

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO ITABIRITO
ENGENHARIA ELÉTRICA

Juliana Lourenço dos Santos Silva

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
AMBIENTE INDUSTRIAL**

Itabirito - MG

2023

JULIANA LOURENÇO DOS SANTOS SILVA

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
AMBIENTE INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Avançado Itabirito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: William Caires Silva Amorim.

Itabirito - MG
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

S586e Silva, Juliana Lourenço dos Santos
2023

Estudo da distribuição de energia elétrica no ambiente industrial. – 2023.

58 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)
– Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais –
Campus Avançado Itabirito, 2023.

Orientador: Me. Willian Caires Silva Amorim.

1. Energia elétrica. 2. Distribuição. 3. Rede. 4. Área subterrânea.
5. Área industrial. I. Silva, Juliana Lourenço dos Santos. II. Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Avançado
Itabirito. III. Título.

CDD 621.319

Elaborada pela Biblioteca Jarbas Nazareth de Souza – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Avançado Itabirito

Bibliotecário Responsável: Veríssimo Amaral Matias – CRB-6/3266



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Avançado Itabirito
Diretoria de Ensino
Docentes do Campus Avançado Itabirito
Rua José Benedito, 139 - Bairro Santa Efigênia - CEP 35450-000 - Itabirito - MG
- www.ifmg.edu.br

Ata de Aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso,
realizada em 04 de Agosto de 2023

Juliana Lourenço dos Santos Silva

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Avançado Itabirito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 04/08/2023 pela banca examinadora:

Prof. Me. William Caires Silva Amorim (IFMG)
Orientador (presidente da banca avaliadora)

Prof^ª. Dr. Cláudia Rejane de Mesquita (IFMG)
Membro avaliador

Prof. Dr. Eduardo José de Araujo (IFMG)
Membro avaliador

Itabirito, 04 de agosto de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **William Caires Silva Amorim, Professor**, em 04/08/2023, às 17:48, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Cláudia Rejane de Mesquita, Professora**, em 04/08/2023, às 17:49, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo José de Araújo, Professor**, em 04/08/2023, às 17:49, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1617474** e o código CRC **B53CA0D3**.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meu reconhecimento a todos que, de uma maneira ou outra, colaboraram na realização deste trabalho. Agradeço à minha família por todo suporte que tive durante a minha trajetória acadêmica. A minha mãe Tânia, exemplo de mulher fé e esperança, por todo apoio que sempre me deu. Ao meu pai Carlos, pelo suporte e incentivo constante. Obrigada por me ensinarem a ser forte, determinada e a acreditar nos meus sonhos. Ao meu irmão Paulo, pela parceria e apoio de sempre. Ao meu namorado Jonathan, que esteve ao meu lado desde o início me dando tanta força, amor e carinho. Agradeço aos meus professores, por proporcionarem uma educação de qualidade. Em especial, um agradecimento ao professor William Caires Silva Amorim, pela excelente orientação, todo apoio e confiança durante a construção desse trabalho, que o conduziu com paciência e dedicação, por sempre estar disponível e compartilhar todo o seu conhecimento. Por fim, agradeço a todos com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente contribuíram para a minha formação acadêmica.

RESUMO

A energia elétrica desempenha um papel fundamental em diversos setores, sendo a indústria um dos maiores consumidores desse tipo de energia. Para garantir o fornecimento eficiente, existem diferentes topologias de redes de distribuição, sendo as redes aéreas e subterrâneas as mais comuns. No contexto industrial, onde os sistemas de produção costumam ser contínuos e não podem ser interrompidos, problemas na distribuição de energia podem acarretar grandes perdas na produção e afetar o monitoramento de sistemas essenciais para a segurança dos funcionários. Esses problemas podem surgir devido a diversos fatores, como a queda de árvores sobre as redes elétricas, colisões de veículos com as estruturas ou até mesmo inundações causadas por chuvas intensas. Essas ocorrências podem resultar em interrupções no fornecimento de energia elétrica, comprometendo a operação industrial e causando prejuízos significativos. O trabalho realizou um estudo comparativo entre as redes aéreas e subterrâneas de distribuição de energia elétrica em um ambiente industrial. O objetivo foi determinar qual topologia seria mais viável para esse contexto. Além disso, um estudo de caso específico foi apresentado, envolvendo uma rede aérea redundante para atender às necessidades energéticas de uma barragem em uma indústria de mineração. Durante a análise, diversos aspectos de funcionamento e problemas foram identificados para ambas as topologias. Um dos principais fatores que causam interrupções no fornecimento de energia em ambientes industriais são as descargas atmosféricas e o crescimento da vegetação nas proximidades das instalações elétricas. Nesse contexto, a rede subterrânea apresenta-se como uma opção mais adequada em comparação com a rede aérea. A instalação subterrânea evita problemas relacionados a quedas de árvores, choques de veículos e descargas atmosféricas diretas nas linhas elétricas. No entanto, alguns aspectos limitadores foram identificados para a adoção da rede subterrânea no estudo de caso em questão. Os principais são os custos mais elevados associados à instalação de cabos subterrâneos e a falta de flexibilidade no processo de instalação, especialmente em áreas já estabelecidas com infraestrutura aérea existente. Esses fatores tornaram a rede subterrânea inviável para a aplicação específica analisada. Dessa forma, a opção escolhida para o estudo de caso foi a utilização de uma rede aérea. Essa escolha foi motivada pela disponibilidade de locais para instalação, custos inferiores em comparação com a rede subterrânea e a capacidade de realizar manutenções rápidas e eficazes. Apesar dos desafios relacionados aos problemas identificados, foram adotadas medidas para minimizar os impactos causados por descargas atmosféricas e crescimento vegetativo próximo à infraestrutura elétrica.

Palavras-chave: Energia elétrica, Distribuição, Rede, Aérea, Subterrânea, Redundante, Industrial.

ABSTRACT

Electrical energy plays a crucial role in several sectors, with the industry being one of the largest consumers of this type of energy. To ensure efficient supply, distribution network topologies exist, with overhead and underground networks being the most common. In the industrial context, where production systems are usually continuous and cannot be interrupted, problems in energy distribution can lead to large losses in production and affect the monitoring of essential systems for the safety of employees. These problems can arise due to several factors, such as the fall of trees on the electrical networks, the collision of vehicles with structures, or even floods caused by heavy rains. These occurrences can result in interruptions in electricity supply, compromising the industrial operation and causing significant losses. The work carried out a comparative study between overhead and underground electricity distribution networks in an industrial environment, and the objective was to determine which topology would be more viable for this context. In addition, a specific case study was presented involving a redundant aerial network to meet the energy needs of a dam in the mining industry. Several functional aspects and problems were identified for both topologies during the analysis. One of the main factors that cause interruptions in energy supply in industrial environments is lightning strikes and vegetation growth near electrical installations. In this context, the underground network is more suitable than the overhead network. Underground installation avoids problems related to falling trees, vehicle collisions, and direct atmospheric discharges on electrical lines. However, the case study identified some limiting aspects of adopting the underground network. Chief among these is the higher costs associated with installation and the flexibility in the installation process, especially in established areas with existing aerial infrastructure. These factors made the underground network unfeasible for the specific application analyzed. Thus, the option chosen for the case study was using an aerial network. This choice was motivated by the availability of installation sites, lower costs compared to the underground network, and the ability to carry out fast and effective maintenance. Despite the challenges related to the identified problems, measures were adopted to minimize the impacts caused by lightning and vegetative growth near the electrical infrastructure.

Keywords: Electric energy, Distribution, Network, Overhead, Underground, Redundant, Industrial.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura do Sistema Elétrico de Potência(FIEP, 2016).	14
Figura 2 – Linha de distribuição de energia elétrica (MATTEDE, 2022).	20
Figura 3 – Rede convencional com cruzeta. (ENERGIA, 2023).	21
Figura 4 – Rede de distribuição aérea compacta (ATSELETRICA, 2023).	22
Figura 5 – Comparativo entre a rede aérea convencional e compacta - (ANGELIS et al., 2011).	23
Figura 6 – Rede de distribuição aérea isolada (CELESC, 2020).	24
Figura 7 – Área de poda das redes aéreas - Adaptado (CELESC, 2020).	25
Figura 8 – Instalação de dutos para as redes subterrânea (CELESC, 2020).	25
Figura 9 – Estrutura das redes subterrânea (CORSINI, 2017).	26
Figura 10 – Para-Raios (Autoria própria).	34
Figura 11 – Chave Fusível e Chave Faca (Autoria própria).	34
Figura 12 – Isolador em porcelana (A) e em polimérico (B) (Autoria própria).	35
Figura 13 – Religador de energia elétrica (Autoria própria).	36
Figura 14 – Mapa comparativo entre os caminhos possíveis para a construção da rede aérea e subterrânea, Adaptado (MAPS, 2023).	41
Figura 15 – Estruturas utilizadas na construção da rede redundante (ENERGIA, 2023).	42
Figura 16 – Estrutura de formação do condutor elétrico Nu encajado de 336,4 mcm para instalações aéreas, Adaptado (CO, 2023).	43
Figura 17 – Instalação dos postes da rede redundante (Autoria própria).	44
Figura 18 – Centro de Monitoramento de Energia (Autoria própria).	45
Figura 19 – Quantitativo da duração da obra da rede aérea em dias úteis por tipo de atividade realizada (Autoria própria).	49
Figura 20 – Quantitativo da duração da obra da rede subterrânea em dias úteis por tipo de atividade realizada (Autoria própria).	49
Figura 21 – Levantamento dos custos da construção da Rede de Distribuição Aérea x Subterrânea (Autoria própria).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resistência daN para postes de concreto e madeira (CEMIG, 2020b).	44
Tabela 2	– Profundidade de engastamento postes com base na resistência daN (CEMIG, 2020b).	45
Tabela 3	– Dispositivos usados para a construção da rede aérea e possíveis usados para a rede subterrânea.	46
Tabela 4	– Indicadores de continuidade coletivo das redes de distribuição da CEMIG próximo a indústria (ANEEL, 2023a).	47
Tabela 5	– Indicadores de continuidade coletivos.	47
Tabela 6	– Indicadores de continuidade individuais das redes de distribuição da CEMIG próximo a indústria (ANEEL, 2023a).	48
Tabela 7	– Custos referentes à construção das redes com os dados coletados para o estudo de caso	51
Tabela 8	– Custos por km das redes.	51
Tabela 9	– Custos por manutenção corretiva nas redes aérea e subterrânea.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFMG Instituto Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	A distribuição de energia elétrica no ambiente industrial	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>16</i>
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
1.4	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Histórico das redes de distribuição de energia elétrica	18
2.2	Redes de distribuição de energia elétrica	19
2.2.1	<i>A distribuição de energia elétrica em ambiente industrial</i>	<i>20</i>
2.3	Tipos de redes de distribuição da energia elétrica	20
2.3.1	<i>Rede de Distribuição Aérea Convencional</i>	<i>21</i>
2.3.2	<i>Rede de Distribuição Aérea Compacta</i>	<i>22</i>
2.3.3	<i>Rede de Distribuição Aérea Isolada</i>	<i>23</i>
2.3.4	<i>Rede de Distribuição Subterrânea</i>	<i>24</i>
2.4	Comparativo entre as redes aéreas e subterrâneas	26
2.5	Qualidade da energia elétrica	27
2.5.1	<i>Indicadores de qualidade</i>	<i>28</i>
3	METODOLOGIA	29
3.1	Requisitos para a construção da rede de distribuição de energia elétrica	29
3.1.1	<i>Redes de Distribuição Aéreas: Requisitos Construtivos</i>	<i>30</i>
3.1.2	<i>Redes de Distribuição Subterrâneas: Requisitos Construtivos</i>	<i>30</i>
3.2	Principais componentes	31
3.2.1	<i>Principais componentes da rede de distribuição aérea</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Principais componentes da rede de distribuição subterrânea</i>	<i>32</i>
3.3	Dispositivos de Proteção das Redes de Distribuição	33
3.3.1	<i>Dispositivos de Proteção das Redes Aéreas</i>	<i>33</i>
3.3.2	<i>Para-Raios</i>	<i>33</i>

3.3.3	<i>Chave Fusível/ Chave Faca</i>	34
3.3.4	<i>Isoladores</i>	35
3.3.5	<i>Religadores</i>	36
3.3.6	<i>Dispositivos de Proteção das Redes Subterrâneas</i>	37
3.4	Indicadores de continuidade	37
3.5	Custo	40
3.6	Estudo de caso: rede de distribuição aérea redundante	41
3.6.1	<i>Levantamento estrutural</i>	42
3.6.2	<i>Componentes utilizados na construção da rede redundante</i>	43
3.6.3	<i>Monitoramento da rede</i>	45
4	RESULTADOS	46
4.1	Análise dos requisitos necessários para a execução do projeto	46
4.2	Custos	49
4.3	Considerações Finais	53
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a energia elétrica é gerada por fontes renováveis e não renováveis. O Balanço Energético Nacional de 2022 mostrou que a maior parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas, sendo 56.8% de geração total ((EPE), 2022), apresentando a importância desta fonte na matriz energética do país. Mesmo com os avanços tecnológicos, até o momento, a melhor alternativa para transportar a energia elétrica produzida pelas fontes geradoras até seus consumidores é por meio de condutores elétricos, sendo uma das formas mais viáveis desde o descobrimento da eletricidade. Assim, todo o sistema, desde a geração até a distribuição de energia é chamado de sistema elétrico de potência, como mostra a Figura 1.

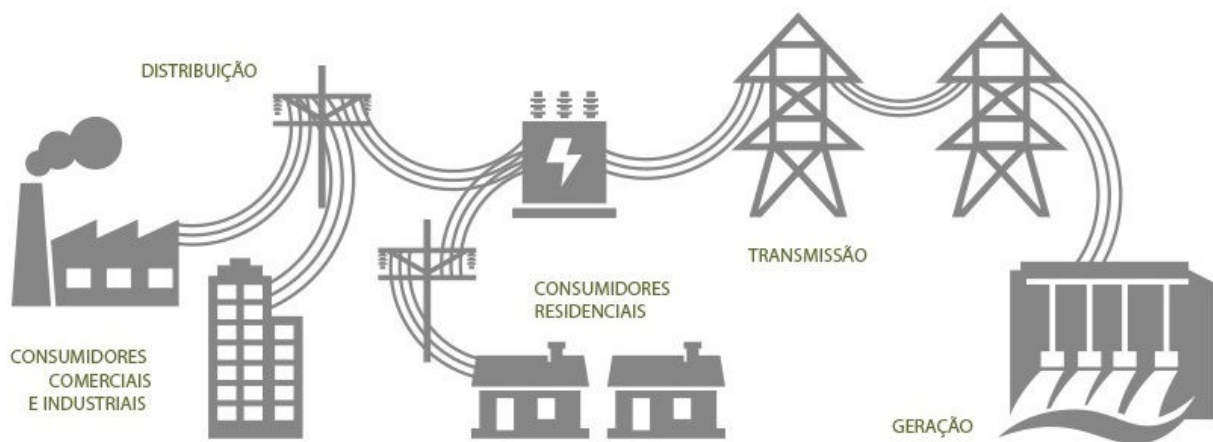


Figura 1 – Estrutura do Sistema Elétrico de Potência(FIEP, 2016).

Na transmissão da energia elétrica, os cabos responsáveis por essa etapa, são normalmente fixados em torres de metal por meios de isoladores. Esta energia é transportada até subestações, em que são importantes para adequar os níveis de tensão é fazer a conexão entre as empresas responsáveis por distribuir a energia para os consumidores. Há diversos equipamentos que compõem uma subestação, como transformadores, seccionadores, os dispositivos de proteção do sistema, como disjuntores, entre outros.

