

**JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA**

# **TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Tecnologia em evolução**



**Blucher**

José Maurício de Barros Bezerra

TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA  
Tecnologia em evolução

*Transmissão de energia elétrica: tecnologia em evolução.*

© 2025 José Maurício de Barros Bezerra

Editora Edgard Blücher Ltda.

*Publisher* Edgard Blücher

*Editor* Eduardo Blücher

*Pré-produção* Aline Flenic

*Coordenador editorial* Rafael Fulanetti

*Coordenadora de produção* Ana Cristina Garcia

*Produção editorial* Lidiane Pedroso Gonçalves e Andressa Lira

*Preparação de texto* Ana Lúcia dos Santos

*Diagramação* Alessandra de Proença

*Revisão de texto* Maurício Katayama

*Capa* Laércio Flenic

*Imagem da capa* Carlos Eduardo Lima Bezerra

# Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

[contato@blucher.com.br](mailto:contato@blucher.com.br)

[www.blucher.com.br](http://www.blucher.com.br)

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed.

do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,

Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Bezerra, José Maurício de Barros

Transmissão de energia elétrica: tecnologia em evolução / José Maurício de Barros Bezerra. – São Paulo: Blucher, 2025.

282 p.: il.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-2248-4

1. Energia elétrica – Transmissão I. Título

24-3782

CDD 621.3192

Índices para catálogo sistemático:

1. Energia elétrica – Transmissão

# Conteúdo

Agradecimentos. . . . .	.13
Prefácio. . . . .	.15
Apresentação . . . . .	.17
<b>1. Concepção e operação de linhas de transmissão . . . . .</b>	<b>19</b>
1.1 Pontos para reflexão . . . . .	23
Referências . . . . .	24
<b>2. Monitoração, manutenção e recapacitação de linhas de transmissão . . . . .</b>	<b>25</b>
2.1 Monitoração. . . . .	25
2.2 Manutenção . . . . .	27
2.3 Recapacitação. . . . .	32
2.4 Considerações finais sobre panorama geral de uma linha de transmissão . . . . .	33
2.5 Pontos para reflexão. . . . .	33
Referências . . . . .	33
<b>3. Cabos condutores para linhas de transmissão e distribuição. . . . .</b>	<b>35</b>
3.1 Aspectos normativos . . . . .	36

3.2	O surgimento de novos condutores . . . . .	38
3.3	Considerações finais sobre cabos condutores . . . . .	46
3.4	Pontos para reflexão. . . . .	46
	Referências . . . . .	47
<b>4.</b>	<b>Isoladores para linhas de transmissão . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1	Breve histórico sobre o desenvolvimento dos isoladores . . . . .	50
4.2	Características básicas dos isoladores. . . . .	55
4.3	Aspectos normativos para dimensionamento de cadeias de isoladores . . . . .	56
4.4	Considerações finais sobre isoladores. . . . .	57
4.5	Pontos para reflexão . . . . .	58
	Referências . . . . .	59
<b>5.</b>	<b>Ferragens e acessórios para linhas de transmissão. . . . .</b>	<b>61</b>
5.1	O grampo de suspensão . . . . .	61
5.2	Amortecedores de vibração . . . . .	63
5.3	Espaçador amortecedor. . . . .	65
5.4	Ferragens para as cadeias de isoladores. . . . .	67
5.5	Anéis equalizadores . . . . .	68
5.6	Esferas sinalizadoras . . . . .	69
5.7	Considerações finais sobre ferragens e acessórios para linhas de transmissão. . . . .	70
5.8	Pontos para reflexão . . . . .	71
	Referências . . . . .	71
<b>6.</b>	<b>Estruturas para linhas de transmissão e distribuição . . . . .</b>	<b>73</b>
6.1	Dimensionamento básico das estruturas . . . . .	73
6.2	Estruturas especiais. . . . .	78
6.3	Materiais para composição das estruturas. . . . .	80
6.4	Considerações sobre o balanço da cadeia de isoladores . . . . .	82
6.5	Projetos de estruturas . . . . .	83
6.6	Estruturas: conceito e temáticas. . . . .	83
6.7	Considerações finais sobre estruturas para linhas de transmissão . . . . .	84
6.8	Ponto para reflexão . . . . .	85
	Referências . . . . .	85
<b>7.</b>	<b>Impactos ambientais de linhas de transmissão . . . . .</b>	<b>87</b>
7.1	Impactos físico-bióticos . . . . .	89

