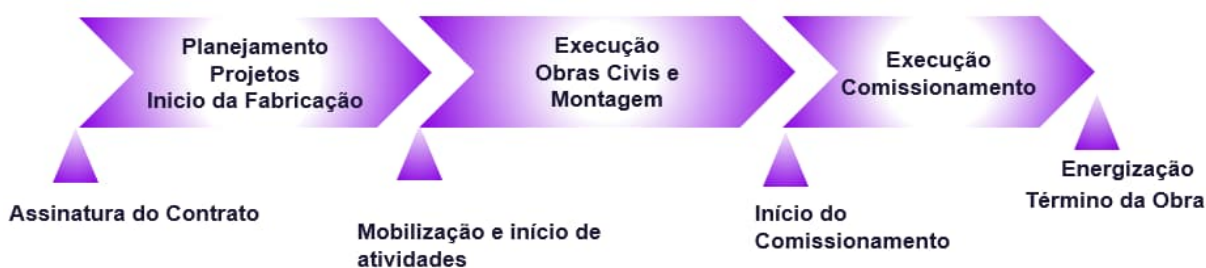
A finalidade dos materiais e equipamentos explanados no capítulo anterior é servir de insumo para a implantação da subestação isolada a ar, aplicada a um parque eólico. Todos os equipamentos devem ser instalados em campo e a infraestrutura necessária deve ser executada para que permita a instalação, de forma a ser possível a operação. Portanto, uma série de atividades relacionadas à engenharia civil são necessárias. O produto da união das obras civis, equipamentos e materiais instalados e testes de comissionamento é a energização da subestação e sua respectiva entrada em operação.

O início da fase de implantação da SE é considerado a partir da liberação do terreno para a execução. Atividades preliminares ao início da execução são necessárias, como a compra do terreno onde a subestação será implantada, o licenciamento ambiental da área junto aos órgãos competentes, elaboração de projetos executivos e sua respectiva aprovação pela transmissora, aquisição, fabricação e entrega de materiais e equipamentos e a contratação da mão de obra que desenvolverá essa atividade, são os exemplos mais comuns e serão detalhados a frente.

A mão de obra necessária para a execução compreende tanto pessoas quanto maquinários. Os exemplos de maquinários são diversos. São necessários caminhões betoneiras para a entrega do concreto, caminhões Munck para o içamento de equipamentos para a respectiva montagem, caminhões caçamba para o transporte de terra para reaterro de fundações e execução de terraplenagem, entre outros.

A implantação de uma subestação se dá de forma vertical, de baixo para cima, ou seja, as primeiras atividades a serem executadas envolvem o solo vão subindo a subestação conforme andamento da obra. O sequenciamento ideal de obra pode ser descrito pela Figura 56.

Figura 56 – Sequenciamento de execução da subestação



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Em um contrato de empreitada global, como veremos mais a frente neste trabalho no capítulo de gerenciamento de projetos, a solução ofertada e vendida é um pacote fechado, contendo um preço global para todos os serviços, equipamentos e materiais envolvidos na execução, desde sua especificação e projetos, até a energização.

3.1. Especificações Técnicas, Projetos Executivos e Estudos Elétricos Básicos

Uma das fases preliminares à execução, o período de especificação, elaboração de projetos e estudos elétricos compreende a definição da solução vendida. Obviamente, estudos preliminares são feitos para a contratação de uma SE e são chamados de projeto básico, que é refinado e definido, de fato, após o início de um contrato.

Em geral, as transmissoras possuem seus próprios padrões e estes são vinculados ao contrato em modelo de empreitada global e devem ser seguidos para o projeto de equipamentos, fundações, suportes, estruturas, entre outros materiais. Subdividindo este capítulo, é possível identificar com o que cada atividade se relaciona.

1. Especificações Técnicas: São documentos elaborados pela própria transmissora que definem os parâmetros, tipos, categorias, formas construtivas e acessórios dos equipamentos e sistemas a serem instalados na subestação;
2. Projetos Executivos: Compreendem os projetos civis, eletromecânicos e elétricos a serem implementados na fase de execução;
3. Estudos Elétricos Básicos: Por meio de simulações computacionais, calculam-se os parâmetros elétricos do sistema de transmissão e definem os parâmetros elétricos aos quais os equipamentos de transmissão devem atender, como corrente nominal por exemplo.

É válido ressaltar que as especificações técnicas andam em conjunto com os estudos elétricos básicos. No caso de uma especificação técnica divergir do estudo elétrico básico, o que define a solução a ser adotada é o estudo elétrico.

Cada equipamento possui especificação técnica própria e detalhada, a fim de evitar qualquer divergência, durante sua fabricação, do padrão estabelecido pela transmissora.

Os estudos elétricos básicos, de forma geral, compreendem o cálculo e demonstrações do atendimento dos equipamentos ao sistema e seus parâmetros, como valores máximos e mínimos de corrente e tensão, transitórios elétricos e eletromagnéticos, campos eletromagnéticos na

região dos pátios da subestação, entre outros parâmetros que os equipamentos devem suportar para a operação segura do sistema. Inicialmente, os insumos necessários para a elaboração dos estudos são os valores de especificação técnica de equipamentos, que são confirmados pelos estudos. Na fase de testes de aceitação em fábrica dos equipamentos, os parâmetros são novamente checados para garantia do atendimento ao sistema. O pacote de estudos elétricos básicos usualmente compreende:

- Estudos elétricos na frequência fundamental: São os cálculos do fluxo de carga, operação do parque eólico à vazio, fator de potência no ponto de conexão com o SIN, rejeição de carga das linhas de transmissão ao redor da conexão com o SIN e energização da linha de transmissão, todos em regime permanente;
- Fluxo de potência nos barramentos: Cálculo das correntes máximas nos barramentos e capacidade de corrente dos condutores de transmissão às mesmas, de forma a não limitar o pleno uso, inclusive futuro (ampliações), dos barramentos;
- Estudo de curto-circuito: Cálculo das correntes de curto-circuito na subestação e instalações adjacentes, visando avaliar o atendimento dos parâmetros aos limites pré-estabelecidos pela ANEEL;
- Estudo de religamento tripolar, energização e rejeição de carga na linha de transmissão: Cálculo das máximas tensões durante o transitório de manobras de religamento tripolar, energização e rejeição de carga da linha de transmissão e dos barramentos;
- Manobra de energização dos transformadores: Cálculo das solicitações de tensões, correntes e energias decorrentes da energização dos transformadores, fornecendo subsídios para a especificação dos equipamentos a serem instalados nas subestações, bem como identificar situações potencialmente problemáticas, indicando ainda se há ou não a necessidade de medidas mitigadoras como resistores de pré-inserção ou sincronizadores;
- Tensão de reestabelecimento transitória (TRT) nos disjuntores da linha de transmissão e transformadores de potência AT/MT: Cálculo das TRTs aplicadas às manobras dos disjuntores da linha de transmissão e dos transformadores do empreendimento, bem como quantificar os valores das correntes assimétricas decorrentes de curtos-circuitos;

- Coordenação de isolamento: Demonstração do atendimento às características elétricas básicas conforme diretrizes do ONS, visando avaliar as sobretensões que atingem os equipamentos das entradas de linha e do interior da subestação em função da ocorrência de descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão e de média tensão a ela conectada. Os resultados dessa análise estabelecem os níveis básicos de isolamento (NBI) dos equipamentos dessa subestação, bem como as características nominais dos para-raios e recomendações quanto à sua localização na instalação;
- Cálculo de campo elétrico e magnético na área da subestação: Análise da exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários das instalações da subestação SE Rio do Vento Expansão, na frequência de 60 Hz, em atendimento às exigências das Resoluções Normativa ANEEL nº 398 de 23 de março de 2010 e nº 616 de 01 de julho de 2014, a partir do cálculo dos níveis de campos elétrico e magnético;
- Estudo de religamento monopolar: Avaliação da extinção do arco secundário de forma a viabilizar o religamento monopolar sem comprometer o desempenho do sistema. Outro enfoque deste estudo é a verificação das sobretensões transitórias de manobra para o religamento monopolar;
- Estudo de saturação dos transformadores de corrente: Cálculo dos valores das características elétricas básicas necessárias para especificação de transformadores para instrumentos de corrente, de pedestal e de bucha do transformador 34,5/500 kV;
- Estudos de coordenação de proteção e seletividade: Estudos realizados para cada painel com a finalidade de definir a parametrização e ajustes dos relés de proteção garantindo a coordenação da proteção.

Os projetos executivos, divididos nas disciplinas de civil, eletromecânica e elétrica são os projetos tradicionais. Fazem parte deste grande pacote de documentos técnicos os desenhos, memoriais de cálculos e listas de materiais a serem adquiridos.

Os projetos civis compõem a parte mais pesada de infraestrutura da subestação e em geral são identificados pela movimentação de terra ou utilização de concreto e são parte deste pacote:

- Terraplenagem: Planta, cortes e detalhes;

- Fundações e bases de equipamentos: Memoriais de cálculo, desenho de detalhamento de cada fundação e base, listas de materiais e planta de locação contendo todas as fundações;
- Drenagem de águas pluviais e oleosa para transformador: Planta, detalhes e listas de materiais;
- Parede corta-fogo para transformadores de potência: Memória de cálculo estrutural, desenho de detalhamento e lista de material;
- Edificações: Memória de cálculo estrutural, desenho arquitetônicos e estruturais e listas de materiais;
- Canaletas: Memória de cálculo estrutural, detalhamento e listas de materiais;
- Urbanização: Memoriais de cálculo, detalhamento e listas de materiais;

Os projetos eletromecânicos compreendem:

- Arranjo físico geral: Planta e cortes;
- Malha de aterramento: Planta, detalhes e lista de material;
- Sistema de proteção contra descargas atmosféricas: Planta, detalhes e lista de material;
- Detalhes de instalação de equipamentos e barramentos: Desenho de detalhamento e lista de material;
- Diagramas de esforços de estruturas de pórticos e suportes de equipamentos: Planta de detalhamento e memoriais de cálculo;
- Projetos de fabricação de estruturas metálicas e/ou de concreto: Detalhamento e memorial de cálculo;
- Iluminação e tomadas de pátio: Planta geral, detalhes e lista de materiais;
- Infraestrutura para telecomunicações: Planta, detalhes e lista de material.

Os projetos elétricos compreendem:

- Diagrama unifilar básico;
- Diagrama unifilar de medição de proteção;
- Diagrama unifilar de serviços auxiliares CA;
- Diagrama unifilar de serviços auxiliares CC;
- Memoriais de cálculo para dimensionamento das potências dos serviços auxiliares CA e CC;

- Dimensionamento dos cabos de baixa tensão, Diagramas de interligação e listas de cabos de acordo com cada painel da subestação.