Grande parte dos consumidores finais de energia elétrica são os residenciais, mas também há outros que precisam de bastante atenção pela importância de seus processos no desenvolvimento das cidades, os consumidores industriais. Estes consumidores utilizam a energia elétrica em grande parte de seus processos. Na maioria das vezes os consumidores industriais não podem sofrer nenhum tipo de falta de energia pois podem comprometer toda a produção seja em qual for sua área de aplicação. Considerando a importância do funcionamento adequado do sistema, se fez necessário o estudo da distribuição de energia. Desse modo, para atender a portaria legislativa sobre rede redundante para as mineradoras de forma a garantir a continuidade dos circuitos

relacionados à segurança das barragens é implementada uma rede redundante de energia elétrica nesse cenário.

1.1 A distribuição de energia elétrica no ambiente industrial

A energia elétrica é essencial para o funcionamento de uma indústria. Como mencionado anteriormente, os sistemas de produção industriais não podem ser interrompidos. Por exemplo na mineração, onde há grandes tanques espessadores de lama, utilizados no processo para controle de densidade do minério, que se deixam de ser alimentados por energia elétrica, impactam diretamente o processo produtivo da indústria, acumulando toda a lama no fundo do tanque, visto que sua função é não deixar que a lama decante. O funcionamento dos espessadores não pode ser interrompido, pois ao decantar, a lama ocasiona a formação de uma crosta nas pás do equipamento elevando o risco de quebra das mesmas e conseqüentemente aumentando as manutenções. Um outro exemplo é na siderúrgica com fornos rotativos, que mesmo vazios continuam ligados, pois o custo para reaquece-los caso fossem desligados ou parados é maior que se deixá-los em funcionamento constante.

A distribuição de energia nestes ambientes pode ser feita com redes tanto aéreas como subterrâneas, dependendo da aplicação. Como algumas indústrias foram desenvolvidas muito anos atrás, alguns fatores não foram considerados para a construção dos sistemas para a distribuição da energia neste contexto. Isso faz com que este setor em específico apresente grandes oportunidades de melhoria na distribuição da energia elétrica. O crescimento da tecnologia e novos materiais podem tornar o sistema de um setor industrial mais eficiente. Assim, com o estudo das redes de distribuição de energia elétrica podemos definir a estrutura mais adequada para cada processo industrial.

No presente trabalho, o cenário escolhido para análise será a distribuição de energia elétrica numa indústria de mineração, onde serão analisadas as redes aéreas e subterrâneas, trazendo aspectos construtivos de uma rede de alimentação redundante, construída em conformidade com a legislação da portaria ANM95, que consolida os atos normativos que dispõem sobre a segurança de barragens de mineração.

1.2 Justificativa

A eficiência na distribuição da energia elétrica em processos industriais é primordial para o funcionamento da indústria. Com o avanço do desenvolvimento tecnológico e o lento processo de readequação das instalações com base em estudos recentes, a distribuição de energia elétrica em algumas indústrias conseqüentemente tornou-se menos eficiente. Dessa forma, com o conceito de distribuição de energia eficiente definido, surgiu a necessidade de estudar as topologias de redes de distribuição de energia elétrica para este contexto. Assim, a distribuição de energia

elétrica torna-se um dos fatores indispensáveis para as indústrias que desejam mitigar problemas no fornecimento de energia para seus processos.

Quando é citada eficiência na distribuição da energia elétrica em processos industriais muitas vezes, vêm em mente o conceito de aplicação de novas tecnologias. Contudo, este trabalho consiste em apresentar visões diferentes para dois tipos de rede de distribuição de energia elétrica em um ambiente industrial e realizar uma análise paralela com o setor de mineração. Um estudo de caso de uma rede de distribuição de energia elétrica é usado para consolidar os conceitos e aspectos de uma rede de distribuição aplicado nesse cenário.

Partindo dessas análises, é relevante estudar a distribuição de energia elétrica neste tipo de ambiente. Este estudo acadêmico visa contribuir com o gerenciamento da distribuição de energia elétrica em um estudo de caso de uma unidade industrial no setor de mineração, com apontamento de indicadores de eficiência e gestão da distribuição de energia. Assim, identificar e tomar possíveis medidas para mitigar os problemas que afetam o funcionamento das redes de distribuição de energia elétrica neste estudo de caso.

1.3 Objetivos

Na literatura, existem diferentes tipos de rede para a distribuição da energia elétrica em um ambiente industrial (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBIA, 2021), como redes aéreas e subterrâneas. O tipo de rede de distribuição da energia indicado para a indústria pode variar conforme alguns fatores, por exemplo, custo, flexibilidade, condições climáticas, entre outros. As demandas atuais de eficiência no funcionamento dessas redes indicam a necessidade de incorporar novos métodos de manutenção preventiva e corretiva, para que não tenha nenhuma perda na produção por falta de fornecimento de energia no sistema (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBIA, 2021). Nesse contexto, este trabalho propõe estudar e comparar uma rede elétrica de distribuição subterrânea e uma rede elétrica de distribuição aérea em ambiente industrial, analisando principalmente aspectos de confiabilidade das redes com base em um estudo de caso aplicado na indústria de mineração.

1.3.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desse trabalho é comparar dois tipos de redes de distribuição de energia elétrica em ambiente industrial, a fim de que identifique qual a melhor topologia de rede para ser aplicada nesse contexto. Também, apresentar quais estruturas possuem o melhor funcionamento, evitando perdas no fornecimento de energia, com base em um estudo de caso aplicado no segmento de mineração.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Além do objetivo geral apresentado, o trabalho ainda tem os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o funcionamento de redes elétricas de distribuição de energia aérea e subterrânea em ambiente industrial;
- Analisar os principais aspectos de confiabilidade das redes aérea e subterrânea em ambiente de mineração;
- Estudar a viabilidade da construção das redes elétricas aplicado a um estudo de caso na mineração.

1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho está dividida em cinco capítulos, onde cada um deles aborda as seguintes descrições:

- Capítulo 2: é feita uma revisão da literatura sobre os tipos de redes de distribuição de energia elétrica utilizadas no Brasil, assim como, suas principais vantagens e desvantagens apresentadas. A qualidade da energia elétrica e os indicadores de qualidade;
- Capítulo 3: são apresentados alguns equipamentos usados nas redes de distribuição de energia elétrica, discutindo as suas características mais relevantes. Além disso, é apresentado o estudo de caso de uma rede redundante de energia elétrica aplicado no contexto industrial;
- Capítulo 4: são discutidos os custos para a construção e manutenção das redes de distribuição, aérea e subterrânea. Também os indicadores de qualidade, individuais e coletivos das duas redes;
- Capítulo 5: é formado pelas conclusões do trabalho, onde são apresentadas as discussões finais sobre os resultados obtidos pelo comparativo entre a rede aérea e subterrânea para o ambiente industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritos os aspectos construtivos das redes de distribuição de energia aérea e subterrânea. Além disso, as diferenças existentes entre essas redes, como também a relação das redes de distribuição em um ambiente industrial. Por fim, é abordado o conceito sobre a qualidade de energia elétrica distribuída.

2.1 Histórico das redes de distribuição de energia elétrica

Um período histórico para o surgimento de uma nova forma de produção foi a revolução industrial, onde em 1781 surgiu a máquina a vapor. A partir deste período, houve uma maior necessidade do desenvolvimento de novas fontes para gerar energia, tanto para o setor industrial como para a rotina das pessoas (DATHEIN, 2003). Quase 100 anos após o surgimento da máquina a vapor, em 1882 surgiu a primeira empresa criada para gerar e comercializar a energia elétrica. Isso devido a criação da lâmpada por Thomas Edison, que desenvolveu uma nova forma de iluminação com uso da energia elétrica. O projeto da usina para geração de energia elétrica utilizava motores acionados por máquinas a vapor e a energia era distribuída por barramentos de cobre. A rede fornecia energia a uma tensão de 110 V em corrente contínua (CC) para até 400 usuários em uma área com o raio de 1600 metros (DAVIS, 2012)(SANTOS, 2014).

Após a fabricação dos primeiros transformadores, por George Westinghouse, os sistemas corrente alternada (CA) começaram a escalar em produção. Um ponto importante foi o desenvolvimento dos motores de indução e os síncronos bifásicos, por Nicola Tesla. Em 1892 Tesla criou seu primeiro motor de indução CA, um passo primordial para a evolução dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. A primeira aplicação de maior escala para a transmissão e distribuição de energia elétrica com CA foi na América do Norte, na construção do complexo de Niagara Falls, quando Westinghouse venceu a concorrência sobre a General Electric e Edson, opositores a CA. Este sistema de distribuição alcançou uma distância improvável para a transmissão em CC (WINCHELL, 2019)(FERRÃO44; NOGUEIRA45, 2017).

No Brasil, os primeiros registros de geração de energia elétrica foram no final do século XIX, com instalação da iluminação elétrica na Estação Central da Estrada de Ferro na cidade do Rio de Janeiro. Com o desenvolvimento industrial nas cidades da província de São Paulo em 1876, algumas cidades ganharam importância política e econômica, o que levou a cidade de Rio Claro a ser primeira a receber energia elétrica (GOMES; VIEIRA, 2009). Em 1883, foi construída a primeira usina hidrelétrica brasileira, no município de Diamantina, em Minas Gerais. A finalidade era fornecer energia elétrica para bombas hidráulicas em uma mina de diamantes. Este foi o primeiro registro de linhas de transmissão (LT) no país com 2 km de extensão, chegando a ser uma das maiores LT construída na época (FILHO, 2004).

Entre o final do século XIX e no início do século XX, houve um crescimento urbano no Brasil, especificamente em São Paulo e no Rio de Janeiro. Este movimento motivou empresas

estrangeiras a investirem nas instalações públicas. Como a empresa canadense *The Brazilian Traction, Light and Power Co* (Light), designada para serviços como iluminação pública e distribuição de eletricidade em 1899 (FERRÃO44; NOGUEIRA45, 2017). Com o crescimento da população nos primeiros 20 anos do século XX, a demanda por estes serviços se tornou cada vez maior. Assim, começou a exploração do potencial hidrelétrico brasileiro para a geração de energia elétrica. Em meados de 1926-1927 a empresa a norte-americana *American Foreign and Power Co* (AMFORP) foi constituída a segunda empresa de energia elétrica no país. As empresas Light e AMFORP, representavam cerca de 70% da geração de energia no país em 1930 (SAES, 1890) (SAES; SASSE, 2012).

O movimento acelerado de urbanização, sem um planejamento na construção das cidades no país, ocasionou algumas consequências para o setor elétrico. A distribuição da energia elétrica aos consumidores, por meio de redes aéreas, deixaram grandes centros visualmente poluídos por milhares de condutores elétricos, como também de telefonia e internet. Além da poluição visual, o excesso desses condutores dificulta a manutenção e preservação da rede. Além disso, as redes áreas convencionais podem sofrer interrupções no seu fornecimento, por cabos rompidos ou curtos-circuitos devido a ventos, animais ou objetos em contato com condutores energizados. Nos anos 50 e 60, iniciaram-se as construções de redes de distribuição de energia subterrâneas, para mitigar possíveis problemas das redes áreas. Este tipo de rede é uma alternativa para a distribuição de energia, porém o alto custo para a implementação comparado às redes aéreas impede que o sistema tenha uma expansão acelerada no país (CAMPOS; MACEDO; LOPES, 2019).

2.2 Redes de distribuição de energia elétrica

Redes de distribuição de energia elétrica possuem linhas de alta, média e baixa tensão. As linhas que possuem uma tensão igual ou superior a 230 kV podem ser chamadas de rede básica. A Figura 2 ilustra um exemplo de dois tipos de linha de distribuição, de média e baixa tensão, também chamadas de linhas primária ou secundária respectivamente. As linhas de média tensão são comumente usadas na distribuição da energia em ruas ou avenidas, com uma tensão entre 2,3 kV e 44 kV. Nesta linha, frequentemente, há três condutores aéreos fixos em cruzetas de madeira sobre postes de concreto. Alguns equipamentos podem ser encontrados neste tipo de linha, por exemplo, capacitores e reguladores de tensão. Estes equipamentos auxiliam na distribuição da energia, corrigindo algum eventual problema que possa acontecer, evitando possíveis danos em equipamentos da rede ou dos próprios consumidores (ELÉTRICA, 2022).

As linhas secundárias ou de baixa tensão podem ser vistas em uma altura inferior da linha de média tensão, de acordo com a Figura 2. A tensão deste tipo de linha está entre 110 e 440 V, onde a distribuição da energia elétrica é feita por meio dos ramais de ligação. Isso para consumidores residenciais e comerciais. As indústrias e comércios de médio porte utilizam a linha de média tensão, com a transformação da energia para níveis mais baixos de acordo com

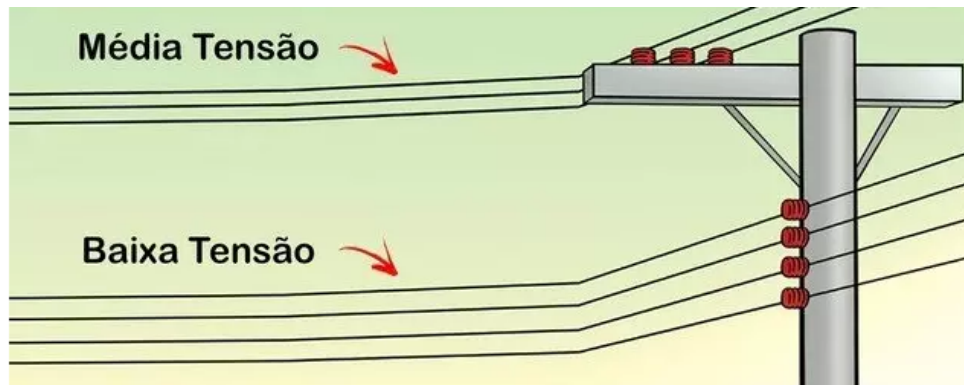


Figura 2 – Linha de distribuição de energia elétrica (MATTEDE, 2022).

suas necessidades próprias.

2.2.1 A distribuição de energia elétrica em ambiente industrial

A distribuição de energia elétrica no ambiente industrial começa pela rede primária, onde se encontra a subestação responsável por receber a energia transmitida pela concessionária. Em seguida, a energia passa pelos transformadores, os quais abaixam os níveis de tensão para alimentação das máquinas e equipamentos em toda indústria (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2021). Este processo pode ser considerado crítico, deste modo, exige cuidados para garantir a segurança dos trabalhadores e equipamentos. Além disso, a distribuição deve estabelecer a continuidade no fornecimento de energia para não interromper a produção. Deste modo, é necessário que a rede de distribuição opere com qualidade e tenha estabilidade no fornecimento para todos os equipamentos e máquinas do processo produtivo (BARROS RICARDO LUIS GEDRA, 2014).

O projeto de rede de distribuição da energia elétrica no cenário industrial deve ser confiável e eficiente. Para garantir o bom funcionamento é imprescindível seguir as normas de instalação e segurança vigentes, além disso, a execução deve ser feita por profissionais qualificados. A proteção da rede deve-se aos equipamentos contra sobrecargas e curtos-circuitos, por exemplo, disjuntores, fusíveis, religadores e o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). A presença de distúrbios elétricos na rede, como oscilações de tensão e harmônicas, podem afetar a operação dos equipamentos e comprometer a produção industrial. Contudo, o monitoramento da rede de distribuição visa estabelecer a qualidade e continuidade da energia elétrica distribuída (BARROS RICARDO LUIS GEDRA, 2014).