7.2	Impactos socioeconômicos . . . . .	89
7.3	Custos ambientais de sistemas de transmissão de energia elétrica . . . . .	90
7.4	Estado da arte relacionado aos efeitos biológicos causados por instalações de alta-tensão . . . . .	91
7.5	Efeitos eletrostáticos de uma linha de transmissão – o efeito corona . . . . .	93
7.6	O campo elétrico em uma linha de transmissão . . . . .	96
7.7	Métodos para cálculo das interferências eletromagnéticas . . . . .	101
7.8	Formas de minimização dos impactos eletromagnéticos . . . . .	102
7.9	Aspectos econômicos do efeito corona . . . . .	105
7.10	Considerações finais sobre impactos ambientais em linhas de transmissão. . . . .	109
7.11	Pontos para reflexão . . . . .	110
	Referências . . . . .	110
<b>8.</b>	<b>Proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas . . . . .</b>	<b>113</b>
8.1	A formação das descargas atmosféricas . . . . .	113
8.2	Propriedades das descargas atmosféricas . . . . .	117
8.3	Efeitos das descargas no sistema de potência . . . . .	121
8.4	O uso de cabos para-raios . . . . .	123
8.5	Incidência de descargas nas subestações . . . . .	124
8.6	Incidência de descargas nas linhas de transmissão. . . . .	125
8.7	Queda de descargas atmosféricas na proximidade de linhas de transmissão . . . . .	142
8.8	Considerações finais sobre proteção de linhas contra descargas atmosféricas . . . . .	142
8.9	Pontos para reflexão . . . . .	143
	Referências . . . . .	145
<b>9.</b>	<b>O processo de energização de uma linha de transmissão . . . . .</b>	<b>147</b>
9.1	Análise simplificada . . . . .	147
9.2	O conceito de ondas viajantes. . . . .	155
9.3	Coeficientes de reflexão . . . . .	156
9.4	Diagramas de treliças . . . . .	157
9.5	Exemplo com o uso do aplicativo ATP . . . . .	159
9.6	Modelagem mais precisa e reflexos no processo de energização . . . . .	165
9.7	O conceito de comprimento de onda de uma linha . . . . .	172
9.8	Operação da linha na potência natural/característica . . . . .	173
9.9	Contextualização tecnológica . . . . .	177

9.10	Considerações finais sobre o processo de energização de uma linha de transmissão . . . . .	178
9.11	Pontos para reflexão . . . . .	178
	Referências . . . . .	180
<b>10.</b>	<b>Desenvolvimento e aplicação de modelos aproximados para linhas de transmissão . . . . .</b>	<b>181</b>
10.1	O conceito de linha curta . . . . .	183
10.2	O conceito de linha média . . . . .	184
10.3	O conceito de linha longa . . . . .	186
10.4	A linha como um quadripolo . . . . .	187
10.5	Relações de potência nos terminais da linha . . . . .	188
10.6	Compensação de linhas de transmissão . . . . .	191
10.7	Considerações finais sobre a aplicação de modelos aproximados para linhas de transmissão . . . . .	198
10.8	Pontos para reflexão . . . . .	198
	Referências . . . . .	199
<b>11.</b>	<b>Cálculo e medição de parâmetros elétricos de linhas de transmissão. . . . .</b>	<b>201</b>
11.1	Metodologia de cálculo dos parâmetros elétricos . . . . .	202
11.2	Rotinas computacionais para cálculo dos parâmetros elétricos. . . . .	239
11.3	Medição de parâmetros elétricos de linhas de transmissão – medição direta . . . . .	244
11.4	Medição de parâmetros elétricos de linhas de transmissão – sincrofasores . . . . .	245
11.5	Considerações finais sobre cálculo e medições de parâmetros elétricos . . . . .	247
11.6	Pontos para reflexão . . . . .	248
	Referências . . . . .	248
<b>12.</b>	<b>Confiabilidade da transmissão e distribuição. . . . .</b>	<b>249</b>
12.1	Estrutura de manutenção. . . . .	250
12.2	Foco especial nas inspeções . . . . .	250
12.3	Conceitos básicos de manutenção. . . . .	254
12.4	Indicadores técnicos gerenciais . . . . .	255
12.5	Considerações finais sobre confiabilidade da transmissão. . . . .	261
12.6	Pontos para reflexão . . . . .	261
	Referências . . . . .	262