Todos os projetos acima, quando considerados como um único grupo, são nomeados de projeto executivo da subestação e estes contêm todos os cálculos, desenhos e listas de materiais a serem adquiridos para a execução de uma subestação, bem como uma SE aplicada a um parque eólico. Outros projetos e cálculos podem ser necessários de acordo com o andamento do projeto, porém é uma situação caso a caso. Dessa forma, pode-se considerar toda a listagem acima como o básico necessário para o projeto executivo da SE.

3.2. Obras Civas

As obras civis podem ser caracterizadas como a infraestrutura da subestação. Nesta etapa, serão executados os serviços que envolvem principalmente a movimentação de terra e utilização de concreto. São as atividades iniciais de execução e todas as construções são projetadas para suportar todos os esforços de apoio gerados pelo peso de estruturas, equipamentos e material acima das bases e fundações.

Iniciam-se pela terraplenagem, atividade esta que após concluída, libera frente de serviço às demais obras civis. Usualmente, as atividades civis iniciam-se pelas maiores fundações, sendo elas as fundações de pórticos e transformadores e pelas atividades relacionadas à casa de comando por ser o escopo de execução mais longo e trabalhoso.

3.2.1. Terraplenagem

A primeira atividade civil a ser prevista no cronograma de execução é a terraplenagem. A partir do levantamento topográfico e caracterização do solo por meio de campanhas de sondagens, define-se o projeto a ser executado. O objetivo da terraplenagem é nivelar horizontalmente o solo, de modo que possa receber as fundações e demais estruturas. A área da subestação após a conclusão da terraplenagem é nomeada de platô da subestação.

Geograficamente, a grande maioria das subestações aplicadas em parques eólicos estão situadas na região nordeste, local onde o solo é por muitas vezes rochoso. A implicação deste fator é a solução a ser adotada para a terraplenagem na fase de execução. Em geral, utiliza-se material externo à área da subestação para a realização de aterro, de forma a subir o nível do terreno e evitar a escavação em rocha, visto a dificuldade para execução e maquinários específicos deste tipo de escavação. Quando necessária a escavação em rocha, utilizam-se

explosivos, tornando a atividade de maior risco às pessoas que trabalham na obra, além de algo burocrático que envolve, inclusive, o licenciamento e posterior liberação do exército para sua execução.

Os pontos a serem levados em consideração para a execução da terraplenagem são: o volume de solo a ser cortado, aterrado e descartados em caso de presença de matéria orgânica. Os maquinários utilizados para a execução deste serviço são: motoniveladora, caminhão basculante, rolo compactador e caminhão pipa para umectação do solo. Em geral, devido à baixa disponibilidade de material de boa qualidade para a realização do aterro, a terra é escavada em local diferente da subestação e transportada até o platô para ser utilizada para aterro.

A execução da terraplenagem inicia-se com a raspagem da camada vegetal do solo, também chamada de supressão vegetal, e ocorre tanto na forma manual com a utilização de motosserras quanto mecanizada com o uso de maquinários. Este material é geralmente descartado pois não tem a propriedade mecânica necessária para o apoio das fundações.

O próximo passo é o corte, onde há a retirada do material que possui maior cota de altura em relação ao desejado.

Por último ocorre o aterro, fase em que o material externo é empregado e compactado em camadas, geralmente de vinte em vinte centímetros para que ocorra boa compactação. O sequenciamento das atividades é ilustrado nas Figuras 57, 58, 59 e 60.

Figura 57 – Supressão vegetal



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2021)

Figura 58 – Corte de solo



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 59 – Execução de aterro



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 60 – Platô concluído e liberado para demais atividades



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.2.2. Fundações

As fundações são responsáveis por suportar os carregamentos exigidos dos esforços a que são solicitadas. De forma simplória, deve suportar a força peso dos equipamentos e materiais instalados sob apoio em sua estrutura.

Todos os equipamentos e respectivos suportes, pórticos, edificações e parede corta-fogo possuem fundações projetadas para atender aos seus respectivos carregamentos.

As peculiaridades da execução deste escopo da subestação ficam junto aos transformadores, seja o 34,5/500 kV ou de serviços auxiliares. Nestes equipamentos, anexa à cada fundação, é prevista e projetada uma bacia de captação de óleo em caso de vazamentos do equipamento e estas são interconectadas ao sistema de drenagem que será explanado à frente. A Figura 61 exemplifica a execução da fundação e bacia de captação de óleo para transformador 34,5/500 kV.

Figura 61 – Execução de bacia de captação de óleo e base para Transformador 34,5/500 kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Os tipos de fundações comumente empregados na execução são as sapatas e tubulões. As sapatas, de forma usual, são compostas de duas partes: base e fuste, envolvendo duas etapas de concretagem. Já os tubulões envolvem uma única etapa de concretagem.

As atividades para a execução das fundações em sapata, de forma sequenciada são:

1. Locação da fundação: Medição dos pontos onde serão executadas as fundações e respectiva marcação no solo;
 2. Escavação: Utilização de maquinário, como retroescavadeira, para escavar o volume de terra onde será instalada a fundação no solo;
 3. Regularização do fundo de cava: Nivelamento do fundo do buraco da escavação com a utilização de concreto não estrutural, de forma a possibilitar o apoio da armação metálica de forma horizontal;
 4. Montagem da armação: Instalação e amarração da ferragens para o concreto armado da sapata;
 5. Montagem da forma: Instalação de formas em madeirite ou placas metálicas para lançamento do concreto;
 6. Concretagem: Lançamento do volume de concreto, por meio de caminhões betoneira;
 7. Desforma e reaterro: Retirada das formas e reaterro com a terra previamente escavada;
- As Figuras 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68 e 69 ilustram o sequenciamento de execução da fundação em sapata.

Figura 62 – Locação de Fundação de Pórtico 500kV concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 63 – Escavação de Fundação de Pórtico 500kV concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 64 – Regularização de fundo de cava de Fundação de Pórtico 500kV concluído



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 65 – Instalação de armação de Fundação de Pórtico 500kV concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 66 – Instalação de forma da base de Fundação de Pórtico 500kV aguardando escoramento



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 67 – Concretagem de Fundação de Pórtico 500kV em andamento



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 68 – Desforma de fustes de Fundação de Pórtico 500kV Concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 69 – Reaterro de Fundação de Pórtico 500kV concluído



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Os tubulões são mais simples de serem executados. Nestas fundações, a própria terra é utilizada como forma do concreto lançado, portanto, não há a etapa de montagem de forma e desforma após concretagem. A escavação é realizada com perfuratriz, formando uma fundação circular e mais profunda. Não há necessidade da regularização do fundo de cava, pois o concreto ainda molhado irá se adequar ao formato do solo e a perfuratriz, apenas de deixar ainda pequenas imperfeições, já realiza a escavação nivelando o fundo de cava. A Figura 70 exemplifica a escavação de tubulão.

Figura 70 – Escavação de tubulão a partir de perfuratriz para fundação de pórtico de 34,5kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Além de todas as etapas supramencionadas para a execução das fundações, é válido ressaltar que após a concretagem há um período de 72 horas para o processo de secagem e cura do concreto.

3.2.3. Drenagem

Possuem a função de escoamento de águas pluviais e são interconectados ao sistema de captação de óleo da bacia, contemplando a drenagem oleosa. O escopo de drenagem pode ser dividido em quatro partes:

1. Meia-cana para taludes
2. Drenagem de águas pluviais;
3. Drenagem oleosa;
4. Caixa Separadora de Água e Óleo.

Basicamente, é um sistema composto por tubulações soterradas e interligadas, responsáveis por drenar a água das chuvas e, no caso da drenagem oleosa, levar o óleo dos transformadores, em caso de vazamento, até a caixa separadora de água e óleo.

Já a meia-cana, instalada para a proteção dos taludes (encosta da terraplenagem), não é soterrada e opera como uma valeta para escoamento da água.

Os maquinários utilizados para sua execução são retroescavadeiras para a execução das escavações e caminhões Munck, para o posicionamento das peças instaladas. As Figuras 71, 72 e 73 exemplificam a execução da drenagem.

Figura 71 – Drenagem de águas pluviais em execução



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2020)

Figura 72 – Caixa separadora de água e óleo para transformadores em execução



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2020)

Figura 73 – Meia-cana dos taludes



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2020)

3.2.4. Parede corta-fogo

Em caso de incêndio nos transformadores de potência, deve ser prevista uma parede corta-fogo, visando dificultar que as chamas de um transformador danifiquem o que está ao seu lado. A necessidade de execução da parede corta-fogo está atrelada a distância entre transformadores e, em caso de atendimento à distância mínima prevista em norma, não é necessária sua execução.

Em geral, são utilizados materiais pré-moldados para as colunas e placas de fechamento da parede, tornando-a de execução mais ágil e eficiente.

Para sua execução, inicialmente realiza-se sua fundação, e em sequência instalam-se os pilares nos nichos, já preparados para o recebimento destes pilares. Após a montagem dos pilares, há o içamento e encaixe das placas entre os pilares. Por fim, há o acabamento nas junções entre placas. As Figuras 74, 75, 76 e 77 exemplificam a execução da parede corta-fogo.

Figura 74 – Execução da fundação para parede corta-fogo pré-moldada



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 75 – Instalação dos pilares pré-moldados



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 76 – Içamento e encaixe das placas pré-moldadas



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 77 – Parede corta-fogo concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.2.5. Edificações

A execução das edificações é muito similar ao de uma casa residencial comum, com algumas particularidades. A execução é conforme projeto, podendo ser utilizada alvenaria convencional ou materiais pré-moldados.

Como já citados em itens anteriores, inicialmente executam-se as fundações. A aplicação mais comum no mercado atualmente e muito aplicada à parques eólicos é a utilização de pré-moldados para a execução de pilares, vigas, placas de fechamento e lajes.

As edificações mais comuns em uma SE aplicada a um parque eólico são:

1. Almoxarifado para armazenagem de equipamentos e peças sobressalentes;
2. Guarita ou portaria para controle de entrada na subestação;
3. Casa de comando para instalação de painéis e sistema supervisório.

No caso da guarita e da casa de comando, são previstas instalações hidrossanitárias (banheiros), visto a presença de pessoas durante a operação. Estes são executados em linha com a construção de casas residenciais. Além destas instalações, também são necessárias instalações elétricas prediais para a aplicação de circuitos de tomada e iluminação.

A grande particularidade está na casa de comando, edificação mais importante da subestação, sendo a aplicação de piso elevado e malha de aterramento para painéis tais diferenças. O piso elevado possui a função de elevar o apoio dos painéis, permitindo a entrada dos cabos de baixa tensão por baixo das vigas de fechamento inferiores, ou vigas baldrame, como comumente chamadas.