2.3 Tipos de redes de distribuição da energia elétrica

Existe mais de uma topologia de rede de distribuição, por isso é importante estudar os tipos de rede para definir qual a mais adequada para integração no cenário em estudo. Uma aplicação inadequada pode afetar o desempenho da rede elétrica, além disso, pode diminuir a vida útil

dos equipamentos e ocasionar um aumento de interrupções no fornecimento da energia elétrica. Deste modo, nas próximas subseções são abordados os quatro tipos de redes de distribuição de energia elétrica: aérea convencional, aérea compacta, aérea isolada e subterrânea.

2.3.1 Rede de Distribuição Aérea Convencional

No Brasil, a rede de distribuição aérea convencional é o tipo de rede mais utilizado para a distribuição de energia elétrica. Neste tipo de rede são usados tanto condutores de cobre como de alumínio. Os condutores de cobre são comumente aplicados em áreas litorâneas devido a degradação do tipo do material. Normalmente os condutores que compõem essa rede são nus, ou seja, sem isolamento. Isso mostra uma fragilidade da rede, pois se tornam mais susceptíveis à curto-circuito, desligamentos, principalmente quando há contato de galhos de árvores com os condutores elétricos (ABRADEE, 2022). Também são redes vulneráveis a descargas atmosféricas, sendo assim, para-raios devem compor a estrutura da rede para evitar possíveis danos (CELESC, 2020).

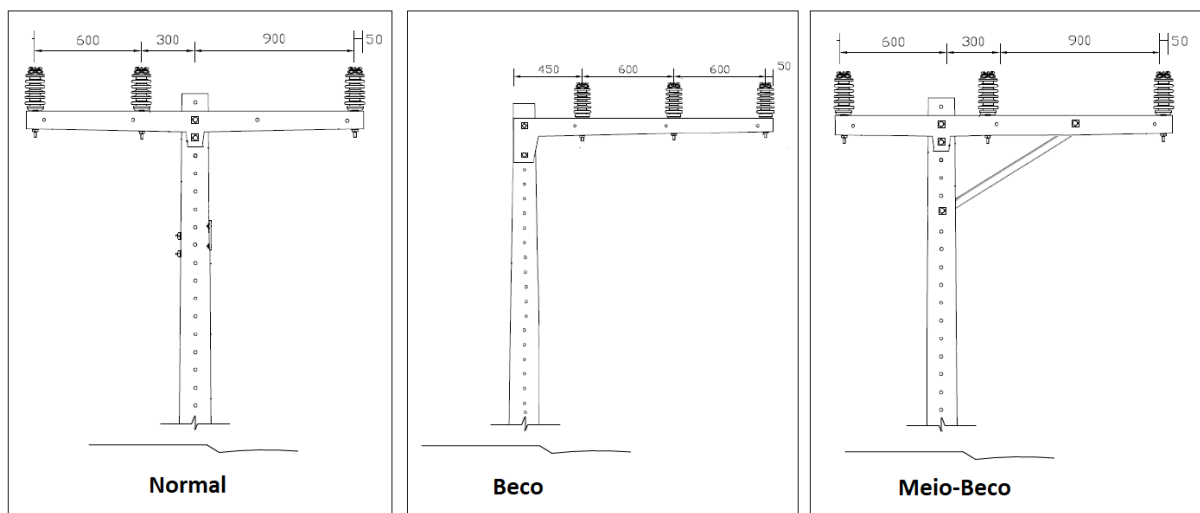


Figura 3 – Rede convencional com cruzeta. (ENERGIA, 2023).

A Figura 3 apresenta os principais tipos de redes convencionais de acordo com a posição da cruzeta. Na rede com cruzetas, as formas de montagem mais usadas são do tipo Normal, Beco e Meio-Beco, que são definidos pelo posicionamento do poste em relação às cruzetas, sendo do seguinte modo:

- Normal: quando o poste está em posição central em relação à cruzeta;
- Beco: quando uma das extremidades da cruzeta está fixada ao poste, com o poste completamente lateralizado em relação à cruzeta;

- Meio-Beco: quando o poste está situado em posição lateralizada em relação ao centro da cruzeta, mas não completamente como na estrutura tipo beco.

A estrutura mais usual é feita com os isoladores fixados em cruzetas, que podem ser de madeira, aço ou concreto. A vantagem desse tipo de montagem é em relação ao espaço ocupado no poste sendo de forma vertical, mas há a desvantagem de poder realizar a montagem de outros circuitos no mesmo nível. A estrutura tipo pilar na rede aérea convencional não utiliza cruzetas em sua montagem e os isoladores são fixados diretamente no poste, desse modo, a manutenção se torna mais segura e simplificada. Isso deve-se as ligações serem na horizontal, com uma distância maior entre os condutores.

2.3.2 Rede de Distribuição Aérea Compacta

Considerando que as redes áreas convencionais não apresentam uma alta confiabilidade devido aos condutores nus, ou seja, não possuem isolação, as distribuidoras de energia elétrica buscaram uma forma de melhorar a distribuição para aumentar a confiabilidade da rede, assim surgiu a rede aérea compacta. A Figura 4 exemplifica esse tipo de rede, que é composta por um cabo mensageiro para fornecer sustentação a três condutores em alumínio, cobertos com uma camada de polietileno para sua proteção. Além disso, os condutores são fixados em braços metálicos com espaçadores poliméricos, sendo fixados de 10 em 10 metros ao longo da linha em uma estrutura compacta (GOMES et al., 2010).



Figura 4 – Rede de distribuição aérea compacta (ATSELETRICA, 2023).

Na estrutura da rede aérea compacta também há para-raios para proteção contra descargas atmosféricas, chaves blindadas para seccionamento da rede e os transformadores de energia com proteção interna contra curto-circuito (ANGELIS et al., 2011). Esse tipo de rede é muito utilizado em saída de subestações, pois existe a necessidade de distribuir múltiplos circuitos. Isso é possível pela forma compacta da rede, onde o espaço dos cabos fixados no poste podem ser melhor aproveitados, podendo utilizar ambos os lados para a construção do circuito.

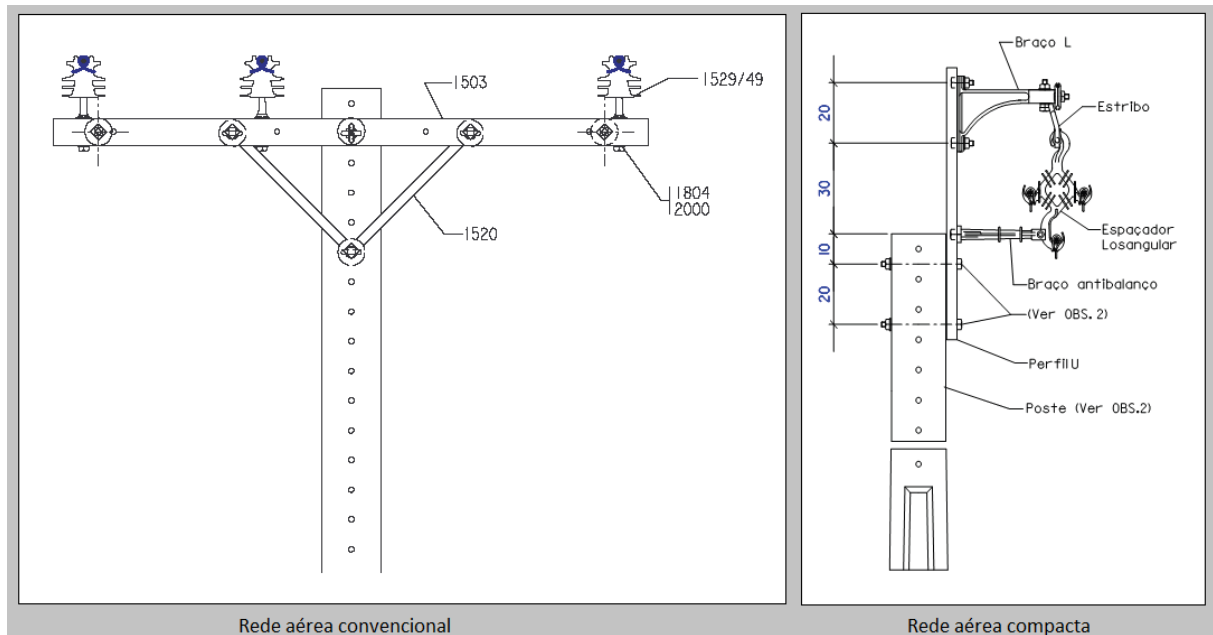


Figura 5 – Comparativo entre a rede aérea convencional e compacta - (ANGELIS et al., 2011).

A Figura 5 ilustra a diferença para a instalação dos condutores entre as redes aérea convencional e compacta. As redes compactas possuem algumas vantagens comparados com as redes aéreas convencionais. Os custos operacionais são menores devido a menor quantidade de intervenções para manutenção na rede. Também possuem baixo risco de acidentes pois há um aumento da segurança para operadores do sistema (ABRADEE, 2022). Além disso, não há contato dos condutores com a vegetação e, por serem compactas, a área de poda de árvores é significativamente menor.

2.3.3 Rede de Distribuição Aérea Isolada

A rede de distribuição aérea isolada é caracterizada pelo alto nível de confiabilidade, comparado com as redes aéreas vistas nas seções anteriores. A Figura 6 apresenta a estrutura dessa rede, que é composta por condutores trançados, isolados individualmente, o que faz a topologia da rede ganhar uma maior quantidade de espaço para a instalação de outros circuitos. Essa rede também é composta por três cabos fase isolados e um cabo mensageiro, como a rede aérea compacta. A grande diferença é que os cabos fase são enrolados em volta do cabo mensageiro de alumínio, dispensando o uso de suporte tipo cruzeta e isoladores.

Nesse tipo de rede, o cabo mensageiro deve ser conectado ao da rede secundária (neutro) nas estruturas onde houver aterramento como uma proteção elétrica, visto que ele é interligado ao neutro do secundário em todo ponto de aterramento. Os condutores são multiplexados, com camadas semicondutoras, os deixam isolados eletricamente por manter o campo elétrico internamente no próprio condutor (QUEIROZ et al., 2003). Também há a minimização dos efeitos gerados pelas descargas atmosféricas, pois há um aterramento nos dois lados do cabo trasposto,



Figura 6 – Rede de distribuição aérea isolada (CELESC, 2020).

umentando a segurança da rede. Outro aspecto importante é o baixo custo operacional, tendo em vista que a ocorrência de falhas é minimizada. Entretanto, a maior desvantagem desse tipo de rede é o alto custo de instalação, isso faz a rede isolada ser uma opção de instalação somente onde não há viabilidade para a instalação de outros tipos de rede aérea.

Por possuir condutores blindados, a rede aérea isolada não apresenta desligamentos em virtude de descargas atmosféricas, entretanto são susceptíveis a surtos provenientes de outras redes aéreas, como as redes convencionais ou compactas. Por outro lado, a rede aérea isolada não é susceptível a desligamentos por possíveis contatos com vegetação, assim não há a necessidade de poda da vegetação (VELASCO, 2003). A Figura 7 ilustra a proporção da área de poda dos três tipos de rede aérea apresentados. Contudo, as redes isoladas trazem uma maior segurança e confiabilidade para a distribuição da energia elétrica comparado a outras redes aéreas.

2.3.4 Rede de Distribuição Subterrânea

As redes subterrâneas tiveram o início de suas instalações no Brasil nas décadas de 50 e 60, e trouxe como um grande benefício à revitalização dos centros urbanos. Essas redes são compostas por condutores isolados e blindados, em dutos ou canaletas enterradas. As redes subterrâneas são caracterizadas pela forma na qual os condutores são instalados e podem ser divididas em dois tipos: semienterradas e totalmente enterradas. É chamado de rede subterrânea semienterrada quando os condutores são enterrados e os equipamentos são instalados ao nível do solo, e rede subterrânea totalmente enterrada quando os condutores e os equipamentos são totalmente enterrados. A melhor forma de instalação do sistema para a distribuição depende

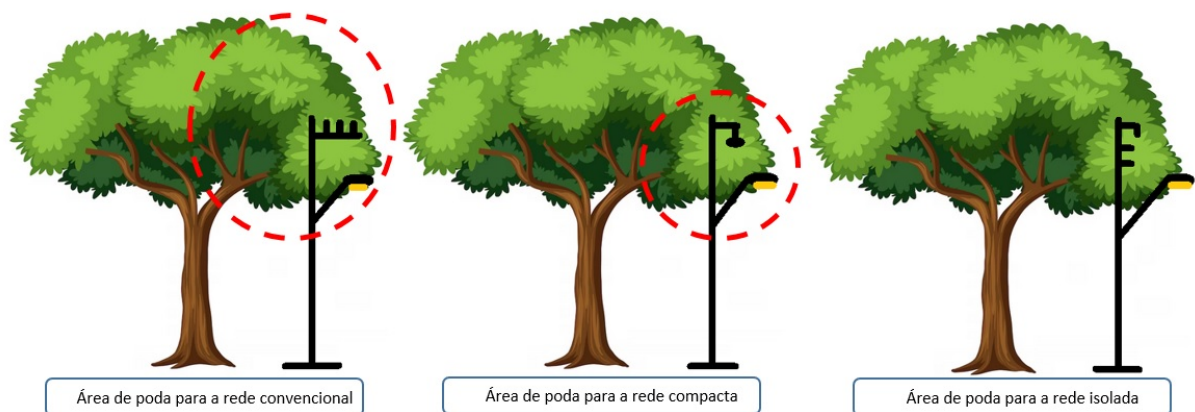


Figura 7 – Área de poda das redes aéreas - Adaptado (CELESC, 2020).

do custo e da área disponível (CELESC, 2020). Além desses aspectos, as redes subterrâneas proporcionam o maior nível de confiabilidade.



Figura 8 – Instalação de dutos para as redes subterrâneas (CELESC, 2020).

A Figura 8 apresenta a forma como os dutos, responsáveis pela passagem dos condutores, são colocados no solo para a rede distribuição de energia elétrica subterrânea. A Figura 9 ilustra o esquema estrutural da distribuição de energia elétrica subterrânea. Esse sistema é composto por caixas de inspeção, localizadas no subsolo, usadas para facilitar a passagem dos condutores pelos dutos e caixa de junção ou passagem, as quais permitem a derivação dos ramais do circuito. Além disso, há as câmaras de transformação, onde são fixados os equipamentos, por exemplo, chaves de seccionamento e protetores de rede (MARTINS, 2012).