<b>13. Modelagem eletromecânica de linhas de transmissão. . . . .</b>	<b>263</b>
13.1 A curva de carregamento de uma linha de transmissão. . . . .	264
13.2 Metodologia para aferição dos limites operacionais. . . . .	264
13.3 Aspectos mecânicos a serem considerados . . . . .	266
13.4 Considerações especiais em regime de curta duração . . . . .	268
13.5 O cálculo por meio de rotina computacional . . . . .	269
13.6 Considerações finais sobre o comportamento eletromecânico da linha de transmissão. . . . .	270
13.7 Ponto para reflexão. . . . .	270
Referências . . . . .	270
<b>14. Tecnologias para recapacitação de linhas de transmissão e considerações finais . . . . .</b>	<b>273</b>
<b>Anexo . . . . .</b>	<b>279</b>



## Agradecimentos

À Universidade Federal de Pernambuco, por todos os meus anos de magistério no Departamento de Engenharia Elétrica, o que me propiciou as experiências acadêmicas registradas neste projeto literário.

Aos alunos que direta ou indiretamente contribuíram para o enriquecimento do conteúdo do texto ora finalizado.

Muita gratidão à Editora Blucher, que, mais uma vez, acreditou no projeto que lhe foi encaminhado. À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, na qual, durante o desempenho profissional de minhas funções, vivenciei uma verdadeira escola na complementação de minha formação acadêmica.

Ao meu filho, Carlos Eduardo Lima Bezerra, que, com todo o afinho e esmero, fez a captação fotográfica em campo, projetou as propostas de capa e fez toda a edição preliminar das ilustrações contidas neste livro.

Aos meus pais, que supriram minhas necessidades físicas e intelectuais, herdadas com muito orgulho. À minha esposa e aos meus familiares, que souberam carinhosamente entender as horas de minha ausência do convívio, em prol da concretização desta obra.

E, por fim, ao bom Deus, que me propiciou a saúde e a inspiração necessárias para conceber esta obra didática.

## Prefácio

Escrever uma obra literária desta magnitude não é uma tarefa fácil. Quando se trata de um tema tecnológico, em uma área bastante específica, o desafio é ainda maior.

Este livro representa o registro de experiências vivenciadas por mim no desempenho profissional, quando exercia a função de engenheiro na área de estudos e normatização da manutenção de linhas de transmissão e expansão do sistema, durante mais de 20 anos, na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, a Chesf.

Nessa etapa profissional, tive a oportunidade de aprofundar os conhecimentos sobre linha de transmissão, tendo realizado, inclusive, minicurso com os Profs. Rubens Dario Fuchs e Márcio Tadeu, da Escola de Engenharia de Itajubá (MG), os quais muito me inspiraram ao longo de minha carreira e induziram-me a realizar o curso de especialização em Sistemas Elétricos, nessa mesma Escola, ao longo de 1982.

Essa experiência foi lapidada, durante minha vida acadêmica, na Universidade Federal de Pernambuco (PE), também por mais de 20 anos. Nessa etapa acadêmica, tive a oportunidade de fazer o doutorado na Universidade Federal de Campina Grande (PB), tendo recebido ricos e importantes ensinamentos fundamentais para a construção do meu perfil técnico-científico.

Ao longo do magistério, tive o privilégio de ministrar a disciplina Transmissão de Energia Elétrica, por diversos anos, o que repercutiu no fortalecimento dos meus conhecimentos e na motivação necessária para a elaboração deste livro, que apresenta, como inovações principais, o aprofundamento nas questões ambientais relacionadas com a implantação de uma linha de transmissão, formas de minimização dos impactos, fundamentais na sustentabilidade do empreendimento. Destacam-se,

ainda, os enfoques direcionados ao cálculo e à medição de parâmetros elétricos e estruturação e manuseio de indicadores de desempenho da transmissão, essenciais na aferição da qualidade dos serviços prestados.