A instalação dos pilares pré-moldados ocorre de forma idêntica aos pilares da parede corta-fogo. Portanto, são içados e encaixados nos nichos das fundações. Após o encaixe há a aplicação de graute, um material mais fluido a base de cimento que permite acabamentos e possui alta resistência, de forma a unir os pilares às fundações. Após esta etapa, são içadas e instaladas as vigas e em seguida as placas de fechamento que também são fixadas com a utilização de graute. A seguir, há o içamento e posicionamento e fixação das lajes. As demais atividades da casa de comando são os acabamentos, pintura, instalação de iluminação e sistema hidrossanitário.

Os maquinários utilizados para sua execução são retroescavadeiras para a execução das escavações e caminhões Munck, para o posicionamento das peças instaladas. As Figuras 78, 79, 80, 81 e 82.

Figura 78 – Fundação da Casa de Comando



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 79 – Instalação de pilares pré-moldados da Casa de Comando



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 80 – Instalação de vigas pré-moldadas da Casa de Comando



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 81 – Execução de fechamento em alvenaria da Casa de Comando



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 82 – Casa de Comando concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.2.6. Canaletas

Utilizadas para a alocação dos cabos de baixa tensão entre casa de comando e equipamentos. As canaletas são estruturas instaladas de forma subterrânea e projetadas de forma a receberem todos os cabos necessários respeitando a curvatura e a taxa de ocupação de acordo com a quantidade de cabos instalados em cada trecho.

Inicialmente, para sua execução, deve-se realizar a escavação em seu traçado, de forma a permitir a execução, seja em alvenaria ou peça pré-moldada. Usualmente é muito aplicada em

subestações para parques eólicos a solução mais empregada são as canaletas pré-moldadas. Nesta filosofia construtiva há maior velocidade de execução, pois não há a necessidade de instalar blocos de concreto um a um. As canaletas são pré-fabricadas, içadas e locadas nas valas e recebem acabamento na emenda entre peças.

Os maquinários utilizados para sua execução são retroescavadeiras para a execução das escavações e caminhões Munck, para o posicionamento das peças instaladas. As Figuras 83, 84 e 85 exemplificam a execução das canaletas.

Figura 83 – Escavação para instalação de canaletas



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

Figura 84 – Peças pré-moldadas para canaletas instaladas



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 85 – Canaletas concluídas e em recebimento de cabos de baixa tensão



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

3.2.7. Urbanização

Nesta fase de execução são realizadas as atividades que dão o acabamento geral à subestação. São previstas as execuções de cercamento para área energizada, delimitação de área de propriedade com cercas ou muros, pavimentação e britagem do pátio. São as últimas atividades de obras civis a serem executadas, visto a necessidade de proximidade de conclusão da subestação para sua execução.

No caso da pavimentação, são executadas ruas para entrada de veículos e maquinários de manutenção, bem como calçadas para trânsito de pedestres.

A britagem, além da função de acabamento, possui também função de proteção contra choques elétricos, visando aumentar a camada superficial dielétrica de solo entre o passo humano e a malha de aterramento. As Figuras 86 e 87 exemplificam o projeto de urbanização.

Figura 86 – Muro de fechamento em execução



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 87 – Arruamento e britagem da subestação concluídos



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.3. Montagem Eletromecânica e Elétrica

Após a conclusão das obras civis, mesmo que de forma parcial, podem ser iniciadas as montagens eletromecânicas de acordo com cada frente de trabalho que é concluída. Tais atividades são compreendidas como o posicionamento, fixação e ajustes de estruturas de pórticos, barramentos e cabos aéreos, cabos de baixa tensão subterrâneos, equipamentos e respectivos suportes.

Nesta fase de execução, a obra de uma subestação toma forma, sendo a característica mais marcante desta fase a verticalização da subestação.

Além da montagem eletromecânica, também há as montagens elétricas. Nelas estão compreendidos os lançamentos dos cabos nas canaletas, elaboração dos terminais dos cabos e respectiva conectorização aos painéis.

3.3.1. Montagem de Pórticos

Costumeiramente, são as primeiras fundações executadas e são a primeira frente de serviço de montagem aberta na execução de uma subestação. A montagem dos pórticos envolve uma grande demanda de trabalho humano e de maquinários.

Quando da utilização de estruturas metálicas, o projeto comumente utiliza do conceito de treliças para a fabricação das estruturas. Portanto, são estruturas ricas em detalhes e que necessitam de uma grande demanda de trabalho para serem montadas. Inicialmente, são pré-montadas ainda no solo em trechos, e após conclusão desta etapa são verticalizadas por meio de guindaste que içe os trechos das estruturas, posteriormente fixadas por recursos humanos, trabalhando em altura.

É previsto ainda nas fundações as peças que fixam os apoios dessas estruturas metálicas e tais peças são chamadas chumbadores. São posicionadas e alinhadas na fundação no momento da concretagem e no início da montagem fornecem o apoio para a estrutura a ser montada. São grandes parafusos concretados junto a fundação e serão encaixados e aparafusados na furação já prevista no ponto de apoio da estrutura. A fixação entre peças das estruturas é realizada com o emprego de parafusos e arruelas. A Figura 88 ilustra a aplicação dos chumbadores.

Figura 88 – Chumbadores concretados junto à fundação de pórtico 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

No caso das estruturas de concreto, a montagem é diferente. A montagem de seus pilares é idêntica à execução dos pilares pré-moldados para a casa de comando e parede corta-fogo. Já na vigas, são previstos capitéis, ou também chamados de anéis, para o travamento das vigas. Portanto, ocorre a verticalização e grauteamento dos pilares e em seguida o primeiro anel é içado e grauteado. Na sequência há o içamento e encaixe da viga seguido de outro anel que trava a estrutura.

Os mesmos procedimentos para os pilares da casa de comando e parede corta-fogo são empregados na montagem de suportes de equipamentos.

As figuras 89, 90, 91 e 92 exemplificam a montagem dos pórticos metálicos e de concreto.

Figura 89 – Pré-montagem de pórtico metálico para setor de 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 90 – Içamento, verticalização e montagem de trecho metálico de pórtico 500 kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 91 – Içamento, verticalização e fixação de pórtico 34,5 kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

Figura 92 – Pórtico 34,5kV em concreto com montagem em fase final



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

3.3.2. Montagem de Barramentos

Tendo em vista a montagem dos pórticos concluída, visto a necessidade de ancoragem dos cabos aéreos nestas estruturas, libera-se em seguida uma frente de trabalho de montagem de barramentos. Os cabos são entregues em obra enrolados em bobinas de madeira, portanto devem ser cortados seguindo as medidas de projeto previamente à montagem. Além disso, por serem enrolados na bobina, adquirem conformação mecânica da embalagem e para a solução

deste caso, após o corte do cabo, estes são posicionados no solo, já em campo, para que percam tal característica.

Inicialmente, são montadas em solo as ferragens de fixação em conjunto com os isoladores de disco, materiais estes que fazem a conexão entre estrutura do pórtico e cabos aéreos. Após a fixação das ferragens o respectivo cabo é içado e conectado às ferragens.

Fora os barramentos aéreos, tão são realizadas as conexões entre equipamentos e descidas de cabos dos barramentos aos equipamentos. Para estas atividades, utilizam-se os conectores de alumínio em detrimento das ferragens de cadeia de isoladores. Contudo, para que a conexão nos equipamentos seja realizada, é necessário que o respectivo equipamento já esteja montado, para que esteja disponibilizado seu terminal para a conexão das interligações e descidas de cabo (ou pingados, como comumente chamados).

Os maquinários utilizados para estas atividades de montagem são os caminhões Munck, para realizar o içamento dos materiais e as plataformas elevatórias, responsáveis por elevar o recurso humano que fará o torqueamento correto nos parafusos, montagem de abraçadeiras, entre outras atividades manuais. As Figuras 93 e 94 ilustram a montagem dos barramentos.

Figura 93 – Montagem de barramento do setor 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 94 – Montagem de barramento do setor de 34,5kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.3.3. Montagem de Equipamentos

Cada equipamento é montado em sua base ou estrutura, de acordo com projeto de detalhe de instalação além de possuírem características específicas de montagem. As montagens mais peculiares e que envolvem maiores detalhes, ficam a cargo dos transformadores de potência 34,5/500 kV, disjuntores e chaves seccionadoras. Possuem uma grande quantidade de peças a serem montadas, pois não são entregues prontos para a instalação.

No caso do transformador, peças como os radiadores, buchas do lado de alta e baixa tensão, bucha de neutro e demais acessórios são entregues em obra desmontados a fim de viabilizar o transporte e somente são montados novamente em campo, com orientação do supervisor de montagem do fabricante. A mesma característica é válida para as chaves seccionadoras e disjuntores. Além da especificidade de montagem, alguns testes principais já são realizados nesta fase, bem como a regulagem dos equipamentos.

Com exceção dos equipamentos supracitados, os equipamentos de pátio como transformadores de instrumento e para-raios necessitam somente de içamento e fixação dos parafusos junto à estrutura suporte já montada.

Com a fixação dos equipamentos em suas respectivas bases e suportes já concluídas, são montadas as infraestruturas eletromecânicas. Nesta etapa estão compreendidas as atividades de montagem de eletrodutos de aço galvanizado para descida dos cabos de força e controle,

conexão de cabos entre polos, instalação de armários de comando e rabichos da malha de aterramento (caso a malha de aterramento esteja disponível para execução do rabicho). As Figuras 95, 96 e 97 ilustram as montagens dos equipamentos mais complexos da subestação.

Figura 95 – Montagem de Transformador 34,5/500 kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 96 – Montagem de Seccionadora 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 97 – Montagem de Disjuntor 500kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

No caso dos equipamentos do setor de 34,5kV as etapas e necessidades para montagem são similares ao setor de 500kV, contudo, numa menor amplitude de esforços. Os equipamentos são menores e mais leves, portanto, é possível uma maior produtividade durante a montagem e menor risco durante o içamento de cargas. É válido ressaltar que, usualmente, a fixação da maioria dos equipamentos do setor de 34,5kV ocorre na própria estrutura do pórtico, não sendo necessária a etapa de montagem de suportes específicos, sendo em muitos casos a única exceção o disjuntor de média tensão, devido ao tamanho do equipamento, e em algumas soluções o transformador de corrente de média tensão também apresenta esta característica em sua montagem. A Figura 98 exemplifica a montagem de equipamentos do setor de 34,5kV

Figura 98 – Montagem de equipamentos do pátio de 34,5kV



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

Além das montagens dos equipamentos de pátio, também são realizadas as montagens de painéis na casa de comando. Conforme já explicitado anteriormente, o piso elevado da casa de comando promove uma elevação dos painéis para que os cabos de força e controle sejam conectados na parte inferior dos painéis, dentro da casa de comando.