O custo para a instalação deste tipo de rede é mais elevado comparando com as redes aéreas, devido ao trabalho de infra estrutura do solo para a integração da rede. Isso faz com que

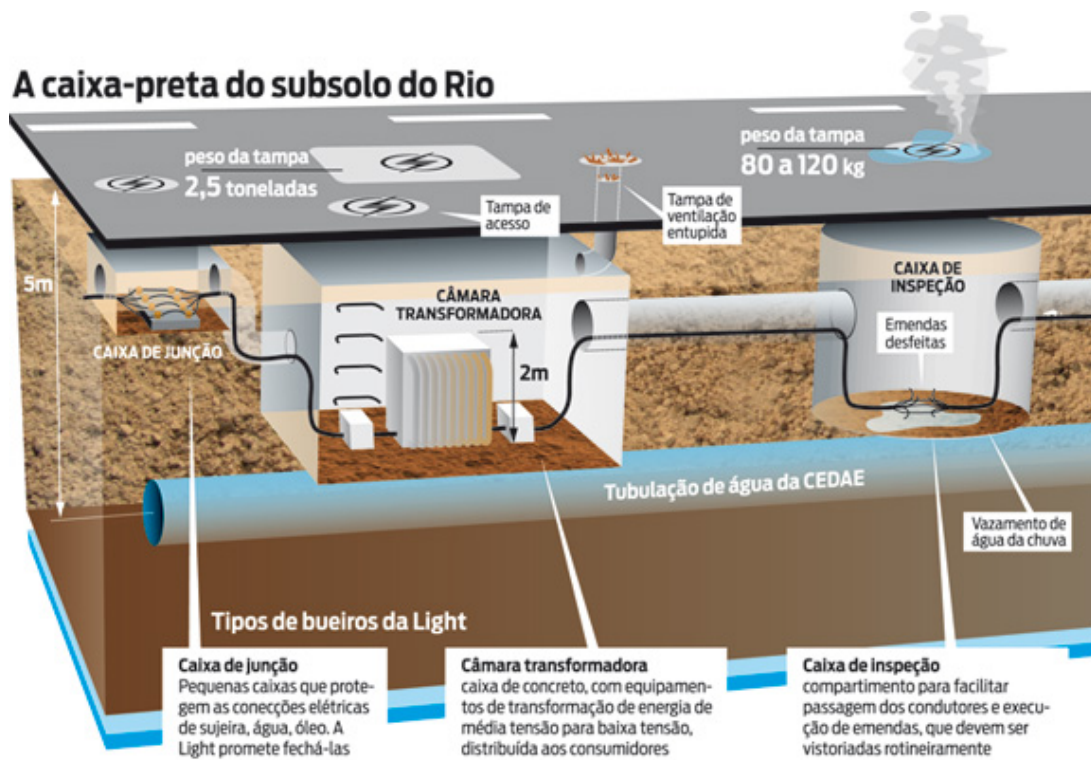


Figura 9 – Estrutura das redes subterrânea (CORSINI, 2017).

esse modo de distribuição de energia seja indicado para locais onde há uma grande quantidade de circuitos e equipamentos aéreos, como também onde fatores históricos devem ser preservados, por exemplo, em cidades históricas. As principais vantagens das redes subterrâneas são o alto nível de segurança, baixo índice de falhas, redução dos custos com manutenção, além da preservação da vegetação, sem a necessidade de poda (ABRADEE, 2022).

2.4 Comparatido entre as redes aéreas e subterrâneas

As redes de distribuição de energia elétrica aéreas e subterrâneas têm vantagens e desvantagens em relação ao uso em ambientes industriais, que devem ser consideradas antes de escolher qual topologia de rede usar. A seguir, apresento algumas delas:

Redes aéreas:

- **Vantagens:** as redes aéreas são mais fáceis e mais rápidas de instalar ao se comparar as redes subterrâneas. As manutenções são menos trabalhosas pois estão mais expostas e podem ser inspecionadas com maior facilidade. São menos suscetíveis a danos causados por enchentes e inundações. Permitem o uso de torres e postes que podem ser usados para outros fins, como a instalação de câmeras de segurança.
- **Desvantagens:** essas redes podem ser afetadas por condições climáticas, como ventos fortes,

tempestades e descargas atmosféricas. Além disso, também podem ser afetadas por galhos de árvores e outras obstruções ou apresentar riscos para a segurança dos trabalhadores que precisam realizar manutenção na rede aérea. Por fim, a estética do ambiente pode ser afetada pela presença de postes e condutores.

Redes subterrâneas:

- **Vantagens:** são esteticamente mais atraentes, pois não há postes e condutores visíveis. Oferecem maior segurança em áreas onde há tráfego de veículos e pedestres. Além disso, não são afetadas por condições climáticas extremas.
- **Desvantagens:** possui um custo maior e uma instalação mais complexa comparado as redes aéreas. Em caso de falha, pode ser mais difícil localizar e reparar o problema. Além disso, requerem manutenção especializada e possuem um alto custo para reparação. São mais suscetíveis a danos causados por obras subterrâneas e corrosão por infiltrações.

Dessa forma, as redes aéreas apresentam vantagens em termos de facilidade de instalação, menor custo, facilidade de expansão e manutenção, enquanto as redes subterrâneas apresentam vantagens em termos de segurança, menor vulnerabilidade às condições climáticas e menor impacto visual. A escolha entre uma ou outra opção deve ser feita com base em uma avaliação minuciosa das necessidades do ambiente industrial em questão e das características das duas opções disponíveis.

2.5 Qualidade da energia elétrica

A qualidade da energia elétrica no ambiente industrial é uma questão crucial, já que falhas ou interrupções no fornecimento de energia elétrica podem levar a perdas financeiras significativas e interrupções no processo produtivo. A distribuição de energia elétrica no ambiente industrial é geralmente feita por meio de redes de distribuição de média e alta tensão, que alimentam subestações de transformação e distribuição localizada em cada unidade industrial. Esses sistemas de distribuição de energia elétrica são projetados para fornecer uma fonte confiável de energia elétrica aos equipamentos industriais, mantendo a qualidade da energia elétrica em níveis adequados.

A qualidade da energia elétrica no ambiente industrial é medida por meio de parâmetros estabelecidos para as grandezas tensão, corrente e frequência, bem como, parâmetros utilizados para análise da distorção harmônica. A tensão e a frequência devem ser mantidas dentro de limites especificados para garantir a operação adequada dos equipamentos industriais. A distorção harmônica é uma medida da qualidade da onda elétrica, que pode afetar a operação de equipamentos sensíveis.

Para garantir a qualidade da energia elétrica no ambiente industrial, as empresas podem implementar medidas como o uso de equipamentos de proteção, como filtros de harmônicos, para reduzir a distorção harmônica e manter a qualidade da energia elétrica. Além disso, as empresas podem implementar sistemas de monitoramento de energia elétrica para rastrear o desempenho da rede elétrica e detectar quaisquer problemas precocemente. Em resumo, a qualidade da energia elétrica no ambiente industrial é fundamental para garantir a continuidade e eficiência da produção.

2.5.1 Indicadores de qualidade

Existem diversos indicadores de qualidade de energia elétrica que podem ser utilizados para avaliar a eficiência e a confiabilidade da rede elétrica. No ambiente industrial, estes indicadores podem incluir parâmetros adicionais que são mais específicos para as necessidades das indústrias. Alguns dos principais indicadores de qualidade de energia elétrica no ambiente industrial incluem:

- **Quedas de tensão:** podem levar à perda de produção ou avarias em equipamentos críticos. É importante monitorar a variação da tensão elétrica para identificar áreas com problemas de instabilidade de tensão e tomar medidas para corrigi-los.
- **Distorção harmônica:** a presença de distorção harmônica na rede elétrica pode afetar o funcionamento adequado de equipamentos sensíveis, como motores elétricos, inversores de frequência e transformadores. Por isso, é importante monitorar a distorção harmônica e tomar medidas para reduzir seus efeitos, como o uso de filtros de harmônicos. Os harmônicos de ordem superior também podem causar problemas em equipamentos elétricos, como a geração de calor excessivo em motores elétricos. É importante monitorar a presença de harmônicos de ordem superior e tomar medidas para reduzir seus efeitos.
- **Fator de potência:** é uma medida da eficiência energética do sistema elétrico. Um fator de potência baixo pode indicar a presença de cargas reativas que consomem energia sem fornecer trabalho útil. É importante monitorar o fator de potência e tomar medidas para corrigir qualquer problema, como a instalação de capacitores.
- **Interrupções de energia elétrica:** podem causar perdas significativas de produção e danos aos equipamentos. É importante monitorar o tempo de interrupção e identificar áreas com problemas de confiabilidade da rede elétrica.

Estes são alguns exemplos de indicadores de qualidade de energia elétrica no ambiente industrial. Cada indústria pode ter suas próprias necessidades e exigências específicas de qualidade de energia elétrica, sendo importante monitorar continuamente o desempenho da rede elétrica para garantir a eficiência e a confiabilidade da produção.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os componentes e requisitos necessários para a construção de uma rede de distribuição de energia elétrica, dos tipos, aérea e subterrânea. Também é apresentado um estudo de caso aplicado em um ambiente industrial, com a construção de uma rede de distribuição de energia aérea redundante, com o intuito de reforçar os conceitos discutidos no Capítulo 2.

3.1 Requisitos para a construção da rede de distribuição de energia elétrica

A construção de uma rede de distribuição aérea em um ambiente industrial pode apresentar algumas dificuldades, como, a grande concentração de equipamentos, maquinários nesse ambiente e as restrições de espaço podem ser uma barreira na instalação da rede. Além disso, se a rede for construída em um terreno com a topografia irregular, sendo necessários projetos adicionais de terraplanagem ou instalação de estruturas de suporte para a rede. Apesar dessas dificuldades, a construção das redes aéreas apresenta uma maior viabilidade para a construção, se comparado às redes subterrâneas. Isso se deve a diversos fatores, tais como:

- **Custo:** geralmente, a construção de uma rede subterrânea é mais cara do que a construção de uma rede aérea. Isso ocorre devido aos custos construtivos, como a escavação das valas onde irão passar os condutores, instalação de dutos, compactação do solo e reparos em caso de manutenção. Em ambientes de mineração, o custo pode ser ainda maior e a instalação mais complexa, pois além de rochas e elevações no solo, o transporte de máquinas pesadas exige uma construção mais robusta possível (PRESCOTT, 2018).
- **Flexibilidade:** as redes aéreas permitem maior mobilidade no redesenho e adaptações para futuras expansões, enquanto a rede subterrânea pode ter suas limitações. Esse aspecto faz com que a instalação das redes aéreas no ambiente industrial seja mais vantajosa, devido as mudanças frequentes de pontos de consumo de energia e disposição dos equipamentos.
- **Facilidade de instalação:** a rede aérea geralmente é mais fácil e rápida de ser instalada do que a rede subterrânea, já que não há necessidade de escavação e instalação de dutos. Nas indústrias o tempo de inatividade pode ser crítico para a produção, assim a instalação rápida e eficiente é um fator importante na escolha do tipo da rede.
- **Manutenção:** a manutenção de uma rede aérea geralmente é mais fácil e rápida do que a manutenção de uma rede subterrânea. Em uma rede aérea, a identificação da ocorrência além de ser mais rápida, devido à possibilidade de reconhecimento em inspeções com termografia e alertas nas salas de controle da rede, os cabos e componentes de proteção são facilmente acessíveis, facilitando a identificação e correção de problemas. Já em uma rede subterrânea, os problemas são mais difíceis de serem detectados e corrigidos, conse-

quentemente gera um tempo maior de inatividade no fornecimento de energia (CELESC, 2020).

As características do ambiente influenciam na escolha da tipo da rede de distribuição a ser integrada, tendo em vista que cada cenário possui suas particularidades, como as normas e regulamentações aplicáveis. Nas próximas subseções são apresentados alguns dos requisitos específicos para a instalação das redes aéreas e subterrâneas neste contexto.

3.1.1 Redes de Distribuição Aéreas: Requisitos Construtivos

Para a construção de uma rede de distribuição aérea em um ambiente industrial, existem alguns requisitos a serem considerados (CELESC, 2020):

- **Proteção mecânica:** como nesse ambiente há um tráfego constante de veículos pesados, uma característica do ambiente industrial da mineração, com grandes equipamentos, isso pode aumentar os riscos de danos à rede devido a vibrações ou movimentações do solo. Assim, é importante que os materiais utilizados na construção da rede sejam resistentes e que também sejam instalados dispositivos de proteção na mesma, como isoladores de vibração;
- **Proteção contra descargas elétricas:** neste cenário, a rede de distribuição tem alta probabilidade de sofrer danos causados por descargas elétricas. Assim, torna-se imprescindível a instalação de isoladores e para-raios na rede, a fim de garantir a segurança dos trabalhadores e equipamentos ;
- **Flexibilidade do sistema:** como na mineração as mudanças são constantes, por exemplo, áreas são altamente exploradas e posteriormente inviabilizadas de extração de minério, sendo então desativadas. Isso exige mudanças na localização da rede. Assim ela deve ser projetada com a flexibilidade necessária para ser redimensionada e adaptada às mudanças na operação da mina e usina;
- **Altura da rede:** a altura da rede deve atender as normas vigentes na indústria, a fim de garantir a segurança dos trabalhadores e equipamentos de mineração. A rede precisa ser alta, mas possuir uma altura controlada de acordo com os limites de segurança para que não aumente o risco de descargas elétricas, além de falhas mecânicas.

3.1.2 Redes de Distribuição Subterrâneas: Requisitos Construtivos

Apesar da alta complexidade para a instalação, as redes subterrâneas são uma opção onde há a impossibilidade de instalação de uma rede aérea. Assim como as redes aéreas, para a implementação de uma rede subterrânea em uma mineradora, também há requisitos que devem ser considerados (CEMIG, 2020a), sendo eles:

- Resistência mecânica: as redes de distribuição subterrâneas nesse cenário estão sujeitas a condições mecânicas extremas, como vibrações, deslocamentos de solo e esforços decorrentes de explosões. Portanto, os cabos e equipamentos devem ser projetados para resistir a essas condições;
- Proteção contra umidade: as minas onde são feitas as extrações de minério geralmente são úmidas, o que pode causar problemas nos condutores. Assim, é importante garantir que os materiais utilizados sejam resistentes à umidade e que medidas adequadas de proteção, como isolamento de cabos e invólucros à prova d'água, sejam implementadas;
- Proteção contra incêndio e explosão: a presença de equipamentos e materiais inflamáveis e explosivos em ambientes de mineração requer medidas de proteção contra incêndio e explosão. É importante que a rede de distribuição subterrânea seja projetada para minimizar o risco de incêndio ou explosão, e que sistemas adequados de detecção e supressão de incêndios sejam instalados;
- Acessibilidade: em caso de manutenção ou reparos, é importante que a rede seja facilmente acessível para os técnicos e engenheiros. Portanto, é necessário projetar acessos adequados e seguros para permitir a manutenção da rede.

O planejamento correto desses requisitos construtivos para a implementação da rede subterrânea neste ambiente são essenciais para evitar transtornos e garantir a segurança da instalação, de pessoas e veículos que transitam próximo a instalação.

3.2 Principais componentes

3.2.1 Principais componentes da rede de distribuição aérea

O sistema de distribuição de energia aérea pode ter alguns componentes específicos, em função das características do ambiente e das cargas elétricas envolvidas. Dentre os principais componentes, podemos destacar:

- Cabos condutores de energia: no cenário industrial, devem ser projetados para suportar as condições adversas do ambiente, como alta umidade, temperaturas e exposição a produtos químicos. Para garantir sua durabilidade e resistência, são revestidos com materiais especiais, como polietileno reticulado ou etileno propileno dieno monômero (EPDM) (CEMIG, 2020b);
- Postes: devem ser capazes de suportar as cargas elétricas envolvidas e as condições adversas do ambiente. Eles podem ser de concreto armado ou de polipropileno, com reforços estruturais adicionais para garantir sua resistência (CEMIG, 2020b);

- Cruzetas: fixadas nos postes, destinadas a suportar condutores e equipamentos das redes de distribuição aéreas. Elas são feitas de materiais isolantes, de madeira, e geralmente em formato de T, permitindo que vários fios sejam conectados a partir de uma única conexão (CEMIG, 2020b).
- Acessórios de fixação: são componentes utilizados para fixar os cabos e outros equipamentos na estrutura dos postes. Alguns exemplos de acessórios de fixação incluem as alças performadas, abraçadeiras e as braçadeiras de ancoragem (CEMIG, 2020b);
- Transformadores: são utilizados em diversos ambientes industriais e devem ser projetados para suportar as condições adversas do ambiente, como poeira, umidade e vibrações. Eles também podem ser equipados com dispositivos de proteção adicionais, como disjuntores, para garantir a segurança do sistema (FILHO, 2013);
- Chaves seccionadoras: dispositivos de proteção que atuam para interromper a energia elétrica em caso de falhas ou sobrecargas na rede. Na indústria, elas devem ser projetadas para suportar cargas elétricas elevadas e condições adversas do ambiente (FILHO, 2013);
- Aterramentos: é fundamental para garantir a segurança dos usuários em caso de falhas ou descargas elétricas. Ele deve ser projetado para escoar cargas elétricas elevadas e condições adversas do ambiente (FILHO, 2013);
- Medidores de energia: devem ser projetados para suportar cargas elétricas elevadas e condições adversas do ambiente. Eles também podem ser equipados com sistemas de comunicação remota para permitir o monitoramento e a gestão do consumo de energia.