A título de diferencial acadêmico, são apresentados diversos algoritmos, aplicações e exercícios resolvidos. Foram introduzidos, ainda, desafios ao leitor, estruturados na forma de “Pontos para Reflexão”, e exercícios propostos. Ao final, são recomendadas leituras complementares, para embasamento de diversos pontos abordados ao longo do livro.

Uma boa leitura a todos!

José Maurício de Barros Bezerra

# Apresentação

O livro tem catorze capítulos, que foram sequenciados no sentido de conduzir o leitor a familiarizar-se com o tema, fazendo um panorama inicial sobre os desafios da transmissão de energia, desde a concepção da linha até as suas características básicas. Os capítulos são descritos a seguir, introduzindo-se um breve resumo do conteúdo de cada um deles.

Capítulo 1 – Concepção e operação de linhas de transmissão: inicia a visão panorâmica de uma linha de transmissão, passando pelas etapas de planejamento, projeto, construção, comissionamento e operação.

Capítulo 2 – Monitoração, manutenção e recapacitação de linhas de transmissão: dá sequência à visão panorâmica da instalação, abordando mais especificamente as etapas de monitoração, manutenção e recapacitação.

Capítulo 3 – Cabos condutores para linhas de transmissão e distribuição: inicia a caracterização dos componentes de uma linha de transmissão, abordando cabos condutores, constituição, tipos e evolução até os modernos cabos especiais.

Capítulo 4 – Isoladores para linhas de transmissão: aborda os diversos tipos de isoladores, suas características, a composição de cadeias, vantagens e desvantagens das alternativas isolantes disponíveis.

Capítulo 5 – Ferragens e acessórios para linhas de transmissão: aborda as diversas ferragens e os acessórios, passando por grampos de suspensão, amortecedores de vibração, espaçadores amortecedores, ferragens para cadeias de isoladores, anéis equalizadores e esferas sinalizadoras.

Capítulo 6 – Estruturas para linhas de transmissão e distribuição: registra os diversos tipos de estrutura utilizados em uma linha de transmissão e distribuição, desde suspensão, autoportantes, estaiadas, trapezoidais, amarração, ângulo, derivação, canadense, até as conceituais.

Capítulo 7 – Impactos ambientais de linhas de transmissão: analisa os diversos tipos de impactos causados (físico-bióticos e socioeconômicos), as formas de quantificação, o efeito corona e as formas de minimização.

Capítulo 8 – Proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas: analisa as formações das descargas atmosféricas, os efeitos sobre o sistema de potência e as formas de proteção.

Capítulo 9 – O processo de energização de uma linha de transmissão: avalia os fenômenos transitórios oriundos da energização de uma linha de transmissão desde uma visão simplificada até o enfoque detalhado por meio de modelos matemáticos mais elaborados.

Capítulo 10 – Desenvolvimento e aplicação de modelos aproximados para linhas de transmissão: registra as buscas por modelos que simplifiquem as análises sistêmicas, por meio da representação da linha por circuitos equivalentes, os quais emulem o comportamento da linha em seus terminais, parametrizados por precisões predefinidas.

Capítulo 11 – Cálculo e medição de parâmetros elétricos de linhas de transmissão: desenvolve modelos para cálculo dos parâmetros elétricos de uma linha, a partir de suas características físicas, como também introduz técnicas para medição desses parâmetros.

Capítulo 12 – Confiabilidade da transmissão e distribuição: analisa os diversos indicadores de desempenho das linhas de transmissão e distribuição, detalhando a aplicabilidade e forma de calcular cada um deles, com exemplos ilustrativos, de tal forma a buscar-se a preservação da qualidade do fornecimento da energia elétrica aos diversos consumidores.

Capítulo 13 – Modelagem eletromecânica de linhas de transmissão: introduz modelagens eletromecânicas que permitam estabelecer os limites operacionais de uma linha de transmissão sem comprometer as alturas condutor-solo (ou objetos) preconizadas por normas técnicas.