Deve-se prever estrutura suporte (base) dos painéis para que sejam elevados junto ao piso e tais estruturas, após montadas, permitem o posicionamento e fixação dos painéis na casa de comando. A Figura 99 exemplifica a instalação dos painéis, contendo uma base aguardando a fixação do painel e ao lado um painel já concluído.

Figura 99 – Base metálica aguardando fixação de painel na casa de comando

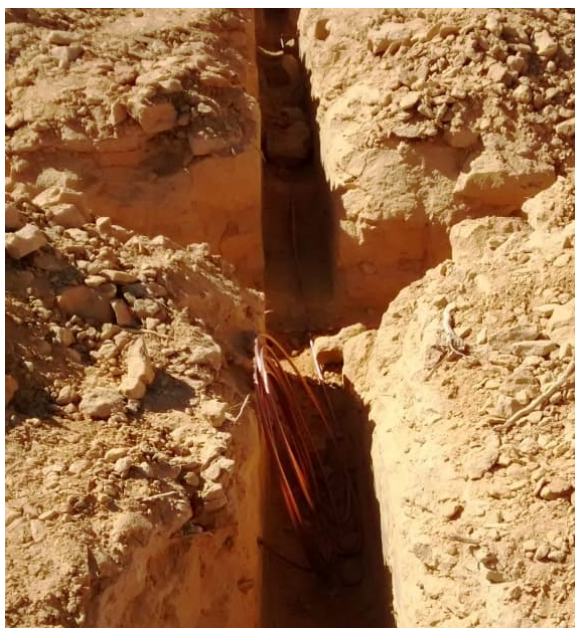


Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.3.4. Malha de aterramento

Para a execução da montagem da malha de aterramento deve-se prever a escavação da região que receberá o cabo de cobre nu. De forma a evitar uma grande quantidade de valas abertas, as escavações são realizadas conforme vão sendo reaterradas áreas já executadas, de forma sequencial. Ou seja, de forma paralela, há equipe responsável por escavar e reaterrar as áreas onde a malha está sendo executada. A Figura 100 exemplifica o lançamento dos cabos de cobre nu para execução da malha de aterramento.

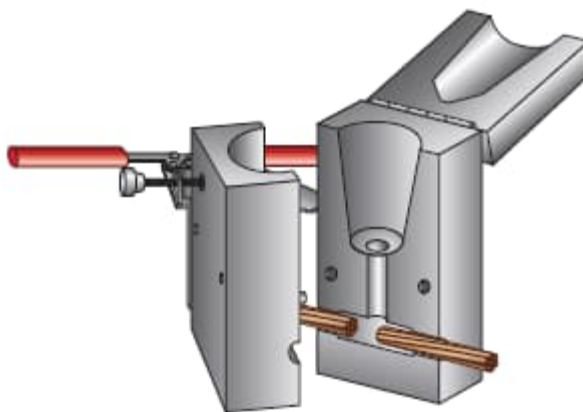
Figura 100 – Escavação de vala e lançamento de cabo de cobre nu para malha de aterramento



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Para a montagem da malha, os cabos de cobre nus são cortados, conforme dimensões de projeto e em cabos retilíneos. O que dá o aspecto de grid à malha são as soldas exotérmicas, processo químico responsável por unir as pontas dos cabos, formando a malha de aterramento. Para sua realização, uma forma é utilizada e as pontas dos cabos de cobre nu são alocadas no molde, junto ao material de solda. Após a reação química, o material de solda funde e une os cabos de cobre nu. A Figura 101 exemplifica o molde para solda exotérmica.

Figura 101 – Molde para realização de solda exotérmica



Fonte: (SANTOS, 2018)

Conforme os serviços de corte, posicionamento e solda exotérmica dos cabos de cobre nu são realizados, libera-se frente para a o reaterro. Em muitos casos, os equipamentos ainda não estão montados, portanto, os rabichos já são conectados à malha e ficam no solo, à disposição para conectorização ao respectivo equipamento ou estrutura, assim que forem montados. A Figura 102 demonstra a solda exotérmica concluída.

Figura 102 – Solda exotérmica concluída



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

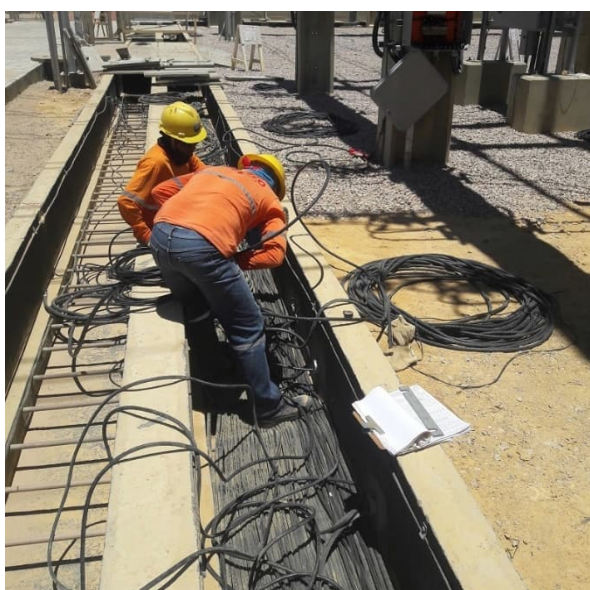
3.3.5. Lançamento e Conectorização de Cabos de Baixa Tensão

Os cabos de baixa tensão ou cabos de força e controle, são responsáveis pelas ligações elétricas entre equipamentos e painéis. Dessa forma, é possível o recebimento de informações do pátio, envio de sinais de comando para manobras e atuação de proteções, de forma remota, sem que seja necessário o acesso ao pátio energizado.

Para esta atividade, é necessário que as canaletas estejam concluídas para receberem os cabos e que os armários de comando dos equipamentos e painéis estejam montados e disponíveis para a conectorização.

Assim como os cabos aéreos, os cabos de força em controle são entregues em obra em embalagens de madeira, cilíndricas e formato de carretel (bobina). O corte dos cabos deve prever o tamanho especificado em projeto. Após o corte, são lançados nas canaletas e então são executadas as terminações para posterior conectorização nos painéis e equipamentos. Cada cabo, no momento de seu lançamento é identificado com anilhas, que se referem à endereçamento do cabo e sua correta posição de conectorização, conforme projeto elétrico. As Figuras 103, 104 e 105 ilustram o lançamento e conexão de cabos de força e controle.

Figura 103 – Lançamento de cabos na canaleta de pátio



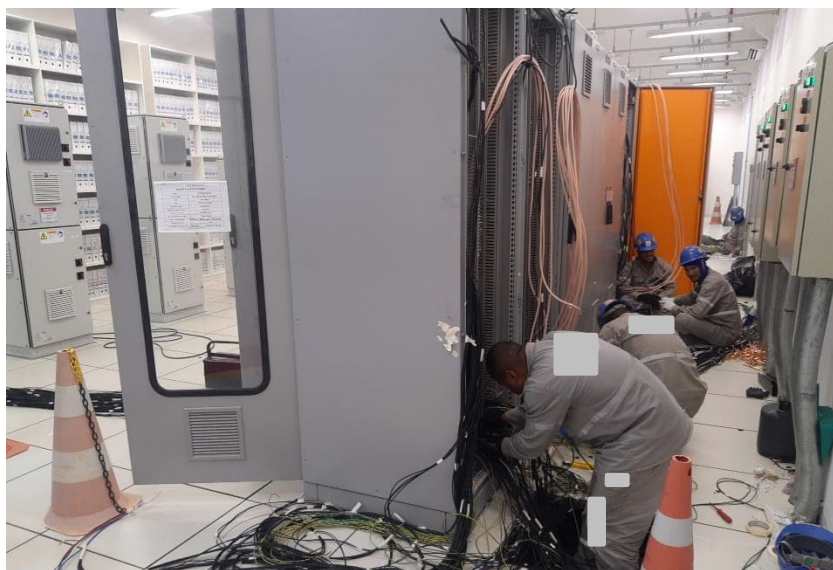
Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

Figura 104 – Conectorização no armário de comando de equipamento



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Figura 105 – Conectorização no painel na casa de comando



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

3.4. Comissionamento

O comissionamento compreende os testes em campo a serem realizado previamente à entrada em operação da subestação. As atividades são divididas em três etapas:

1. Comissionamento de equipamentos de pátio: Realização dos testes nos equipamentos de forma local, ao lado dos equipamentos;
2. Comissionamento de Cablagem: Testes de ponto a ponto e fuga de corrente em cada cabo, após a conectorização no equipamento;
3. Comissionamento dos Sistemas instalados: Testes funcionais dos painéis das subestação, a fim de garantir operação remota e operação correta dos sistemas.

Considerando as três etapas supramencionadas, pode-se identificar que o sequenciamento do comissionamento respeita a ordem estabelecida acima. Inicialmente testa-se o equipamento de forma local, a fim de garantir seu correto, funcionamento. Num segundo passo, garante-se a integridade física dos cabos e correta conectorização ao equipamento e respectivo painel. Por último, a realização de testes para garantir o comando de forma remota e correta funcionalidade dos sistemas instalados. Sendo assim, garante-se a rastreabilidade em caso de falha, visto que o sistema completo da subestação é testado de forma escalonada.

Diversos equipamentos de instrumentação são utilizados durante esta fase de execução, como fontes de alimentação CA e CC para testes locais, malas de teste para verificação de fuga

de corrente e nos transformadores. A lista de instrumentos de teste necessária para o comissionamento é extensa e não será detalhada neste trabalho.

3.4.1. Comissionamento de Pátio

Envolve os testes locais nos equipamentos, ou seja, possuem o objetivo de garantir o funcionamento e integridade dos equipamentos após as atividades mais estressantes, realizadas durante montagem eletromecânica, como içamentos e verticalizações utilizando maquinários.

Tais atividades são liberadas para execução após a conclusão da montagem de cada equipamento, contemplando já as instalações de cabos entre fases, que promovem a centralizações dos sinais de operação, força e controle nos armários de acionamento e comando. Portanto, os equipamentos são acoplados nas malas de teste, como se fossem testados em bancada, porém em campo.

Os exemplos dos testes são variados: Realização de comando de abertura e fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras, medições de resistência de isolamento, medições da exatidão dos enrolamentos dos transformadores de instrumento, entre outros testes. Como já mencionado anteriormente, a lista de testes realizados é extensa e não será detalhada. Cada equipamento possui em respectiva norma os testes em campo que se fazem necessários para sua aprovação e liberação para energização. A Figura 106 exemplifica os testes em campo dos equipamentos.

Figura 106 – Comissionamento local de equipamento



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

3.4.2. Comissionamento de Cablagem

Com o objetivo de certificar os cabos lançados e conectorizados, o comissionamento de cablagem refere-se à integridade da isolação dos cabos bem como sua correta conectorização. Após o lançamento e execução das terminações dos cabos, imediatamente antes da conectorização realiza-se seu comissionamento.