Esses são alguns dos principais componentes de um sistema de distribuição de energia aérea em um ambiente industrial. É importante destacar que cada sistema pode ter características específicas, dependendo do tipo de carga envolvida e das condições do ambiente. A escolha dos componentes deve ser feita com base em critérios técnicos e de segurança, levando em consideração as normas e regulamentações aplicáveis.

3.2.2 Principais componentes da rede de distribuição subterrânea

As redes subterrâneas utilizam componentes semelhantes as redes aéreas, por exemplo, transformadores de energia e disjuntores para a proteção da rede (CEMIG, 2020a). Além disso, outros componentes são necessários para a construção da rede, como os seguintes:

- Cabos subterrâneos: são projetados para transmitir eletricidade de uma fonte de energia para as cargas elétricas, como motores elétricos. Em projetos de rede de distribuição subterrânea até 34,5 kV, os cabos utilizados devem ser constituídos por um único condutor elétrico isolado, protegido por várias camadas de material não metálico e contínuo, destinado a proteger o cabo contra influências externas (NEOENERGIA, 2021);

- Caixas de distribuição: usadas para conectar os cabos subterrâneos aos transformadores e disjuntores. Além disso, elas são usadas para distribuir as cargas;
- Caixas de inspeção: feitas de concreto e destinadas a alojar acessórios, emendas e derivações de média e baixa tensão. Sua finalidade é facilitar a passagem dos cabos, por exemplo, nas mudança de direção (CEMIG, 2020a). Também as paredes das caixas devem ser impermeabilizadas de forma a evitar a infiltração de água;
- Eletrodutos: esses componentes fazem parte de um sistema de cabeamento fechado de seção circular para proteger e conduzir os cabos subterrâneos. Também protegem os acessórios usados para conectar os cabos aos transformadores e às caixas de distribuição (CEMIG, 2020a);
- Equipamentos de teste e medição: os equipamentos de teste e medição são usados para verificar a integridade da rede elétrica e garantir que a eletricidade esteja sendo distribuída de forma eficiente e segura.

3.3 Dispositivos de Proteção das Redes de Distribuição

A proteção dos equipamentos e pessoas é primordial quando se trata de eletricidade. As redes de distribuição de energia elétrica devem atender os requisitos necessários para garantir a segurança de todos. Nas próximas seções são apresentados alguns dos principais dispositivos de proteção usados nas redes de distribuição, aéreas e subterrâneas, no ambiente industrial.

3.3.1 Dispositivos de Proteção das Redes Aéreas

As redes aéreas de distribuição de energia elétrica são compostas por diversos dispositivos de proteção. Nas próximas subseções são apresentados alguns desses componentes principais para a proteção a rede elétrica.

3.3.2 Para-Raios

Os para-raios são dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas, as quais podem causar danos a rede elétrica e aos equipamentos conectados a ela. Nas redes aéreas construídas em meio a mineração, os para-raios são ainda mais importantes. As condições climáticas e geográficas, associadas à usual exposição de estruturas na área industrial, podem aumentar a probabilidade de incidências de descargas atmosféricas (FILHO, 2013).

A Figura 10 ilustra o dispositivo usado na rede de distribuição aérea, que no ambiente industrial deve ser dimensionado de acordo com as normas técnicas e padrões de segurança do ambiente. A NBR-5419 é a norma brasileira que estabelece as diretrizes para o projeto, instalação e manutenção do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Além disso, os



Figura 10 – Para-Raios (Autoria própria).

para-raios devem ser instalados em pontos estratégicos da rede de distribuição, como em postes, transformadores e subestações. Eles devem ser conectados a um sistema de aterramento adequado, de forma que, permita a dissipação da corrente elétrica que é gerada por eventuais descargas atmosféricas que incidem diretamente nos elementos da rede quanto em sua proximidade. Por fim, eles devem ser testados e inspecionados periodicamente, garantindo a eficácia do dispositivo na proteção da rede elétrica e dos equipamentos conectados à mesma.

3.3.3 Chave Fusível/ Chave Faca

A Figura 11 ilustra a chave fusível (A) e a chave faca (B), respectivamente. Esses são os dispositivos de manobra que utilizados nas redes aéreas, com a função de realizar a abertura e o fechamento de circuitos elétricos, de forma manual ou automática.

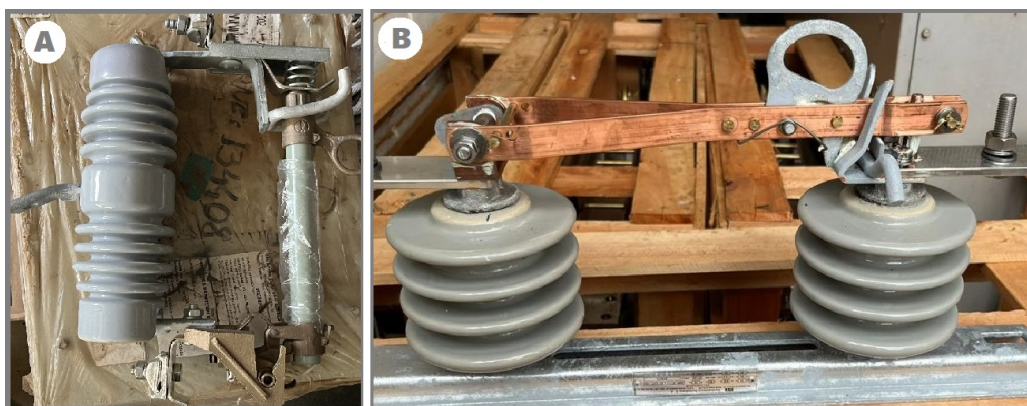


Figura 11 – Chave Fusível e Chave Faca (Autoria própria).

A chave fusível é utilizada em circuitos de baixa e média tensão e têm como principal função proteger a rede elétrica contra sobrecorrentes e curtos-circuitos. Ela possui um fusível que

abre em caso de sobrecorrente, interrompendo o fornecimento de energia elétrica e protegendo a rede contra danos (FILHO, 2013). Já as chaves faca são utilizadas em circuitos de alta tensão e têm como principal função isolar seções da rede elétrica para manutenção, expansão ou reconfiguração. Elas possuem duas hastes metálicas que são acionadas manualmente ou automaticamente para abrir ou fechar o circuito elétrico.

Ambas as chaves devem ser dimensionadas de acordo com a demanda de energia elétrica da rede de distribuição e as características dos equipamentos conectados à mesma. Elas também devem ser inspecionadas periodicamente para garantir o seu funcionamento adequado e a sua eficácia na manobra da rede elétrica. A manutenção preventiva e corretiva das chaves deve ser feita regularmente para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica.

3.3.4 Isoladores

Os isoladores são dispositivos utilizados para isolar eletricamente os cabos condutores da rede elétrica dos postes, ilustrados pela Figura 12. Eles impedem a passagem de corrente elétrica pelos postes e demais componentes da estrutura. Esses dispositivos são comumente fabricados em porcelana, polímero e outros compostos sintéticos, sendo escolhidos de acordo com as características elétricas e mecânicas da rede em que serão utilizados (FILHO, 2013). O tipo de isolador a ser aplicado vai depender do nível de tensão de operação da rede pois cada material suporta uma quantidade específica de carga elétrica definida pelo fabricante do dispositivo.



Figura 12 – Isolador em porcelana (A) e em polimérico (B) (Autoria própria).

Os isoladores são projetados para suportarem as condições climáticas adversas, como chuva, vento, granizo e temperaturas extremas. Além disso, eles devem suportar as tensões elétricas da rede e sobretensões. É importante que os isoladores sejam inspecionados regularmente para garantir sua integridade e desempenho adequado, pois qualquer falha ou quebra pode causar curtos-circuitos, interrupções no fornecimento de energia e até mesmo acidentes graves.

3.3.5 Religadores

Os religadores são dispositivos instalados na rede de distribuição de energia elétrica que têm como função detectar falhas na rede e isolar seções defeituosas para evitar a interrupção de energia em uma grande área. A Figura 13 ilustra esse dispositivo de proteção. Eles são capazes de reconhecer uma anomalia na rede, como um curto-circuito e desligar automaticamente a seção defeituosa. Em seguida, o religador tenta religar a energia elétrica a seção isolada algumas vezes para verificar se a anomalia ainda está presente. Se o problema persistir, o religador mantém a seção isolada para evitar danos a rede e dessa forma, garante a continuidade do fornecimento de energia elétrica para as cargas do sistema de distribuição.



Figura 13 – Religador de energia elétrica (Autoria própria).

Os religadores minimizam o tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica (FILHO, 2013). Além disso, reduzem os custos operacionais, já que evitam a necessidade de enviar equipes para inspecionar manualmente a rede. Por fim, podem ser instalados em postes de distribuição, em subestações e em outros pontos da rede de distribuição, de acordo com as necessidades específicas de cada sistema de energia elétrica.

3.3.6 Dispositivos de Proteção das Redes Subterrâneas

No ambiente industrial, a proteção das redes subterrâneas é ainda mais crítica, devido a quantidade de tubulações no solo, por exemplo, para a distribuição de gás ou água. Também há um alto fluxo de veículos e pessoas nesse ambiente. Além dos dispositivos de proteção como, relés, disjuntores e fusíveis, outros dispositivos podem ser utilizados para proteger os componentes do sistema nesse tipo de rede.

Estruturas altas e metálicas são mais suscetíveis as descargas atmosféricas, no entanto, em campos abertos também existe uma alta vulnerabilidade desse fenômeno climático atingir as instalações subterrâneas. Dessa forma, os para-raios também são dispositivos importantes a ser usado nesse tipo de rede, para a proteção contra possíveis picos de tensão por essas ações climáticas. Outro fator importante é o aterramento dos equipamentos. Os condutores de aterramento devem ser contínuos, desse modo, os dispositivos, como os transformadores e quadros de distribuição, devem ser aterrados na mesma malha de aterramento utilizando cabos de cobre nu. Nos quadros devem ser instalados DPSs, dispositivos de proteção contra sobretensões (S.A, 2016).

Contudo, as redes subterrâneas estão imunes a alguns fatores que leva interrupção de energia nas redes aéreas, como queda de árvores, interferência de animais e da vegetação. Assim, esse tipo de rede se torna menos vulnerável a interrupções comparado as redes aéreas.

3.4 Indicadores de continuidade

Os indicadores de continuidade são utilizados para avaliar a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras de energia elétrica. A ANEEL estabelece que as concessionárias de energia elétrica devem adotar medidas para garantir a continuidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores (ANEEL, 2023b).

Os indicadores de continuidade devem ser capazes de detectar e indicar falhas ou interrupções no fornecimento de energia elétrica, permitindo que as concessionárias possam agir rapidamente para solucionar o problema. Além disso, a ANEEL estabelece as características técnicas e os requisitos mínimos de desempenho para estes indicadores, por exemplo, a detecção da presença ou ausência de energia elétrica, a confiabilidade e durabilidade do equipamento e a facilidade de instalação e manutenção. Os indicadores de continuidade mais usados para a avaliação do fornecimento de energia são:

- FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): O FEC mede a frequência média de interrupções no fornecimento de energia elétrica por unidade consumidora ao longo de um período de 12 meses. O FEC é calculado pela Equação 3.1:

$$FEC = \sum_{t=1}^N \frac{Ca(i)}{Ct} [\text{interrupções/período}] \quad (3.1)$$

Em que:

- Ca: número total de unidades consumidoras afetadas pela interrupção;
- Ct: número total de unidades consumidoras atendidas;
- i: índice de interrupções, no período de apuração, variando de 1 a n;
- N: número de interrupções da unidade consumidora no período de apuração;

O FEC é expresso em unidades de interrupção por unidade consumidora ao ano. Quanto menor o valor do FEC, melhor é a qualidade do serviço prestado pela distribuidora de energia elétrica.

- DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): O DEC é um indicador de qualidade coletivo, onde mede o tempo médio em que cada unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um determinado período. O valor do DEC é obtido pela divisão da soma das durações das interrupções do fornecimento de energia elétrica em cada unidade consumidora, durante o período de análise, pelo número total de unidades consumidoras atendidas pela concessionária.

O DEC é calculado pela Equação 3.2:

$$DEC = \sum_{t=1}^N \frac{Ca(i) * t(i)}{Ct} [\text{Horas/período}] \quad (3.2)$$

Em que:

- t(i): período da interrupção em horas, no período de apuração.

O DEC é um dos indicadores mais importantes para avaliar a qualidade do fornecimento de energia elétrica, uma vez que reflete diretamente a frequência e duração das interrupções no fornecimento de energia elétrica às unidades consumidoras.

- DIC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): O DIC é um indicador de qualidade individual que mede a duração média das interrupções no fornecimento de energia elétrica por unidade consumidora ao longo de um período de 12 meses. O DIC é calculado pela Equação 3.3:

$$DIC = \sum_{t=1}^N t(i) [\text{Horas/período}] \quad (3.3)$$

O DIC é expresso em unidades de tempo (minutos) por unidade consumidora ao ano. Quanto menor o valor do DIC, melhor é a qualidade do serviço prestado pela distribuidora de energia elétrica.

- FIC (Frequência de Interrupção por Consumidor): O FIC mede a frequência média de interrupções no fornecimento de energia elétrica por consumidor ao longo de um período de 12 meses. O FIC é calculado pela Equação 3.4:

$$FIC = N[\text{Interrupções}/\text{período}] \quad (3.4)$$

O FIC é expresso em unidades de interrupção por consumidor ao ano. Quanto menor o valor do FIC, melhor é a qualidade do serviço prestado pela distribuidora de energia elétrica.

- DMIC (Duração Média de Interrupção por Consumidor): O DMIC mede a duração média das interrupções no fornecimento de energia elétrica por consumidor ao longo de um período de 12 meses. O DMIC é calculado pela equação 3.5:

Em que:

- $t(i)_{\text{máx}}$ = Tempo da máxima interrupção contínua em horas, no período de apuração;

$$DMIC = t(i)_{\text{máx}}(\text{Horas}) \quad (3.5)$$

O DMIC é expresso em unidades de tempo (horas) por consumidor ao ano. Quanto menor o valor do DMIC, melhor é a qualidade do serviço prestado pela distribuidora de energia elétrica.

- DICRI (Duração da Interrupção por Unidade Consumidora Religada): O DICRI mede a duração média das interrupções no fornecimento de energia elétrica por unidade consumidora religada ao longo de um período de 12 meses. O DICRI é calculado pela fórmula 3.6:

$$DICRI = t(i)(\text{Horas}) \quad (3.6)$$

Em que:

- $t(i)$ = Período da interrupção em horas, no período de apuração;

O DICRI é expresso em unidades de tempo (Horas) por unidade consumidora religada ao ano. Ele considera apenas as unidades consumidoras que tiveram o fornecimento de energia religado após uma interrupção.