Capítulo 14 – Tecnologias para recapacitação de linhas de transmissão e considerações finais: apresenta diversas técnicas utilizadas para recapacitar linhas de transmissão. Para maior aprofundamento no tema, são recomendados livros específicos.

# CAPÍTULO 1

## Concepção e operação de linhas de transmissão

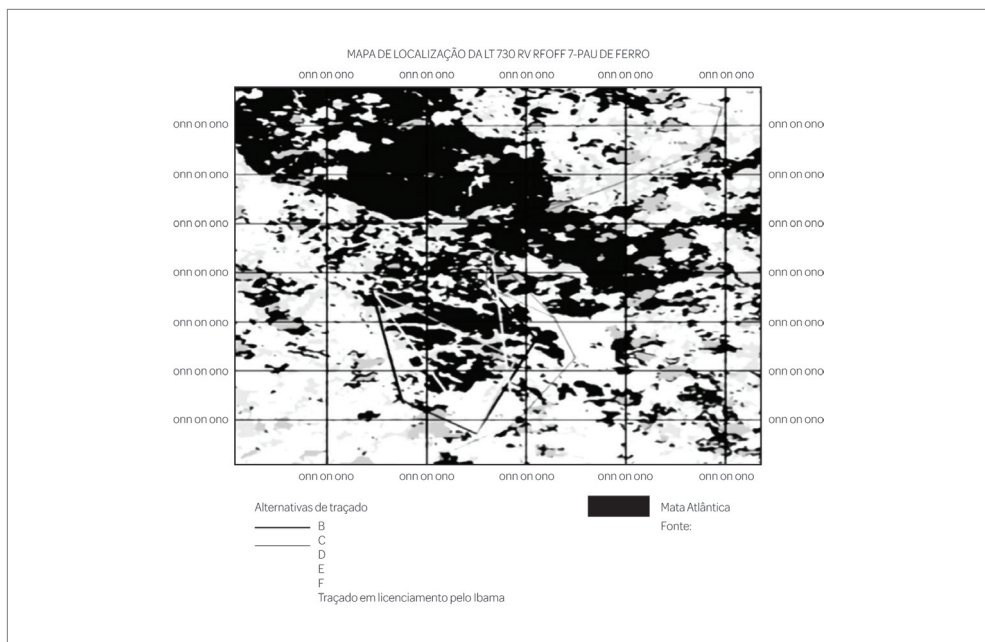
Nos estudos de um sistema de potência, surge a necessidade de geração e transmissão da energia elétrica no sentido de atendimento às diversas demandas por esse insumo essencial à sociedade moderna, conforme exemplo ilustrativo registrado na Figura 1.1.



**Figura 1.1** Foto de linhas de transmissão – região metropolitana de Recife.  
Fonte: Carlos Eduardo L. Bezerra.

Nesse contexto, as distâncias entre a fonte de geração e os centros de consumo nem sempre são pequenas, caracterizando a necessidade de linhas de transmissão extensas e de elevadas classes de tensão. Esses estudos envolvem ações detalhadas de planejamento, projeto, construção e comissionamento, até se chegar às fases de operação, manutenção e monitoração propriamente ditas. O passar dos anos pode levar a linha concebida à submissão de processos de recapacitação, diante da superação dos seus limites operacionais.