Diferentemente da quantidade de testes para os equipamentos, são dois os testes para comissionamento de cablagem: Teste de continuidade de corrente (ponto a ponto) e teste de fuga de corrente. O primeiro visa identificar as pontas dos cabos, para identificar se o cabo em teste foi conectorizados no borne correto do equipamento e no borne correto do painel. Em caso negativo, realiza-se a conexão correta e/ou alteração da anilha de identificação. O segundo teste tem como objetivo verificar a integridade da isolação dos cabos a partir uma fonte de alimentação que injeta corrente no cabo, chamada mala de testes.

3.4.3. Comissionamento dos Painéis

O comissionamento dos painéis é a etapa mais complexa de testes em campo e com maiores riscos de encontrar falhas de execução. Nesta etapa, são testados os comandos remotos, verificado a funcionabilidade dos softwares operativos e lógicas de proteção e controle.

De forma geral, após a garantia do funcionamento do equipamento pelo comissionamento de local de pátio e correta conexão dos cabos pelo comissionamento de cablagem, chega a hora de testar os sinais remotos de controle e proteção.

São testadas em campo todas as lógicas programadas e parametrizadas nos relés digitais de forma a garantir que funcionem em campo conforme funcionaram em bancada de testes na fabricação dos painéis. Em caso de pendências de fabricação, as mesma já são removidas em fábrica e são inspecionadas em campo a fim de verificar seu atendimento.

Entretanto, nem só ao sistema de proteção, controle e supervisor se limita esta etapa do comissionamento. Além destes também se faz necessário o comissionamento do sistema de telecomunicações, certificando que a rede de comunicação instalada trafega as informações de voz e dados de forma confiável, bem como se o sistema de medição de faturamento está enviando as informações necessárias.

Com o comissionamento dos painéis, fecha-se toda a execução do sistema, do início da infraestrutura até os testes finais, utilizando já a linha de transmissão e dados até mesmo do

parque eólico como um todo. A Figura 107 ilustra o momento dos testes pré-operacionais na casa de comando

Figura 107 – Comissionamento de painéis a partir do sistema supervisório



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2016)

4. Gerenciamento de Projetos

Previamente a todo o detalhamento dos conceitos de gerenciamento de projetos, é essencial o entendimento do que é um projeto. O conceito de execução de um projeto é: Uma soma de atividades, de complexa interligação, que possuem início, meio e fim, com o objetivo de executar um determinado escopo por completo. Outra definição é: Um projeto é um esforço único, complexo e não rotineiro limitado por tempo, orçamento, recursos e especificações de desempenho criadas de acordo com as necessidades do cliente (GRAY E LARSON, 2009). A Figura 108 ilustra o ciclo de vida de um projeto e suas maiores demandas distribuídas ao longo da linha do tempo.

Figura 108 – Ciclo de vida de um projeto



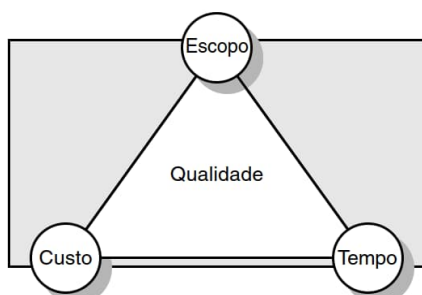
Fonte: (GRAY E LARSON, 2009)

A partir da definição anterior pode-se entender o que é o gerenciamento de projetos. De forma ainda superficial, gerenciar um projeto é ter o controle sobre suas variáveis, identificar seus pontos críticos, promover uma boa comunicação com a equipe, com o objetivo de garantir o seu cumprimento e chegar ao seu final, com a menor quantidade de obstáculos possíveis.

Gerenciar projetos compreende elaborar planos adequados às características dos projetos atuais e executar processos de controle capazes de garantir o bom desempenho do projeto. Este bom desempenho envolve a harmonização de 4 dimensões: Escopo, Tempo, Custo e Qualidade. (MAGALHÃES, 2018). Contudo, a harmonização das disciplinas anteriores é uma tarefa árdua, pois o equilíbrio ideal é algo um tanto quanto utópico. Um escopo de maior qualidade terá um custo mais elevado, ou por ser mais trabalhoso pode levar maior tempo para sua entrega e todas as permutações entre o que é prioridade dentro destas quatro disciplinas acarretam alterações

das demais. A Figura 109 ilustra estas intersecções.

Figura 109 – Conflito de interesses no gerenciamento de projeto



Fonte: (GRAY E LARSON, 2009)

Uma vez que projetos bem dirigidos se tornam a chave para o sucesso, as empresas começaram a procurar soluções e metodologias que as levassem ao sucesso com os seus empreendimentos. Começaram então a perceber a necessidade crescente de profissionais na área de gerenciamento de projetos, que sejam certificados por alguma instituição reconhecida em gerenciamento de projetos como o “Project Management Institute” (PMI), por exemplo, ou que, no mínimo, conheça alguma metodologia comprovada em gestão de projetos (LAMIM, 2009).

Esse trabalho do gerente de projeto passa por ferramentas que dependem de habilidades como regulação das emoções, negociação, comunicação, liderança e gestão de conflitos. Algumas dessas ferramentas também demandam habilidades técnicas, lógicas, matemáticas, como programação de redes de atividades, estimativas de distribuição de probabilidades de duração e orçamento, elaboração de gráficos hierárquicos, como a estrutura analítica do projeto, entre outros (VALLE *et al.*, 2014).

Quando aplicado à uma subestação de um parque eólico, o gerenciamento de projeto envolve todas suas disciplinas, desde a concepção do projeto, até sua energização. O objetivo de um projeto de subestação para parque eólico é claro. Entregar a subestação em operação, removendo todas as pendências necessárias. Cabe a equipe de projeto dividir suas atividades para chegar a atingir a conclusão e ao gerente de projeto promover o controle sob tais atividades bem como as tomadas de decisão necessárias para cumprimento do objetivo.

Sistematicamente, o gerenciamento de projetos pode ser subdividido em disciplinas, para o melhor entendimento das vertentes a serem cuidados durante o gerenciamento. A Figura 110 ilustra tais disciplinas.

Figura 110 – Disciplinas de Gerenciamento de projetos



Fonte: (MAGALHÃES, 2018)

Cada disciplina será abordada, de forma mais detalhada nos tópicos seguintes. A subdivisão dos próximos itens está conforme PMBOK, sigla para “Project Management Body of Knowledge”, o guia das melhores práticas de gerenciamento de projetos conforme o PMI, sigla para “Project Management Institute”, órgão privado que regulamenta a profissão do gerente de projetos e certifica estes profissionais.

4.1. Escopo

Entende-se por escopo o objetivo do projeto, aquilo que deve ser executado ou cumprido para o sucesso do gerenciamento. Portanto, se faz necessária a compreensão do que deve ser executado para que a garantia deste cumprimento seja possível. No caso de um projeto para uma subestação aplicada em um parque eólico, o escopo é a própria subestação, seus equipamentos, materiais e todos os serviços prestados até a energização do empreendimento.

Inicialmente é necessário um passo prévio para o início do gerenciamento de escopo que é sua definição. O escopo deve ser claro e objetiva de forma a evitar desvios relacionados à custos, prazos, entre outras divergências com as demais disciplinas de gerenciamento de projeto. A definição do escopo passa pelo crivo da equipe que presta os serviços de gerenciamento do projeto e do cliente que contrata estes serviços.

Dado o projeto objeto do estudo de caso, o escopo macro deste compreende:

- Elaboração de projetos executivos civis, eletromecânicos e elétricos;
- Elaboração de estudos elétricos básicos;
- Aquisição, elaboração de projetos, fabricação, testes e entrega em obra de equipamentos e materiais;

- Execução de obras civis;
- Execução de montagens eletromecânicas;
- Execução de montagens elétricas;
- Comissionamento.

Os itens acima estão em linha com o já explicitado nos capítulos anteriores. Dessa forma, o gerenciamento de escopo para o objeto do estudo de caso consiste em garantir que a subestação opere corretamente após todas as atividades realizadas cumprindo todos os requisitos técnicos, prazos de entrega, redução de custos (quando possível) e qualidade.

4.2. Custos

Intrínsecos à todas as atividades de um projeto, os custos estão presentes em todo o escopo, seja na aquisição de um produto parte da cadeia de suprimentos do projeto ou uma prestação de serviços contratada. Em geral, os custos com a aquisição de materiais são dimensionados por valor unitário e o custo de prestação de serviços são dimensionados por horas trabalhadas. Um exemplo prático ao projeto de uma subestação aplicada em um parque eólico pode ser um disjuntor de alta tensão, que por se tratar de um equipamento, é considerado um produto da cadeia de suprimentos do projeto e cada um possui seu custo por unidade. Já para os serviços prestados, pode-se utilizar de exemplo a contratação da equipe de comissionamento, que utiliza e cobra por horas trabalhadas, após a prestação dos serviços.

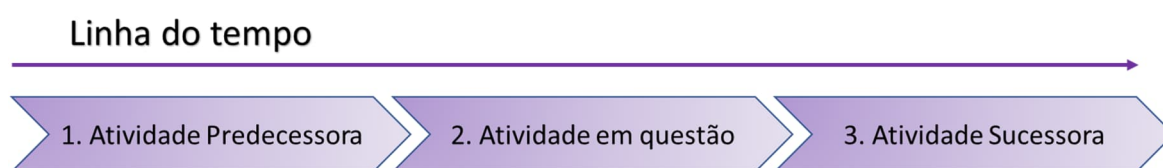
Na fase de planejamento do projeto, um orçamento prévio deve ser estabelecido, para que os resultados sejam compensados ao fim do projeto e comparados em cada aquisição ou contratação realizada. De forma mais básica, define-se a verba disponível para ser utilizada para cada compra ou contratação, de modo a obter-se lucro ao final das atividades.

Variações de custo são algo comumente presente nos projetos, pois variam de acordo com a situação da economia, necessidades técnicas não previstas anteriormente a assinatura de um contrato ou mesmo solicitações do cliente ao longo do ciclo de vida do projeto. Contudo, há um limite de responsabilidade: no caso de um custo comprovado por solicitação do cliente, ou seja, fora do contratado, os mesmos devem ser repassados ao cliente. Em caso de custos extras apresentados por fornecedores, estes não devem ser pagos caso seja comprovada a responsabilidade do fornecedor por tais custos.

4.3. Tempo

Como já mencionado anteriormente, um projeto possui atividades com início, meio e fim. As atividades podem se sobrepor, justapor, ou serem defasadas ao longo do tempo, com base nas suas necessidades prévias. As atividades podem ser predecessoras ou sucessoras de outras e a rede de atividades, distribuídas ao longo do tempo, formam o cronograma geral do projeto. A figura 111 ilustra o relacionamento de atividades com predecessoras e sucessoras.