Dessa forma, os indicadores de continuidade DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC são importantes não apenas para garantir a segurança e confiabilidade do sistema elétrico, mas também para atender às normas e regulamentos estabelecidos pela ANEEL e assegurar a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

3.5 Custo

No ambiente industrial, há uma alta variação no custo para a construção de uma rede de distribuição aérea, pois depende de diversos fatores, como a extensão da rede, capacidade de carga necessária, topografia do terreno, distância em relação às subestações, disponibilidade de mão de obra, entre outros. Algumas das principais despesas que devem ser consideradas na construção de uma rede aérea nesse tipo de ambiente incluem:

- Material elétrico: condutores, isoladores, postes, transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, medidores, entre outros;
- Terraplenagem: se o terreno não estiver nivelado, será necessário realizar trabalhos de terraplenagem para nivelar o solo e criar um caminho adequado para a rede de distribuição;
- Mão de obra: é necessário contratar profissionais capacitados para realizar a instalação da rede elétrica, o que pode incluir engenheiros eletricitistas, eletricitistas, técnicos em eletricidade, ajudantes de obra, técnicos de planejamento, entre outros;
- Licenças e autorizações: antes de iniciar a construção da rede de distribuição, é necessário obter as autorizações e licenças necessárias junto aos órgãos reguladores, como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica);
- Equipamentos de segurança: é necessário equipar a rede de distribuição com itens de segurança, como sistemas de aterramento, proteção contra surtos e sistemas de proteção contra incêndios;
- Testes e comissionamento: após a instalação da rede de distribuição, é necessário realizar testes e comissionamento para verificar se tudo está funcionando adequadamente e se está dentro das especificações técnicas.

Segundo Velasco et al. (VELASCO; LIMA; COUTO, 2006), o custo para a construção de uma rede de distribuição de energia elétrica subterrânea, em uma área urbana, era aproximadamente 10 vezes maior comparado a rede elétrica convencional. Recentemente, ainda existe uma discrepância nos custos para a implementação das redes subterrâneas comparado com as redes aéreas (PRESCOTT, 2018). Contudo, o custo total para a construção da rede aérea nesse contexto pode variar muito, sendo assim, é importante realizar um estudo detalhado das necessidades do projeto.

3.6 Estudo de caso: rede de distribuição aérea redundante

Uma rede de distribuição redundante possui a função de ser a rede reserva, ou seja, uma segunda rede de distribuição de energia elétrica que atua como *backup* caso a rede principal apresente algum problema. Para atender a portaria legislativa AMN95, que diz respeito à segurança e monitoramento de barragens de mineração, surgiu a necessidade de criação de uma rede redundante, com o intuito de assegurar o fornecimento de energia para monitoramento contínuo da barragem. O sistema de monitoramento da barragem inclui, sensores, câmeras e outros dispositivos, que devem funcionar por um período integral. Portanto, a construção de uma rede de distribuição redundante para esse sistema se torna fundamental, garantindo a confiabilidade dos dados monitorados e a disponibilidade do sistema quando for solicitado.

Considerando que a interrupção de energia elétrica pode levar a paralisações na produção ou danos aos equipamentos, a rede redundante possibilita a continuidade das operações. Além disso, ela pode melhorar a qualidade da energia elétrica, reduzindo as flutuações de tensão e minimiza os riscos de quedas de energia. O estudo de caso, destinado ao fornecimento de energia elétrica da barragem de rejeitos de Germano pertencente a mineradora Samarco, visa a implementar esse tipo de rede de distribuição, onde são discutidos os principais requisitos para a construção da rede e qual a melhor topologia para este cenário. Ainda sobre o estudo de caso, a área para a construção da rede possui plantações sobre o trecho, no entanto, não há necessidade de autorizações ambientais extras para a construção da rede, além das vigentes por contratos internos, tendo em vista que o projeto é de responsabilidade da própria empresa.



Figura 14 – Mapa comparativo entre os caminhos possíveis para a construção da rede aérea e subterrânea, Adaptado (MAPS, 2023).

A Figura 14 ilustra o mapa com o traçado das duas possíveis redes de distribuição a ser construídas. Em azul temos a representação da rede aérea e em vermelho a rede subterrânea. A linha da cor amarela representa uma rede subterrânea já existente, de aproximadamente 10 metros. A rede redundante se conectará neste ponto onde há uma subestação de 13,8kV de tensão.

Com base na figura, é possível observar que a distância para a construção da rede subterrânea é maior em relação a rede aérea. A extensão das redes são de aproximadamente de 2 km e 3,5 km para a rede aérea e subterrânea respectivamente. Na Figura 14, nota-se que o traçado da rede subterrânea segue o mesmo trajeto de uma estrada existente, sendo esse, um caminho de fácil acesso para a construção da rede, com segurança e acessibilidade. Contudo, a escolha do tipo rede a ser construído, é considerado os aspectos citados, como a extensão total, além disso, a facilidade na mobilização de mão de obra, o custo para a implementação e dos materiais a serem utilizados.

3.6.1 Levantamento estrutural

Há uma complexidade na implementação de uma rede aérea, somente o serviço de instalação dos postes, com todos os seus componentes, pode levar grande parte do tempo de execução do projeto. Nesse serviço tem a logística do transporte de materiais e mão de obra, que inclui a mobilização de diversos setores. O fincamento do poste pode demandar a instalação de escora e concretagem da base. Além disso, a instalação dos equipamentos, como os transformadores, dispositivos de proteção, podem exigir a poda de árvores. Por fim, se a topologia do terreno for irregular será feito um esforço maior de mão de obra que o esperado para locais planos.

Existem diferentes tipos de estruturas para a utilização em um projeto de rede de distribuição aérea. Na rede aérea redundante do estudo de caso foi utilizado quatro tipos de estruturas, como ilustrado pela Figura 15. Cada estrutura possui a seguinte características de instalações:

- N2 - É uma estrutura de passagem, porém aceita ângulos de 6° a 60° ;
- N3 - É uma estrutura de ancoragem/fim de rede;
- N4 - Estruturas para vão com deflexões de 60° a 90° ou ancorado;
- HTE - Estrutura de passagem e sustentação em vãos longos.

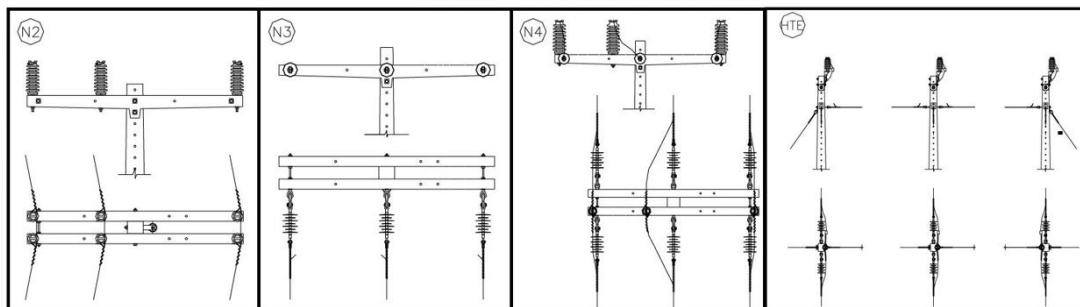


Figura 15 – Estruturas utilizadas na construção da rede redundante (ENERGIA, 2023).

3.6.2 Componentes utilizados na construção da rede redundante

A rede redundante aérea construída abrange uma distância total de 2 km, sendo que 1,90 km são de rede aérea e os demais 10 metros são de rede subterrânea já existente. A rede escolhida caracteriza-se por uma linha de distribuição mista, aérea e subterrânea, conforme ilustrado pela Figura 14. A tensão de operação da rede é de 13,8 kV. A rede de distribuição aérea escolhida tem como característica cabos condutores isolados.

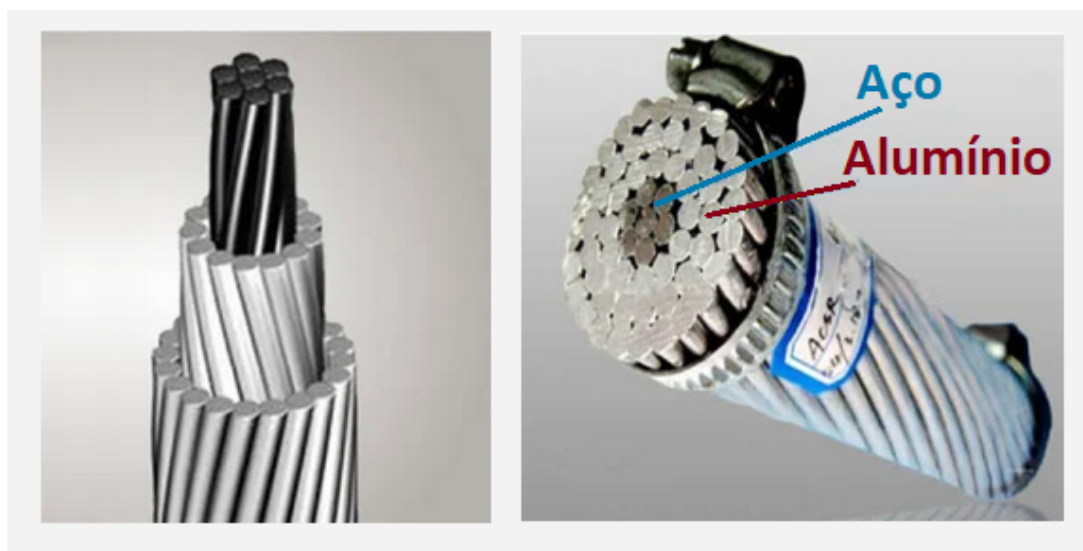


Figura 16 – Estrutura de formação do condutor elétrico Nu encalhado de 336,4 mcm para instalações aéreas, Adaptado (CO, 2023).

Seguindo a norma NBR5471 referente a condutores elétricos, foi utilizado para a construção desta rede o cabo de alumínio nu com alma, com 336,4 mcm (número de condutores x bitola nominal), de aproximadamente 18,83 mm, composto por alumínio e aço, conforme Figura 16. Esse cabo é formado por condutores encordoados helicoidalmente em torno de um cabo mensageiro, proporcionando elevada resistência mecânica. Possui uma resistência elétrica máxima no condutor C.C. a 20°C de 0,699 Ω /km e capacidade de condução de corrente de 510A (CO, 2023).

A Figura 17 ilustra a instalação dos postes da rede de distribuição aérea redundante. A escolha do poste usado envolve várias condições, pois ele precisa ser resistente e deve suportar variações temporais para garantir a segurança do sistema. A altura da rede é um fator que influencia o comprimento do poste, como também, a profundidade a ser fixado no solo, topografia do terreno a ser implantado, limite elástico e carga de ruptura do poste, por fim, a capacidade de suportar a tração dos cabos, a resistência (daN). A Tabela 1 apresenta a resistência de postes de concreto e madeira com base na altura aplicada. Na empresa a qual o projeto será integrado, são comumente usados postes de 11, 13, 15 e 18 metros para a construção das redes de distribuição de energia aéreas.

No processo de fixação do poste ao solo, é necessário calcular a profundidade de engas-



Figura 17 – Instalação dos postes da rede redundante (Autoria própria).

Tabela 1 – Resistência daN para postes de concreto e madeira (CEMIG, 2020b).

Altura (m)	Resistência (daN) pelo tipo de material	
	Concreto circular	Madeira
11	300/600/1000	300/600
12	300/600/1000	300/600
13	600/1000	300/600
15	-	600
18	-	600

tamento. O engastamento é o nome que se dá a profundidade necessária que o poste deve ser fixado ao solo. A Tabela 2 mostra a profundidade de engastamento usado nos projetos urbanos. A profundidade ideal depende do tamanho do poste e da resistência daN. De acordo com a NBR 15688 - Redes de distribuição aérea de energia elétrica, com condutores nus, para calcular o engastamento do poste é utilizado a seguinte definição:

$$e = (0,10xL) + 0,60 \tag{3.7}$$

Onde:

- e: profundidade do engastamento;
- L: comprimento do poste;
- 0,60 cm: margem de segurança.

Tabela 2 – Profundidade de engastamento postes com base na resistência daN (CEMIG, 2020b).

Engastamento com Profundida Aumentada		
Poste Comprimento (m)	Prof. do Engastamento (m) Resistência 300 daN	Prof. do Engastamento (m) Resistência 600 daN
11	1,80	2,20
12	1,80	2,20
13	1,90	2,30
15	-	2,30

3.6.3 Monitoramento da rede

O monitoramento da rede é imprescindível para mantê-la em funcionamento sem que haja problemas de falta de fornecimento para a área destinada. Para isso, foi criado um centro de monitoramento de energia que opera via supervisório SCADA onde é possível acompanhar o sistema elétrico, armazenar dados e disponibilizar recursos para intervir manualmente ou automaticamente no processo, quando necessário. Este sistema é operado remotamente por técnicos, no intuito de mitigar falhas na distribuição de energia elétrica.



Figura 18 – Centro de Monitoramento de Energia (Autoria própria).

A Figura 18 ilustra o centro de monitoramento de energia construído na mineradora Samarco. A instalação dos dispositivos de medição trouxe a possibilidade de acompanhamento em tempo integral do sistema de distribuição de energia em toda empresa. Através do supervisório, é possível monitorar parâmetros significativos para análise de gráficos e geração de um banco de dados, como a qualidade de energia, potência ativa/indutivo/capacitivo, corrente entre fases, corrente do neutro, tensão da linha, falta sensível à terra, perda de fornecimento, variação de frequência de rede, afundamento e elevação de tensão, entre outros.

Contudo, este capítulo apresentou os requisitos necessários para a construção das redes aéreas e subterrâneas no contexto industrial, além disso os componentes que integram desses dois tipos de redes. Por fim, no próximo capítulo é apresentado os resultados do estudo de caso citado nesse capítulo, aplicado em uma indústria de mineração de uma rede aérea redundante.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das análises coletadas na literatura e referente ao estudo de caso aplicado na construção de uma rede de distribuição de energia elétrica redundante em uma empresa de mineração. São discutidos também as análises dos requisitos para a construção de uma rede aérea e subterrânea, Além disso, os custos para as atividades necessárias nas construções dos dois tipos de redes. Por fim, são discutidos os aspectos do trabalho para as redes aérea e subterrânea no cenário industrial.

4.1 Análise dos requisitos necessários para a execução do projeto

Como já mencionado anteriormente, a decisão de escolha sobre qual rede de distribuição de energia melhor se encaixa no ambiente de mineração envolve diversos fatores. Esta decisão é tomada a partir de uma análise no levantamento detalhado das etapas da obra. Logo em seguida, é feito o levantamento do traçado da rede, onde é avaliado qual o melhor trajeto para a implantação, levando em conta as adversidades do local como a passagem de máquinas pesadas, vegetação, estradas, entre outros. Logo em seguida, é definido o prazo de conclusão da obra, onde a partir dessa decisão é possível dimensionar a mão de obra que será necessária, todo o material que será utilizado na construção da rede de distribuição, ferramentas, recursos de veículos, equipamentos de proteção individual e equipamentos de proteção coletiva.

Tabela 3 – Dispositivos usados para a construção da rede aérea e possíveis usados para a rede subterrânea.

Tipo de rede	Principais componentes	Dispositivos de proteção
Aérea	Cabos condutores de energia; Postes; Cruzetas; Acessórios de fixação; Transformadores; Chave seccionadoras Medidores de energia.	Para-raios; Aterramento; Chave fusível; Chave faca; Isoladores; Religadores.
Subterrânea	Cabos subterrâneos; Caixas de distribuição; Caixas de inspeção; Eletrodutos; Medidores de energia.	Para-raios; Aterramentos; DPSs.