Figura 111 – Interdependência de atividades



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Como exemplo prático, aplicado a um projeto de um parque eólico, podemos elencar a fabricação de um equipamento. A fabricação do equipamento somente se inicia após a aprovação de seu projeto, bem como os testes de aceitação em fábrica somente são factíveis após sua respectiva fabricação. Portanto, a atividade de fabricação do equipamento possui a aprovação dos projetos como predecessora e os testes em fábrica como sucessora. Todas as atividades possuem ao menos uma atividade predecessora e ao menos uma sucessora, com exceção da primeira e última atividade do projeto.

Dessa forma, todas as atividades além de possuírem datas assertivas de início e término, também devem ser planejadas para atendam a data de necessidade final. Tal sequenciamento é vital para o dimensionamento de recursos em campo, estimativas de datas de necessidade de equipamentos e materiais entregues em campo, entre outras atividades, de forma a ajustar o melhor possível os prazos de execução do projeto bem como prever os momentos exatos de desembolso de caixa do projeto. Portanto, o gerenciamento de tempo contribui com o sucesso do andamento do projeto a fim de atendimento dos prazos estabelecidos em contrato, quanto com a saúde financeira do projeto.

Para garantir um eficaz gerenciamento de tempo ao longo do projeto, na fase inicial do projeto deve-se elaborar um plano detalhado, contendo todas as atividades necessárias ao projeto e datas para início e término, com durações estimadas com base em uma memória de cálculo ou expertise de profissionais experientes. O plano deve prever a relação entre as

atividades e suas datas de necessidade. Após sua elaboração e aprovação junto ao cliente inicia-se o acompanhamento do progresso a fim de garantir a aderência às datas que foram planejadas inicialmente. Este plano leva o nome de cronograma executivo e é atualizado com frequência de tempo determinada no início do projeto para metrificação dos avanços o projeto ao longo do tempo. Em caso de atrasos e queda do percentual do conclusão realizado, se comparado ao previsto, é possível identificar pela atualização do cronograma executivo e num segundo passo tomar as ações necessárias para a recuperação.

4.4. Risco

Nenhum planejamento, por melhor que seja, pode sobrepujar os riscos, ou a inabilidade de controlar eventos inesperados. No contexto de projetos, o risco é um evento ou condição incerta que, se ocorrer, terá um efeito positivo ou negativo nos objetivos propostos. Todo risco tem uma causa e, quando ocorre, tem uma consequência. Por exemplo, uma causa pode ser um vírus de gripe ou mudança das exigências do escopo. o evento ocorre quando os membros da equipe são atingidos pela gripe ou o produto precisa ser reprojeto. Se qualquer um desses eventos ocorrer, ele impactará os custos, a programação e a qualidade do projeto. (GRAY E LARSON, 2009).

O risco está diretamente atrelado à probabilidade, pois pode ou não ocorrer. Identificá-los e mantê-los mapeados é uma tarefa que permanece durante todo o projeto. O gerenciamento de risco consiste em quatro passos principais:

1. Identificação: Compreende identificar possíveis riscos e mapeá-los;
2. Avaliação: Consiste na ponderação do riscos, visando avaliar quais são de maior ou menor impacto em caso de ocorrência;
3. Resposta: Elaboração de planos de contingência e reservas de tempo para resposta ao risco em caso de ocorrência;
4. Controle: Acompanhar o mapeamento dos riscos e suas atualizações a fim de sempre atualizar os planos de contingência com o que de fato é um risco;

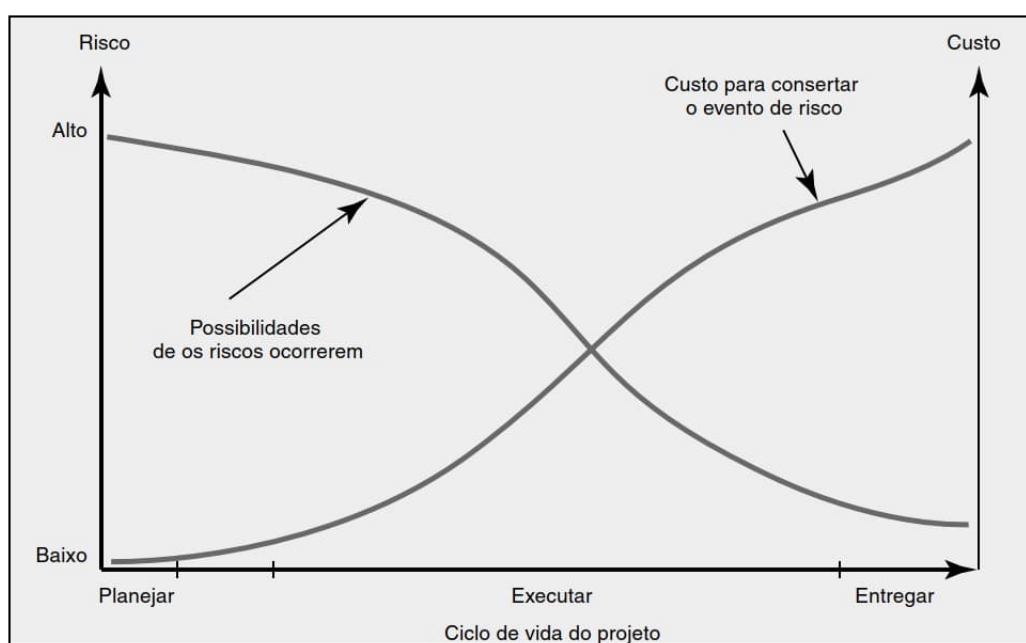
Um risco identificado no início do projeto pode não persistir até o final, devido à característica de um projeto ser algo volátil, que muda com o andar sob a linha do tempo.

Quando aplicado a subestações para parques eólicos, diversos fatores podem ser elencados como riscos. Há a presença de riscos geográficos, como chuvas e qualidade de solo baixa, riscos de transporte como possíveis acidentes durante a entrega de equipamentos e materiais, entre

outros. A lista é extensa, contudo, um bom gerenciamento deve identificar e selecionar riscos com maiores probabilidades de acontecerem, a fim de planejar a contingência necessária.

Para que possam ser reduzidos riscos num projeto, tê-los previstos e contingenciados não é a única tarefa. Para redução do risco, metodologias de execução podem ser alteradas, especificações técnicas podem ser mais assertivas, entre outras diversas medidas podem ser tomadas. A redução de risco num projeto é chamada comumente de mitigação de riscos e consiste em reduzir a probabilidade de um risco se tornar um fato. Ao longo do ciclo de vida do projeto e tomadas de ações para mitigação é possível reduzir as probabilidades de ocorrência ao longo do tempo. A Figura 112 ilustra a probabilidade de ocorrência de um evento de risco ao longo do projeto, comparado ao custo para sua correção em caso de ocorrência.

Figura 112 – Probabilidade e custo de evento de risco ao longo do projeto em distribuição contínua



Fonte: (GRAY E LARSSON, 2009)

A figura acima ilustra que para a correção de um evento de risco, quanto mais necessária seja a entrega do projeto, maior serão os custos para a solução do evento. Portanto, sempre é válida a realização de tarefas que os mitiguem.

Um exemplo de risco para os projetos de subestações aplicados a parques eólicos atual tem sido a pandemia causada pelo COVID-19. A doença paralisa atividades fabris e atividades de obra quando infecta os recursos disponíveis para sua execução. A paralisação causa atrasos que

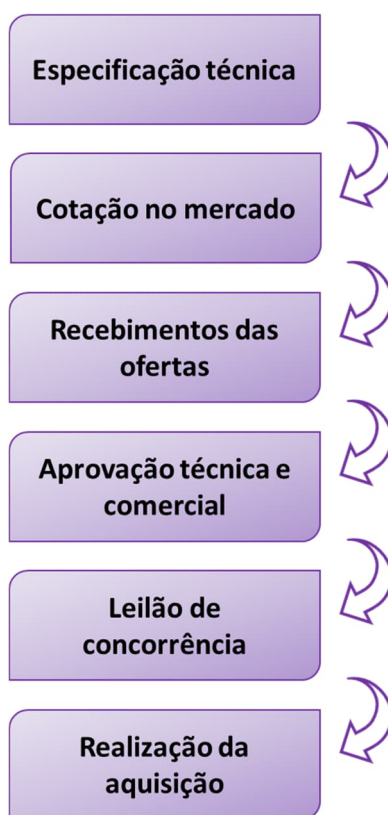
muitas vezes somente são recuperados em caso de acréscimo de recursos, aumento da quantidade total de mão-de-obra, incorrendo em custos ao projeto. Contudo, o momento exato da contaminação da equipe de trabalho não é algo previsível, caracterizando-se um risco.

4.5. Aquisições

Todo projeto necessita de suprimentos para se tornarem realidade, sejam eles materiais, ou serviços prestados. Em linha com o gerenciamento de custo e gerenciamento de escopo, as aquisições são parte fundamental no sucesso de um projeto. Com base nos orçamentos e planos de custos realizados durante a fase de planejamento dos custos, as aquisições devem ocorrer, de forma a respeitar tais valores.

O processo que envolve uma aquisição, para equipamentos, materiais e serviços de uma subestação aplicada a um parque eólico é complexo e variado, pois muda de acordo com o escopo a ser contratado. De forma geral, o processo segue a Figura 113.

Figura 113 – Processo de aquisição para equipamentos de uma subestação



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Portanto, num caso de um disjuntor de alta tensão, por exemplo, o equipamento deve ser especificado tecnicamente e encaminhado ao comprador técnico responsável. Após este passo, a especificação é lançada no mercado aos prováveis fornecedores que encaminharão as ofertas técnicas e comerciais para o atendimento do fornecimento. Após a aprovação técnica e comercial da oferta, o equipamento é comprado.

As compras devem sempre ser atreladas aos prazos de necessidade, visto que o tempo de fabricação e mobilização de recursos não é algo instantâneo e depende de muitas variáveis.

4.6. Qualidade

A qualidade de um projeto, envolve tanto a conhecida qualidade de um equipamento, como no caso de um transformador, bem como a qualidade de execução das atividades de gerenciamento, ou seja, o quão boa é a performance da equipe de gerenciamento de projetos. As atividades atreladas ao gerenciamento de qualidade, em geral, são atreladas aos processos de melhorias contínuas, identificação de recebimentos em campo para garantia da integridade dos materiais e equipamentos entregues bem como levantamento de causas de problemas e possíveis soluções e boas práticas a serem adotadas.

A qualidade envolve diretamente a performance do projeto, a satisfação do cliente, os custos adicionais, atrasos, entre outros fatores que são diagnosticados como problemas durante o ciclo de vida do projeto.

Para a garantia de qualidade do projeto, o monitoramento das atividades e formas de serem realizadas é contínuo e iterativo, por meio de auditorias, inspeções e relatórios que evidenciem a performance do gerenciamento do projeto.

Aplicado à projetos de subestações para parques eólicos, a qualidade atua diretamente nas demais disciplinas, como por exemplo, numa inspeção de recebimento de materiais e na realização de seu relatório.

4.7. Integração

O gerenciamento de integração consiste na combinação e coordenação das disciplinas de gerenciamento de projeto, garantido que as interfaces entre as variadas áreas se comuniquem e sejam eficazes trabalhando em conjunto bem como realizar o acompanhamento macro das atividades e como o cumprimento, por cada área, se relaciona e atendem aos aspectos de qualidade.

Para o gerenciamento de projeto, segundo o guia PMBOK, as cinco etapas de gerenciamento da integração são:

1. Desenvolver o Plano de Gerenciamento: Consiste em desenvolver um plano que agregue as informações dos demais, como cronograma, plano de fornecimento de materiais e equipamentos, entre outros;
2. Orientar e gerenciar o trabalho: Consiste na manutenção da motivação da equipe, lidar com os conflitos entre outros fatores;
3. Gerenciar o conhecimento do projeto: Garantir o processo melhoria contínua e registros e utilização de lições aprendidas;
4. Monitorar e controlar o trabalho: Consiste no acompanhamento de desempenho e avaliação dos acompanhamentos para novas melhorias de processos;
5. Realizar o controle integrado de mudanças: Solicitar, analisar, aprovar, replanejar, executar e encerrar as eventuais mudanças do projeto.
6. Encerramento de projeto ou fase do projeto: Visa colher as informações e agrupá-las para a conclusão do projeto ou uma etapa;

O gerenciamento de integração não é diferente para uma subestação aplicada à um parque eólico de qualquer outro projeto. Esta disciplina de gerenciamento consiste na equipe, nos procedimentos e processos, sendo comuns a outros projetos.

4.8. Comunicação

Um projeto é, geralmente, desenvolvido em equipe, sendo cada um responsável por uma área de conhecimento. Dessa forma, para que o projeto atue de forma integrada e permaneça saudável por todas as disciplinas e recursos, um bom gerenciamento de comunicação se torna estritamente necessário.

O gerenciamento de comunicação consiste em planejar, definir controles, executar e monitorar a comunicação do projeto, de que forma ela se dá, entre quais pessoas e em quais momentos, para que seja o mais eficiente possível. Para tal, é importante ter a informação prévia de que são os responsáveis por cada atividade, e quais são as partes interessadas dentro da equipe que farão a comunicação com base em cada assunto.

A aplicação do gerenciamento de comunicação não diverge entre uma subestação aplicada a um parque eólicos para projetos de outras naturezas e não será aprofundada neste trabalho.

4.9. Recursos Humanos

O gerenciamento de recursos humanos envolve a equipe necessária para o gerenciamento do projeto, bem como extrair a melhor produtividade de cada membro, com base em uma equipe coesa e coordenada. É importante para este gerenciamento que todos tenham a comunicação e foco no objetivo final do projeto alinhados para que a sinergia seja algo presente na equipe.

A equipe deve ser formada a partir de cada atributo e habilidade de cada recurso alocado para o sucesso do projeto e divididos entre as áreas referentes às disciplinas para a divisão do trabalho e das responsabilidades que devem ser cumpridas para a entrega final do projeto.

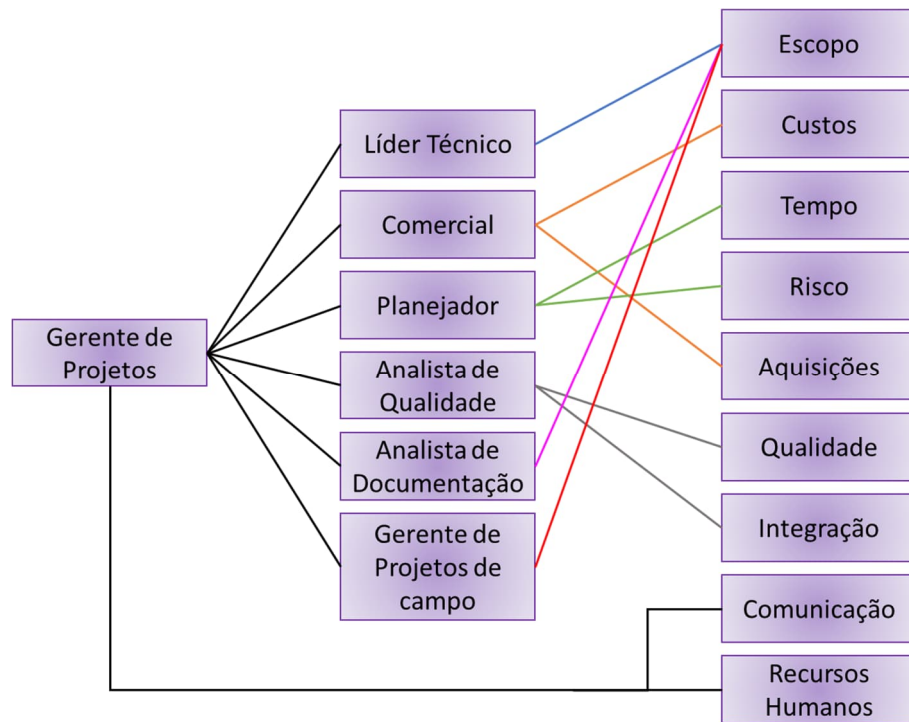
O fato de gerenciar as pessoas para o cumprimento do objetivo é, de fato, o gerenciamento de recursos humanos. A liderança é uma habilidade necessária por parte do gerente do projeto para a boa funcionabilidade da equipe e solução de conflitos, quando necessário.

Para a aplicação de projetos de subestações para parques eólicos, a estrutura usual de uma equipe de gerenciamento é composta de:

- Gerente de Projetos: Líder e responsável pelo projeto que deve garantir a integração entre a equipe e realizar as tomadas de decisão necessárias para o andamento do projeto.
- Líder Técnico: Responsável técnico do projeto com a incumbência de realizar os debates técnicos junto ao cliente e promover o andamento das soluções técnicas a serem adotadas para o atendimento do escopo;
- Comercial: Responsável pelos trâmites financeiros e fiscais para o gerenciamento de custos;
- Planejador: Responsável pelo cumprimento dos prazos referentes ao gerenciamento de tempo e acompanhamento do avanço das atividades do projeto;
- Analista de qualidade: Responsável pelo acompanhamento geral do projeto e integração dos resultados e lições aprendidas;
- Analista de documentação: Auxilia o líder técnico nos trâmites de aprovação de documentos técnicos junto ao cliente;
- Gerente de projetos de campo: Auxilia à equipe do projeto em campo, a fim de monitorar o projeto em loco bem como munir os demais membros da equipe com informações para o acompanhamento do projeto;

É possível realizar a correlação dos demais itens deste capítulo para cada membro da equipe e sua responsabilidade pela figura 114.

Figura 114 – Divisão de equipe usual para atendimento às disciplinas de gerenciamento de projetos



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Cabe ao gerente de projetos gerenciar todas as disciplinas do projeto por meio de sua equipe e exercer liderança e apoio para a equipe. Visto que as atividades de cada membro da equipe podem se relacionar, as responsabilidades por cada disciplina podem variar com base na atividade ou possuir mais de um responsável. Devido à complexidade deste tema, as intersecções de responsabilidade por cada disciplina de gerenciamento não serão abordadas neste trabalho.

5. Resultados e Discussões

A partir do acompanhamento da equipe e possibilidade de desenvolvimento de atividades de apoio para a mesma, pode-se identificar, principalmente, práticas relacionadas ao sequenciamento de atividades de execução e soluções técnicas empregadas que promoveram redução de riscos e custos. Portanto, as práticas serão categorizadas em duas vertentes: Boa prática por sequenciamento de atividades de execução e boa prática de soluções técnicas.

As boas práticas encontradas foram:

1. **Solução técnica com redução de custos:** Repetição de projetos de equipamentos evitando grandes customizações, quando possível, para redução de horas trabalhadas de líder técnico;
2. **Solução técnica com redução de custos:** Aplicação de disjuntores de alta tensão, de 69 e 138kV no setor de 34,5kV;
3. **Sequenciamento de atividades de execução com redução de custos e riscos:** Realização de obras civis fora da época chuvosa da região onde a subestação será executada;
4. **Sequenciamento de atividades de execução com redução de riscos:** Execução de parede corta-fogo antes da instalação do transformador de potência 34,5/500 kV;
5. **Sequenciamento de atividades de execução com redução de riscos:** Montagem de barramentos aéreos antes dos equipamentos;

Cada boa prática e seu respectivo impacto positivo de redução de riscos e custos serão detalhadas a seguir neste trabalho.

5.1. Repetição de projetos de equipamentos

Devido a particularidade de cada subestação, conexões com o sistema e vizinhanças do sistema de transmissão, os parâmetros elétricos de uma subestação aplicada à parque eólico podem variar, de acordo com os dados calculados pelos estudos elétricos, o que faz dos equipamentos empregados algo customizável, para atender a necessidade do sistema em que será instalado. Contudo, é possível reutilizar projetos de equipamentos para a fabricação de novos, a partir da consulta do portfólio do fornecedor.

O projeto acompanhado ao longo dos doze meses, foi contratado pelo cliente final a partir da premissa de repetição de projetos de equipamentos. Uma subestação idêntica fora executada

para outro cliente e ofertada ao atual. Portanto, os equipamentos foram somente revalidados pelos estudos elétricos e, aos que atenderam às especificações, o respectivo projeto pode ser replicado.

Esta boa prática encontrada se refere a redução de custo no projeto acompanhado. Devido à possibilidade de customização dos equipamentos, muitas horas trabalhadas do líder técnico são necessárias para a definição dos projetos dos equipamentos. Seguindo a premissa de reutilização de projeto de equipamento, o líder técnico necessita de menos esforços para a aprovação do projeto junto ao cliente e consequente liberação para fabricação dos equipamentos. Visto que os custos de prestação de serviços são calculados e compensados no plano de custos em horas trabalhadas, a redução de apontamento de horas de engenharia economiza o tempo deste profissional e, consequentemente, reduz custos ao projeto.

5.2. Aplicação de disjuntores de alta tensão no pátio de 34,5kV

Tecnicamente, o pátio do setor de 34,5kV possui uma particularidade que envolve os disjuntores deste setor. O nível de curto-circuito comumente encontrado nessa área da subestação é consideravelmente alto para disjuntores dessa classe tensão, fazendo com que os disjuntores de tensão nominal de 34,5kV sejam especiais para garantir a interrupção destas correntes de curto-circuito, o que eleva o custo para aquisição destes equipamentos.