A Tabela 3 mostra os componentes usados na construção da rede aérea e possíveis componentes para a construção de uma rede subterrânea, no cenário industrial. A rede redundante aérea construída no estudo de caso é uma rede convencional, com 2 km de extensão e nível de tensão de 13,8kV. Neste projeto, 19 estruturas foram utilizadas, dentre elas: N2, N3, N3-N3, N4 e HTE. Além disso, construção da rede contou com 21 funcionários da empresa. Se a rede subterrânea fosse construída para esta mesma aplicação, sua extensão seria em torno e 3,5km

e necessitaria de cabos isolados de 240 mm de cobre. Além disso, houve a necessidade de equipamentos robustos para escavação das valas para a passagem dos cabos e equipamentos.

Tabela 4 – Indicadores de continuidade coletivo das redes de distribuição da CEMIG próximo a indústria (ANEEL, 2023a).

Conjunto	Indicadores coletivos	
	DEC	FEC
Ouro Preto 1	8	5
Mariana 2	10	6
Presidente Bernardes	13	7
Lafaiete 1	10	6

A Tabela 4 mostra os indicadores de continuidade coletivos da concessionária e o responsável pela distribuição de energia elétrica na região externa à indústria onde o estudo de caso é aplicado. Em 2023, para quatro conjunto de distribuição de energia temos a seguinte média dos indicadores coletivos:

- DEC: 10,25. Indica que, em média, cada cliente teve uma interrupção de aproximadamente 10,25 horas;
- FEC: 6. Significa que cada cliente teve, em média, cerca de 6 interrupções durante o período avaliado.

A fim de comparar os indicadores coletivos de confiabilidade do sistema, foram usados o FEC e DEC. Quando mais baixo os valores desses indicadores maiores é a confiabilidade o fornecimento de energia. A média do DEC e o FEC dos conjuntos de distribuição da região é menor que a média apresentada para uma rede aérea e subterrânea apresentado na Tabela 5. Os valores dessa tabela são maiores que os valores médios da concessionária devido ao período crítico que foi realizado a análise, um período chuvoso.

Tabela 5 – Indicadores de continuidade coletivos.

Indicadores	Rede aérea	Rede subterrânea
DEC (h)	11,2	5,32
FEC	12,4	9,8

A Tabela 5 mostra os valores dos indicadores coletivos (coletados na empresa de mineração) de uma rede aérea e uma subterrânea em um período chuvoso na indústria apresentada anteriormente. Observa-se que os indicadores de continuidade da rede subterrânea são menores que da rede aérea. Os valores de DEC correspondem ao tempo em que os equipamentos ficam sem energia e a média de interrupções respectivamente, sendo de 11,2 horas na rede aérea e 5,32 na rede subterrânea. Os valores altos para os indicadores de continuidade da rede aérea nos períodos chuvosos devem-se a vulnerabilidade da rede ser atingida por descargas atmosféricas

ou árvores. Nesse período as redes subterrâneas também são afetadas devido ao aumento da umidade do solo, fazendo com que seus indicadores tenham valores altos para esse tipo de rede.

Tabela 6 – Indicadores de continuidade individuais das redes de distribuição da CEMIG próximo a indústria (ANEEL, 2023a).

Conjunto	Indicadores individuais			
	DIC (em horas)	FIC (número de interrupções)	DMIC (em horas)	DICRI (em horas)
	Mensal	Mensal	Mensal	Interrupção
Ouro Preto 1	16	4	12	26
Mariana 2	16	6	12	26
Presidente Bernardes	20	6	15	26
Lafaiete 1	16	6	12	26

A Tabela 6 mostra os valores dos indicadores individuais para as redes de distribuição de energia elétrica próximo a região na qual é aplicado o estudo de caso. Os quatro indicadores individuais das redes de distribuição da concessionária CEMIG possuem as seguintes médias:

- DIC: 17. Indica que, em média, cada cliente teve uma interrupção de aproximadamente 17 horas;
- FIC: 5,5. Significa que cada cliente teve, em média, cerca de 5,5 interrupções durante o período avaliado;
- DMIC: 12,75. Sugere que, em média, cada interrupção durou cerca de 12,75 horas;
- DICRI: 26. Implica que, em média, cada interrupção corrigida durou cerca de 26 horas.

Com base nos indicadores individuais, para que a rede opere com a devida qualidade, espera-se que os valores desses indicadores sejam inferiores ou mais próximos possíveis dos valores monitorados pela concessionária fornecedora de energia elétrica, tanto para as redes aéreas como para as redes subterrâneas.

Um memorial descritivo foi montado junto a empresa prestadora do serviço. Esse memorial apresenta uma análise detalhada dos fatores que contabilizam o custo do projeto. A Figura 19 apresenta a quantidade total da construção da rede aérea redundante. O prazo para a execução do projeto é de 105 dias úteis, contabilizando um tempo maior de duração nas etapas de lançamento de cabos e escavação das estruturas. Além disso, em períodos chuvosos, o prazo pode se estender, devido a riscos de descargas atmosféricas para trabalhadores em campo aberto na instalação das estruturas.

O gráfico da Figura 20 ilustra a quantidade de dias úteis da rede subterrânea, de 3,5km, se fosse construída. Nota-se que há uma quantidade menor de atividades comparado à instalação da

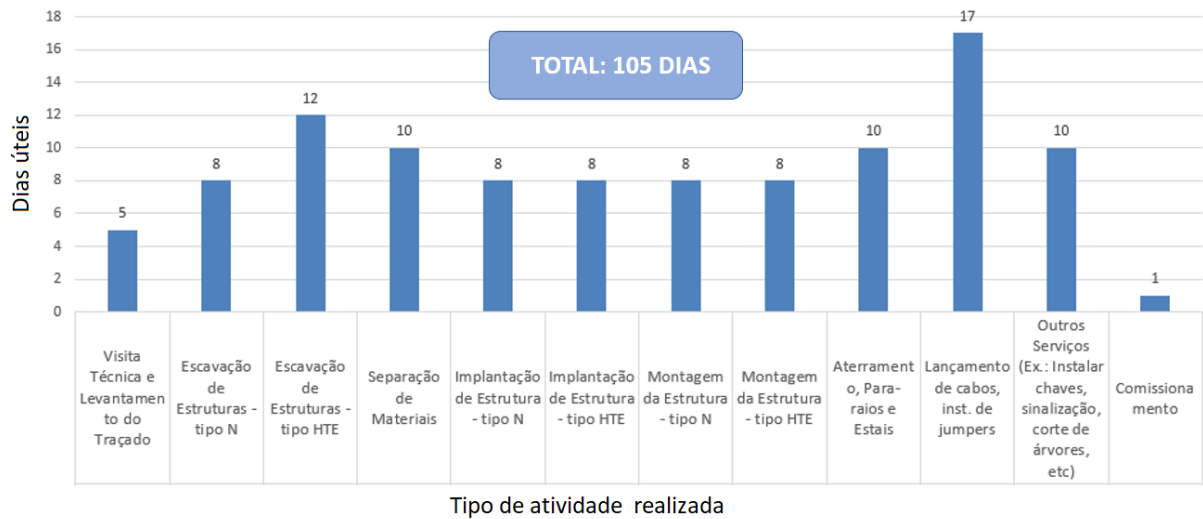


Figura 19 – Quantitativo da duração da obra da rede aérea em dias úteis por tipo de atividade realizada (Autoria própria).

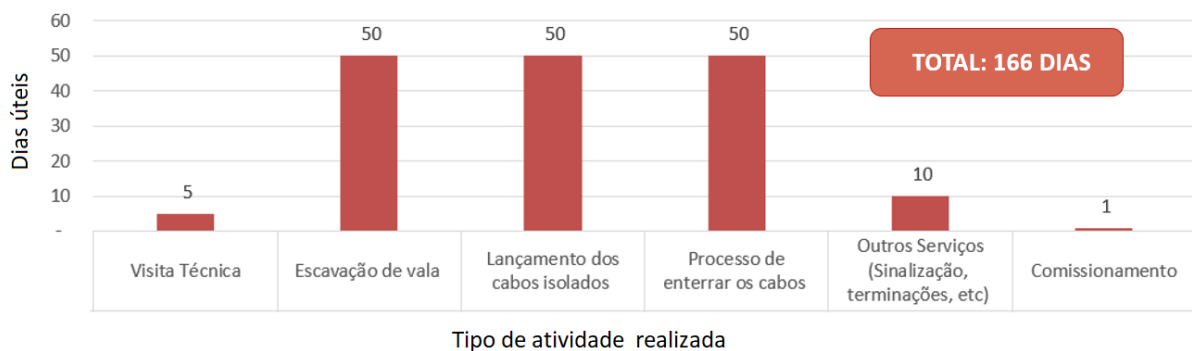


Figura 20 – Quantitativo da duração da obra da rede subterrânea em dias úteis por tipo de atividade realizada (Autoria própria).

rede aérea, entretanto, as obras de infraestruturas, necessárias para este tipo de projeto, demandam um total de 166 dias úteis para sua implementação. As atividades de escavação, lançamento e enterramento dos cabos, corresponde a 90% de todo o tempo do projeto. Isso mostra a dificuldade da construção da rede subterrânea. Em contraste, para as redes aéreas as etapas de escavação das estruturas tipo N e tipo HTE é cerca de 5 vezes mais rápida que o processo de escavação da rede subterrânea.

4.2 Custos

O referencial teórico mostrou que o custo para a implementação da rede de distribuição subterrânea pode ser maior comparado a rede aérea. Para reforçar essa análise, foi comparado o custo de dois projetos de uma mesma linha de distribuição. O primeiro projeto é relacionado ao estudo de caso: a rede aérea redundante de distribuição de energia. Já o segundo projeto é uma proposta da rede de distribuição de energia subterrânea que foi levantada como a segunda opção

para a mesma localidade.

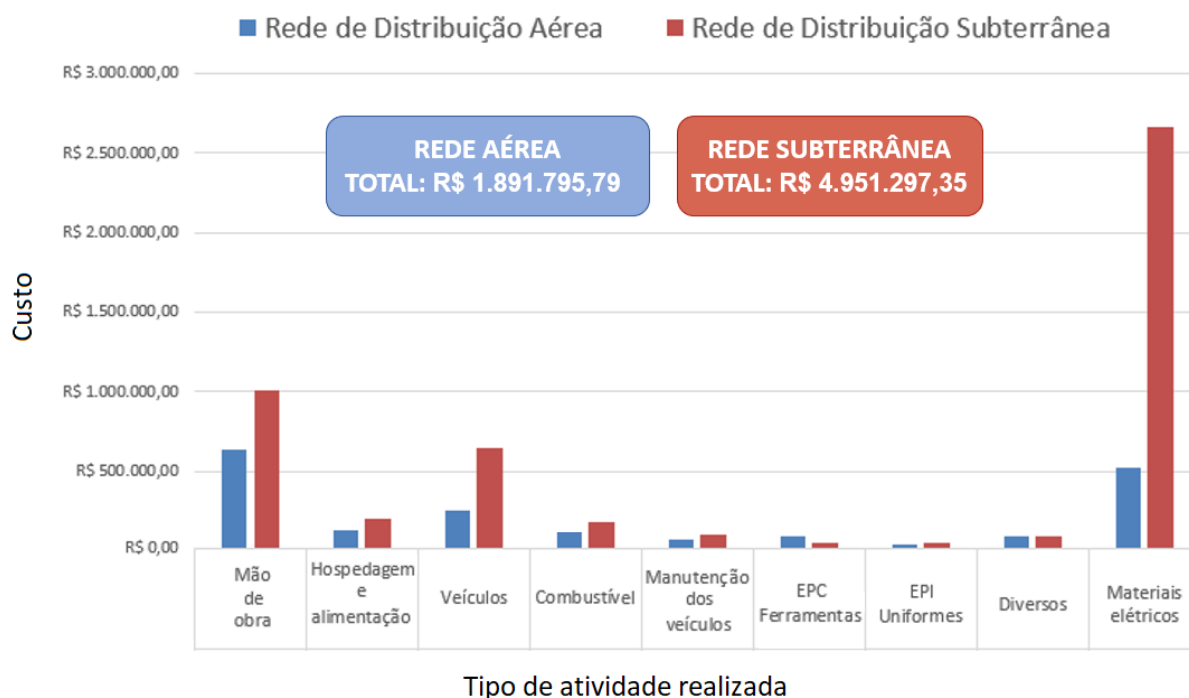


Figura 21 – Levantamento dos custos da construção da Rede de Distribuição Aérea x Subterrânea (Autoria própria).

Para o levantamento dos custos do estudo de caso, foram pontuados os itens apresentados da Figura 21, onde são apresentados os valores para as duas topologias das redes em análise. Nota-se que o custo total de todas as atividades realizadas para a implementação da rede subterrânea é 2,6 maior comparado a rede aérea. A rede subterrânea possui um custo de equipamentos mais elevado, como transformadores, quadros de distribuição pedestal e chaves seccionadoras. Outro fator para os custos elevados é a instalação da rede, onde a mão de obra civil é o dobro comparado a rede aérea. Dessa forma, considerando os custos iniciais de implementação da rede, é mais vantajoso a implementação da rede aérea nesse cenário.

A Tabela 7 mostra, de forma mais detalhada os valores dos gastos nas atividades para cada tipo de rede. Para a rede aérea, o maior valor percentual em relação ao custo total das atividades está ligado à mão de obra. Como apresentado no Capítulo 3, a montagem da infraestrutura da rede aérea demanda diversas etapas. A maioria do serviço é feito de forma manual, isso implica na necessidade de uma grande equipe na execução do projeto. Também há um alto valor percentual para o uso de veículos, onde são usados para a mobilidade da equipe, transporte de materiais e içamentos de postes da rede. Em contraste, o custo da mão de obra da rede subterrânea é aproximadamente 1,6 maior comparado ao da rede aérea. Além disso, o valor percentual gasto com materiais elétricos é mais que a metade para todo o projeto, chegando a 53,86 %. Isso em virtude das características físicas dos materiais usados, que diferente das redes aéreas, devem ser mais resistentes pois estão mais susceptíveis as ações do tempo, como sujeira, umidade e

corrosão por produtos químicos no solo.

Tabela 7 – Custos referentes à construção das redes com os dados coletados para o estudo de caso

Tipo de gasto	Tipo de rede			
	Aérea		Subterrânea	
	Valor (R\$)	(%)	Valor (R\$)	(%)
Mão de obra	639.049,90	33,78	1.010.307,35	20,40
Hospedagem e alimentação	128.310,00	6,78	205.296,00	4,15
Veículos	256.500,00	13,56	650.400,00	13,14
Combustível	110.475,00	5,84	176.760,00	3,57
Manutenção dos veículos	52.200,00	2,76	83.520,00	1,69
EPC Ferramentas	75.000,00	3,96	40.000,00	0,81
EPI Uniformes	25.000,00	1,32	40.000,00	0,81
Diversos	78.300,00	4,14	78.300,00	1,58
Materiais Elétricos	526.960,8	27,86	2.666.714,00	53,86

A Tabela 8 apresenta os valores do custo total por km das duas redes de distribuição de energia elétrica aplicado ao estudo de caso. Observa-se que a rede subterrânea ainda possui um alto custo comparado a rede aérea. Desse modo, fica evidente que nesse tipo de ambiente o valor investido para a construção de uma rede de distribuição subterrânea pode ser inviável se o projeto tiver um baixo orçamento. Além disso, a flexibilidade da rede pode ser outro fator para inviabilizar a construção do projeto pois, na maioria das vezes, a construção da rede deve ser feita de forma rápida para a continuidade do processo produtivo ou funcionamento de equipamentos importantes para a mineradora, como dispositivos de monitoramento de barragens.

Tabela 8 – Custos por km das redes.