Uma solução técnica proposta e aceita pelo cliente durante o acompanhamento do projeto de modelo do estudo de caso foi a utilização de disjuntores de tensão nominal de 69kV para o ponto de conexão dos circuitos alimentadores e 138kV para os disjuntores instalados nos secundários dos transformadores de potência 34,5/500 kV. Disjuntores dessa classe de tensão possuem capacidade de interromper correntes de curto-circuito mais elevadas sem necessidade especiais para serem projetados e fabricados. Dessa forma, é possível encontrar disjuntores de 69 e 138kV que custam menos ao projeto que os disjuntores especiais de 34,5kV nominal para esta aplicação.

5.3. Obras civis fora de época chuvosa

A presença de chuvas na fase de execução de obras civis de uma subestação provoca encharcamento do solo, erosões dos taludes da terraplenagem e paralisa atividades civis como a execução de fundações. Os impactos da chuva são sentidos no aumento dos prazos de

execução, visto a necessidade de retrabalho e trabalhos adicionais para permitir a conclusão de execução do escopo civil da subestação.

Durante o acompanhamento do projeto objeto do estudo de caso, o cronograma executivo inicialmente planejado para a execução já contemplava a execução de obras civis fora da época chuvosa da região. Contudo, a área da subestação foi identificada como um possível sítio arqueológico, o que atrasou o licenciamento ambiental da área para o início das atividades e consequentemente levou a mobilização dos recursos de campo para execução de obras civis no início do período chuvoso. O impacto prático das chuvas identificado durante a execução de obras civis é visto na Figura 115, cujo registro foi realizado no mês de abril de 2022, época chuvosa da região nordeste do Brasil.

Figura 115 – Área da subestação após chuvas



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

Na figura XX é possível observar o alagamento de fundações em fase de escavação e concretagem, o que gera a necessidade de esgotar a água armazenada nas fundações com a utilização de bombeamento, caracterizando um retrabalho e emprego de horas adicionais de prestadores de serviços de campo. A Figura 116 registra o alagamento de fundação após chuva.

Figura 116 – Fundação de pórtico 500kV alagada após chuva



Fonte: (ARQUIVO EMPRESA PRIVADA, 2022)

A boa prática de evitar o período chuvoso consiste em redução de riscos e custos. O trabalho em período chuvoso requer mais horas extras dos trabalhadores de campo para recuperação do trabalho perdido pela chuva, portanto, evitar este período evita custos com horas extras e riscos relacionados a segurança do trabalho para os colaboradores de campo, pois há risco de escorregamento e queda em escavações.

5.4. Execução de parede corta-fogo antes da instalação dos transformadores 34,5/500 kV

A execução da parede corta-fogo, quando pré-moldada, requer o içamento das colunas de concreto para fixação em sua fundação. A necessidade de presença da parede corta-fogo está atrelada ao quão próximos os transformadores são instalados, portanto, quanto mais próximos, surge a necessidade da parede. Devido a isso, o espaço físico para execução da parede corta-fogo quando os transformadores 34,5/500 kV estão instalados é limitado. Ao içar os pilares e placas de fechamento com os transformadores já posicionados na respectiva base, há o risco de movimentar a carga e haver choque das peças pré-moldadas com o equipamento, o que caracteriza um alto risco. Os impactos de uma decorrência dessa natureza são os altos custos de reparo do equipamento, caso seja possível reparar e um grande impacto de prazo para a realização dessa atividade e, se necessário, a fabricação de um novo transformador.

A boa prática encontrada mitiga o riscos dos impactos supramencionados apenas no planejamento das atividades e seu respectivo sequenciamento. Portanto, a aplicação envolve considerar a execução da parede corta-fogo previamente à entrega do transformador em obra, mapeando as atividades em sequência no cronograma executivo do projeto.

5.5. Montagem de barramentos aéreos antes dos equipamentos de alta tensão

A montagem de barramento aéreos envolve a fixação dos cabos de alumínio nas estruturas dos pórticos a partir das cadeias de ancoragem. O içamento dos cabos se faz necessário para sua montagem, existindo o risco de movimentação da carga suspensa durante a execução da atividade.

Quando realizada com equipamentos já montados abaixo, a suspensão dos cabos de alumínio gera o risco de haver choque dos cabos aos equipamentos, provocando até danos irreversíveis aos equipamentos.

A boa prática consiste em reduzir o risco de impactos de prazo e custos ao projeto. Em caso de danos irreversíveis, novos equipamentos deverão ser adquiridos e fabricados, justificando os impactos ao projeto de custos e prazo para a execução.

6. Conclusão

Tendo em vista o objetivo do estudo de caso realizado, o resultado foi positivo no que tange aspectos já praticados atualmente pelos responsáveis por gerenciar de projetos dessa natureza. As boas práticas de gerenciamento encontradas são atividades corriqueiramente aplicadas aos projetos inseridos neste contexto e são consagradas como medidas de sucesso a serem adotadas. No que tange novas ideias e boas práticas ainda não aplicadas, o estudo de caso não se demonstrou satisfatório, visto que as características de projetos de subestações são de extrema especificidade e alto grau de complexidade e, além disso, já possuem diversas medidas consagradas, como já explicitado anteriormente.

Durante a realização do estudo, muito conhecimento dos setores de geração e transmissão foi adquirido e como se dá o escoamento da energia elétrica produzida aos grandes centros. Além disso, foi possível identificar a aplicação de diversas práticas de gerenciamento de projetos aplicadas a um projeto real que permanece em andamento até a data de publicação deste trabalho.

Correlacionado ao curso de engenharia elétrica, o trabalho permitiu a identificação de diversas disciplinas e, principalmente durante visitas em campo e aprendizado com pessoas experientes da área, permitiu a absorção do conhecimento de forma prática e eficiente. Foi possível verificar todo o parque eólico em operação em uma das visitas, cuja empresa privada proprietária da operação permitiu a entrada na casa de comando e acesso aos sistemas instalados, porém sem a permissão de registro de imagens da utilização dos sistemas. Houve a possibilidade de identificar todas as áreas do parque eólico, sendo identificada a possibilidade para novos estudos de caso nas demais áreas do projeto, como o gerenciamento de projetos dos aerogeradores, da rede de média tensão e de linhas de transmissão, sendo estas sugestões para trabalhos futuros.

De maneira geral, concluiu-se que o desenvolvimento do trabalho foi satisfatório para o aprendizado da aplicação da engenharia elétrica e a possibilidade de adquirir este conhecimento no mercado de trabalho foi altamente enriquecedora.

7. Referências

ARAÚJO, Antônio E. A.; NEVES, Washington L. A. Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.

ARQUIVO EMPRESA PRIVADA. Imagens cedidas por empresa de nome confidencial. 2016 a 2022.

ARTECHE. Disponível em <https://www.artech.com/pt/transformadores-de-potencial-capacitivos-e-condensadores-de-acoplamento-de-alta-tensao>. Acessado em 07 de junho de 2022.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2018: ANO BASE 2017, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, EPE, 2018.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2021: ANO BASE 2020, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, EPE, 2021.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA. Com quem se relaciona. Disponível em <https://www.ccee.org.br>. Acessado em 09 de janeiro de 2021.

CARDOSO, Pedro Emanuel Pinto. Avaliação do impacto em Comissionamento e Testes de Funcionamento numa Subestação com Protocolo CEI 61850. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/67889/2/26731.pdf>. Acessado em 09 de janeiro de 2021.

ELETROMAC. Disponível em <https://www.eletromac.com.br/cabo-pp-preto-4x6mm-1kv-%28-preco-por-metro%29-cor/meg/br/906/produto/>. Acessado em 12 de julho de 2022.

ELETRONET. Disponível em <https://www.eletronet.com/blog/voce-sabe-o-que-e-um-cabo-opgw-e-como-a-eletronet-transporta-dados-por-meio-dele/>. Acessado em 12 de junho de 2022.

FRONTIN, Sérgio de Oliveira (organizador). Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Disponível em https://institucional.taesa.com.br/wp-content/uploads/2018/11/INOVAEQ_Livro_Completo.pdf. Acessado em 10 de dezembro de 2021.

GRAY, Clifford F. e LARSON, Erik W. Gerenciamento de projetos – O Processo Gerencial. 4 ed., Porto Alegre, AMGH, 2010.

LAMIM, Bianca C. Ferraz. Gerenciamento de projetos aplicado ao planejamento do sistema elétrico de distribuição: Estudo de caso. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/93294/262887.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em 11 de janeiro de 2021.

MAGALHÃES, Andréa. Disciplinas de Gerenciamento de Projetos. Disponível em <https://www.dheka.com.br/disciplinas-de-gerenciamento-de-projetos/>. Acessado em 09 de janeiro de 2021.

MAMEDE Filho, João. Manual de equipamentos elétricos. 3 ed, Rio de Janeiro, LTC, 2005.

METRUM. Disponível em <https://memt.com.br/portfolio-item/painel-de-medicao-de-energia-eletrica/>. Acessado em 04 de junho de 2022.

NEXTCABLE. Disponível em <https://nextcable.com.br/quais-os-diferentes-tipos-de-conectores-opticos/>. Acessado em 14 de junho de 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. Disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acessado em 04 de junho de 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. Procedimentos de Rede, submódulo 2.6, Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos, 2021. Disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acessado em 25 de maio de 2022.

PRYSMIAN. Disponível em https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/PD_009_01_PT_Aluminio%20Nu_CAA_%28ACSR%29.pdf. Acessado em 14 de junho de 2022.

SANTOS, Moacir. Solda Exotérmica para Aterramento. 2018. Disponível em <https://engfam.com.br/solda-exotermica-para-aterramento/>. Acessado em 17 de junho de 2022.

SCAPATICIO, MÁRCIA. Como a energia elétrica chega a nossas casas? Disponível em <https://novaescola.org.br/conteudo/69/como-a-energia-eletrica-chega-a-nossas-casas>. Acessado em 09 de janeiro de 2021.

SCHNEIDER ELETRIC. Disponível em <https://www.se.com/br/pt/product/M8650C0C0H6E1A0A/medidor-ion8650c-32mb-base-1-5a-65120vac-eth/>. Acessado em 04 de junho de 2022.

SIEMENS ENERGY. Catálogo de Produtos Siemens Energy. Siemens Energy Global GmbH & Co. KG. Transmission. Freyeslebenstraße 1. Erlangen, Alemanha. 2021.

SIEMENS. Disponível em <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control.html>. Acessado em 29 de maio de 2022.

TEKSEA. Disponível em <https://teksea.net/tekipower-scr-retificador-carregador-de-baterias-tiristorizado/>. Acessado em 13 de junho de 2022.

VALLE, André B. do; CIERCO, Agliberto A.; SOARES, Carlos Alberto P.; JUNIOR, José Finnocchio. Fundamentos do gerenciamento de projetos. 3ed. Rio de Janeiro. 2014.