Tipo de Rede	Custo / km(R\$)
Aérea	756.718,31
Subterrânea	1.414.656,31

Posteriormente a implantação da rede, há outros custos a serem considerados, como os custos operacionais, os quais englobam a manutenção corretiva e preventiva. A manutenção corretiva ocorre quando existe uma situação crítica, como a interrupção no fornecimento da energia elétrica. Já a manutenção preventiva ocorre em períodos programados a fim de minimizar falhas na rede por defeitos nos equipamentos do sistema. Para a rede aérea esses gastos podem ser elevados, principalmente em redes localizadas em locais de alta incidência de descargas atmosféricas, pois esse fenômeno é um grande causador de falha nos sistemas elétricos, bem como a queima de equipamentos e rompimento de cabos. Já na rede subterrânea, é feita, uma inspeção preventiva da rede e, como a rede é menos vulnerável a descargas atmosféricas, esse tipo de inspeção não é frequente como as redes aéreas. Portanto, neste quesito, a rede subterrânea tem um custo mais baixo comparado a rede aérea.

Tabela 9 – Custos por manutenção corretiva nas redes aérea e subterrânea.

Tipo de rede	Custo por manutenção (R\$)
Aérea	7.500,00
Subterrânea	37.500,00

O custo das manutenções corretivas é calculado por dia de serviço. A manutenção corretiva na rede de distribuição de energia aérea tem um custo médio de R\$ 150.000,00 reais mensais. Elas geralmente são iniciadas e concluídas com 1 dia de serviço, sendo assim, o custo de uma manutenção na rede é de aproximadamente R\$ 7.500,00 reais, conforme a Tabela 9, onde o custo mensal é dividido pelos dias úteis (20 dias).

Já uma rede subterrânea demanda uma equipe menor para manutenção, entretanto, as máquinas para escavação elevam o valor desta manutenção, chegando a custar em média R\$ 150.000,00 reais mensais, equivalente ao custo de manutenção da rede aérea. Essa manutenção na rede subterrânea demanda maior tempo e envolve vários fatores, como o método de detecção de falha, diária de maquinário para a escavação, emendas ou terminações desconectadas e ensaios elétricos antes e após a confecção da emenda. Assim, o tempo gasto por manutenção é de aproximadamente 5 dias, o que equivale a um total de 37.500,00 reais por manutenção, conforme apresentado na Tabela 9.

O grau de exposição da rede de distribuição aérea é superior comparando com rede subterrânea, sendo mais vulneráveis aos fenômenos climáticos (chuvas e descargas atmosféricas), toques acidentais de árvores, animais entre outros objetos. Já na rede subterrânea, o maior problema enfrentado é a etapa montagem da rede, especificamente nas emendas dos cabos, onde precisam ser executadas com bastante atenção e cautela para que não sofram infiltração de umidade. Uma instalação inadequada pode causar desgaste nas emendas, o que implica no comprometimento da isolação do cabo e, conseqüentemente, a necessidade de uma manutenção corretiva por rompimento da emenda.

A frequência de manutenções anuais no cenário industrial citado anteriormente está diretamente ligada as condições climáticas. Geralmente nas redes aéreas, são realizadas manutenções preventivas nos períodos de seca, correspondentes ao meses de março à outubro, pois são períodos em que é possível realizar com maior facilidade e segurança a troca de isoladores, cruzetas, para raios e afins. Já nos meses chuvosos, correspondentes aos meses de novembro à fevereiro, é o período em que as ocorrências de corretivas surgem devido a todos os intempéries apresentados neste período. Também os períodos chuvosos são de maior registro de manutenções corretivas para as redes subterrâneas, pois nesta época em que a umidade do solo fica elevada, há uma alta probabilidade de infiltrações nos dutos.

Contudo, o custo relacionado a quantidade de manutenção corretiva e preventiva anual em um ambiente industrial, para os dois tipos de redes abordados, dependem de vários fatores, como o tipo de equipamento utilizado, a idade do equipamento e a disponibilidade de recursos para

manutenção. Por exemplo, a troca de um transformador em ambas as redes têm um custo maior que a troca de cruzetas na rede aérea. Portanto, não há um custo fixo ou proporção estabelecida das manutenções realizadas neste contexto, pois dependem das circunstâncias de todo o sistema.

4.3 Considerações Finais

O trabalho mostrou duas possibilidades de implantação de uma rede de distribuição de energia elétrica redundante, aérea e subterrânea. Esse tipo de rede traz ao sistema algumas vantagens, por exemplo, maior segurança operacional, pois uma segunda fonte de alimentação elétrica pode evitar interrupções não programadas na operação do processo produtivo. Além disso, maior disponibilidade, uma vez que a disponibilidade do sistema como um todo aumenta, reduzindo o tempo de parada em caso de falha na primeira fonte. Em contrapartida, a implementação da rede redundante pode apresentar algumas desvantagens, como custos adicionais e requerer espaço físico adicional, o que pode ser um desafio em ambientes industriais com limitações de espaço. Contudo, sua implementação vai depender da necessidade de todo o sistema.

Houve a possibilidade de construir uma rede redundante de distribuição de energia elétrica subterrânea, porém vimos anteriormente alguns dos motivos os quais esse tipo de rede tornou-se uma opção inviável nesse contexto. Assim, a rede construída foi uma rede aérea destinada ao fornecimento de energia elétrica o monitoramento de uma barragem de rejeitos da Samarco. A energia nesse local é de suma importância para que sensores e bombas de drenagem funcionem integralmente. Dessa forma, esse projeto traz benefícios significativos em termos de segurança e continuidade do processo produtivo.

A confiabilidade da rede de distribuição de energia elétrica no ambiente industrial é extremamente importante, pois a interrupção do fornecimento de energia elétrica pode comprometer as operações da mina, incluindo a paralisação da produção e a perda de receita. Visto isso, houve ações destinadas a melhorias nos sistemas de distribuição de energia elétrica. A instalação de religadores ao longo da rede, como o objetivo de minimizar as interrupções do fornecimento de energia. Além disso houve a implantação de um centro de monitoramento remoto, o qual permite a rápida identificação de falhas na rede e a adoção de medidas corretivas imediatas.

Dessa forma, em processos industriais as redes aéreas podem ser usadas com maior frequência, tendo um custo inicial menor para implementação e flexibilidade de instalação. Por fim, a integração equipamentos de segurança e dispositivos que automatiza o sistema podem minimizar as falhas no fornecimento, aumentando sua confiabilidade para todo o processo produtivo, com a minimização dos riscos de prejuízos financeiros causados pela interrupção da produção.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado uma análise comparativa das redes de distribuição de energia elétrica em um ambiente industrial. Foram identificados os conceitos fundamentais e os parâmetros de construção de cada topologia, com o propósito de avaliar a melhor opção de implantação nesse contexto. Os conceitos abordados ressaltam a crescente importância de investir em tecnologias que visem reduzir os custos associados à implantação e operação das redes de distribuição de energia elétrica neste cenário.

Na revisão teórica, foi identificado que um dos principais causadores para a interrupção no fornecimento de energia elétrica em um ambiente industrial são as descargas atmosféricas. Além disso, o crescimento rápido da vegetação no entorno das instalações também é um fator crítico para a rede de distribuição. Nesse ponto, a rede de distribuição subterrânea possui uma vantagem sobre as redes aéreas, pois estão menos expostas a esses problemas. Sendo assim, entregando um fornecimento mais estável para todo o sistema.

Ao analisar os custos de implantação das redes de distribuição, observa-se que os custos relacionados à mão de obra variam significativamente entre as configurações aéreas e subterrâneas. No caso da rede aérea, sua implantação é mais fácil e oferece benefícios em termos de manutenção, uma vez que facilita o acesso e a identificação de problemas a serem tratados. Por outro lado, a rede subterrânea apresenta custos mais elevados, devido ao uso de equipamentos mais caros, bem como à necessidade de obras civis para a sua construção, o que não é requerido na construção das redes aéreas. No entanto, em termos de manutenção, a rede subterrânea possui uma vantagem significativa em relação às redes aéreas, pois tende a ter menos falhas ou complicações no fornecimento de energia, o que resulta em uma menor necessidade de manutenção frequente.

No que diz respeito aos custos de manutenção, na rede subterrânea, eles são restritos a inspeções preventivas. No geral, devido a possíveis interrupções no fornecimento de energia elétrica na rede aérea, como quedas de árvores ou descargas atmosféricas, os gastos com manutenção podem ser superiores, comparados a rede subterrânea. No entanto, se considerarmos uma única manutenção, a rede subterrânea apresenta um custo mais elevado, em contraste com a rede aérea, devido aos valores dos equipamentos, bem como a mão de obra para execução do serviço de reparação na rede.

Dessa forma, com a análise dos dados coletados para o estudo de caso, é possível concluir que o investimento inicial em uma rede subterrânea é cerca de quatro vezes maior em comparação com uma rede aérea convencional. Portanto, do ponto de vista financeiro, não é viável para as indústrias de mineração substituírem suas redes aéreas por redes subterrâneas. No entanto, quando se trata dos custos de manutenção, a opção de rede subterrânea deve ser considerada como uma possibilidade viável. Embora o custo de construção seja mais elevado, os gastos com manutenção são inferiores, o que resulta em um retorno do investimento inicial ao longo do tempo. Por fim, apesar as redes subterrâneas serem mais estáveis, neste ambiente a implementação das redes aéreas são mais viáveis, devido a flexibilidade da rede e também da disponibilidade de

locais para a instalação, além de uma manutenção rápida e eficaz.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE, A. B. de Distribuidores de E. E. Redes de energia elétrica. In: . [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 26.
- ANEEL, A. B. de Distribuidores de E. E. Distribuição. In: . [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/distribuicao/relatorios-distribuicao>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 47 e 48.
- ANEEL, A. B. de Distribuidores de E. E. Indicadores coletivos de continuidade (dec e fec). In: . [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/indicadores-coletivos-de-continuidade-dec-e-fec>>. Citado na página 37.
- ANGELIS, B. L. D. D. et al. Rede de distribuição de energia elétrica e arborização viária: o caso da cidade de maringá, estado do paraná. **Acta Scientiarum. Technology**, Universidade Estadual de Maringá, v. 33, n. 4, p. 365–370, 2011. Citado 3 vezes nas páginas vii, 22 e 23.
- ATSELETRICA. Rede compacta ou rede de distribuição. In: . [s.n.], 2023. Disponível em: <<http://www.atseletrica.com.br/rede-compacta-rede-distribuicao.php>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 22.
- BARROS RICARDO LUIS GEDRA, R. B. B. F. D. **Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2014. Citado na página 20.
- CAMPOS, L. C. R.; MACEDO, A. d. S. de; LOPES, D. M. Sistemas de redes subterrâneas de energia elétrica no brasil. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 2, p. 151–169, 2019. Citado na página 19.
- CELESC, C. E. D. S. C. Critérios para utilização de redes de distribuição: Manual de procedimentos. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/I3130021.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas vii, 21, 24, 25 e 30.
- CEMIG, C. E. de M. G. **Manual de Distribuição Projetos de Redes de Distribuição Subterrâneas**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/ND_3_3.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 32 e 33.
- CEMIG, C. E. de M. G. **Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. [S.l.], 2020. Citado 5 vezes nas páginas viii, 31, 32, 44 e 45.
- CO, L. S. C. Fios e cabos elétricos. In: . [s.n.], 2023. Disponível em: <https://pt.made-in-china.com/co_dycable/product_ASTM-B232-336-4-Mcm-ACSR-Linnet-Conductor_euyhsyney.html>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 43.
- CORSINI, J. Rede elétrica subterrânea ou enterrada. In: . [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://fastseg.blogspot.com/2017/07/sobre-rede-eletrica-subterranea-ou-enterrada.html?m=0>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 26.
- DATHEIN, R. Inovação e revoluções industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos xviii e xix. **Publicações DECON Textos Didáticos**, v. 2, p. 2003, 2003. Citado na página 18.
- DAVIS, L. J. **Fleet fire: Thomas Edison and the pioneers of the electric revolution**. [S.l.]: Simon and Schuster, 2012. Citado na página 18.

ELÉTRICA, A. B. de Distribuidores de E. Redes de energia elétrica. In: . [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Citado na página 19.

ENERGIA, E. **Padrão de Estruturas de Rede de Distribuição Aérea de Energia Elétrica para 13,8kV**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://pa.equatorialenergia.com.br/>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 21 e 42.

(EPE), E. de P. E. Balanço energético nacional. In: . [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Citado na página 14.

FERRÃO44, A. M. de A.; NOGUEIRA45, D. M. de A. A implantação da eletricidade no brasil, o patrimônio eo legado das primeiras centrais hidrelétricas. **MIRADAS**, p. 127, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

FIEP, S. Geração distribuída ultrapassa 5 mil conexões no brasil. In: . [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.fiepr.org.br/observatorios/energia/FreeComponent21893content327338.shtml>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 14.

FILHO, G. L. T. Brasil redescobre potencial das micro e pequenas centrais hidrelétricas (pchs). **O BRASIL QUER ENERGIAS RENOVÁVEIS**, p. 13, 2004. Citado na página 18.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos, Ed. 4**. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 35 e 36.

GOMES, H. J. et al. Estudos de viabilidade das redes de distribuição secundárias compactas no sistema elétrico da celg d. Universidade Federal de Goiás, 2010. Citado na página 22.

GOMES, J. P. P.; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no brasil de 1880 a 2002. **Revista de Administração Pública**, SciELO Brasil, v. 43, p. 295–321, 2009. Citado na página 18.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.

MAPS google. samarco mineradora. In: . [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/search/samarco+/@-19.7455988,-44.0836478,11z/data=!3m1!4b1>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 41.

MARTINS, J. Por baixo da terra. In: . [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://www.osetoeletrico.com.br/por-baixo-da-terra/>>. Citado na página 25.

MATTEDE, H. Redes de energia elétrica, tipos e características - em conceitos de eletricidade. In: . [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/redes-de-energia-eletrica-tipos-e-caracteristicas/>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 20.

NEOENERGIA, R. P. P. **Elaboração de Projeto de Rede de Distribuição Subterrânea até 34,5 kV**. [S.l.], 2021. Citado na página 32.

PRESCOTT, R. Custo até 20 vezes maior é o entrave para enterrar redes. In: . [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.abranet.org.br/Noticias/Custo-ate-20-vezes-maior-e-o-entrave-para-enterrar-redes-1984.html?UserActiveTemplate=site#.ZFOPvM7MKUm>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 40.

- QUEIROZ, L. G. d. et al. Análise regulatória de alternativas para distribuição de energia elétrica na rede primária em áreas urbanas. Universidade Salvador, 2003. Citado na página 23.
- S.A, C. D. **Crítérios de Projetos de Redes de Distribuição Subterrâneas**. [S.l.], 2016. Citado na página 37.
- SAES, A. M. Light versus cbee: Energia elétrica na formação da industria brasileira(1900–1920). **Capitalismo e história da eletriZicação**, v. 1930, 1890. Citado na página 19.
- SAES, A. M.; SASSE, C. M. A amforp e o setor elétrico brasileiro (1926-1964). **Anuario Centro de Estudios Económicos de la Empresa y el Desarrollo**, n. 4, 2012. Citado na página 19.
- SANTOS, M. F. dos. Análise de desempenho de uma rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão alternada e contínua. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Citado na página 18.
- VELASCO, G. D. N. Arborização viária x sistemas de distribuição de energia elétrica: avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos. 2003. Citado na página 24.
- VELASCO, G. D. N.; LIMA, A. M. L. P.; COUTO, H. T. Z. d. Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto da arborização urbana. **Revista Árvore**, SciELO Brasil, v. 30, p. 679–686, 2006. Citado na página 40.
- WINCHELL, M. **The Electric War: Edison, Tesla, Westinghouse, and the Race to Light the World**. [S.l.]: Henry Holt and Company (BYR), 2019. Citado na página 18.