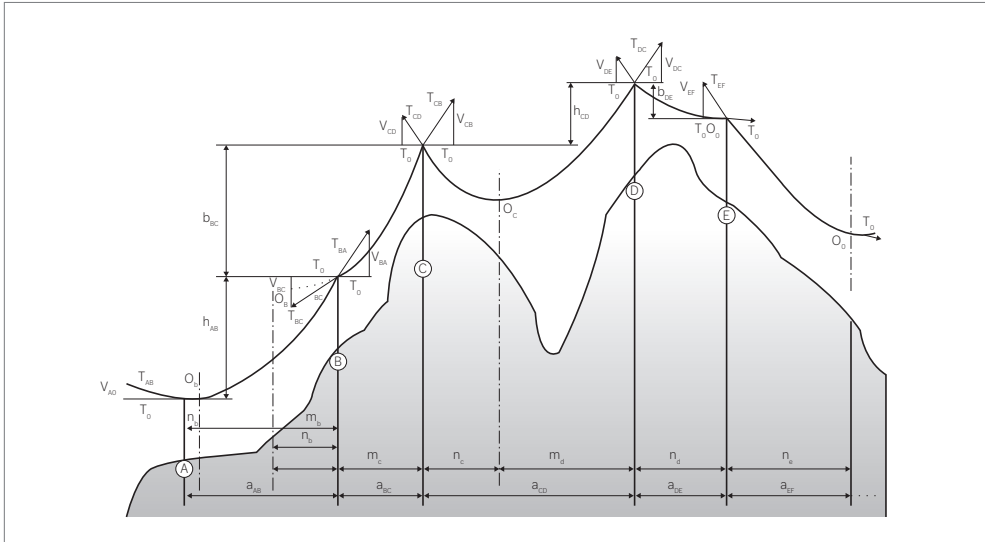
A etapa de planejamento envolve principalmente as seguintes subetapas: escolha do traçado (vide Figura 1.2, gentilmente cedida pela Chesf), estudos de impacto ambiental, definição da classe de tensão, estudos da geometria da torre, escolha do condutor e definição do limite térmico.



**Figura 1.2** Imagem de satélite para escolha de traçado de linha de transmissão.

Fonte: adaptada de foto gentilmente cedida pela Chesf.

Já a etapa de projeto procura detalhar as diversas premissas básicas levantadas no planejamento, conforme apresentado na Figura 1.3, incorporando as seguintes subetapas: levantamento topográfico, projeto de locação das torres, definição de alturas, projetos de fundações, ferragens, acessórios e aterramento (Fuchs, 2015).



**Figura 1.3** Localização de estruturas em uma linha de transmissão

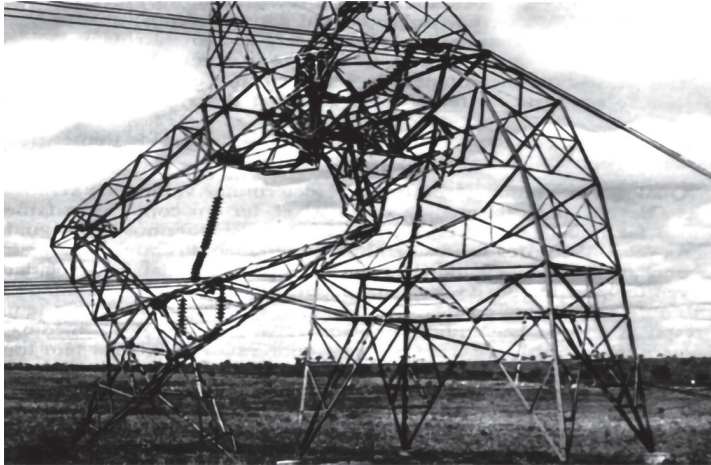
Fonte: adaptada de Fuchs; Almeida, 2005.

A etapa de construção, por outro lado, busca concretizar o projeto concebido, executando as subetapas relacionadas com a montagem das fundações, o içamento das torres, o lançamento dos condutores, o nivelamento e a fixação destes e, finalmente, a numeração das torres e sinalização.

Ao final da construção, inicia-se a etapa precursora da operação, a qual recebe o nome de *comissionamento*. Nela, são aferidas as conformidades da linha de transmissão com o projeto e, principalmente, o atendimento aos critérios de manutibilidade da nova instalação, ressaltando-se as seguintes verificações: distâncias de segurança, posicionamento das cadeias de isoladores, escalonamento das estruturas, limpeza da faixa de servidão e estradas vicinais de acesso às estruturas.

Não obstante todos esses passos, criteriosamente cumpridos, a linha pode ser objeto de acidente, levando ao colapso no fornecimento de energia elétrica a diversos consumidores. Esse tipo de sinistro foi vivenciado por uma empresa de energia elétrica da região Sudeste do Brasil, registrado na Figura 1.4. Ressalva-se que esse problema foi ocasionado por condições atmosféricas atípicas superiores aos critérios normativos considerados no projeto e construção da linha de transmissão.





**Figura 1.4** Queda de estrutura por rajada de vento.

Fonte: adaptada de Fuchs; Almeida, 2005.

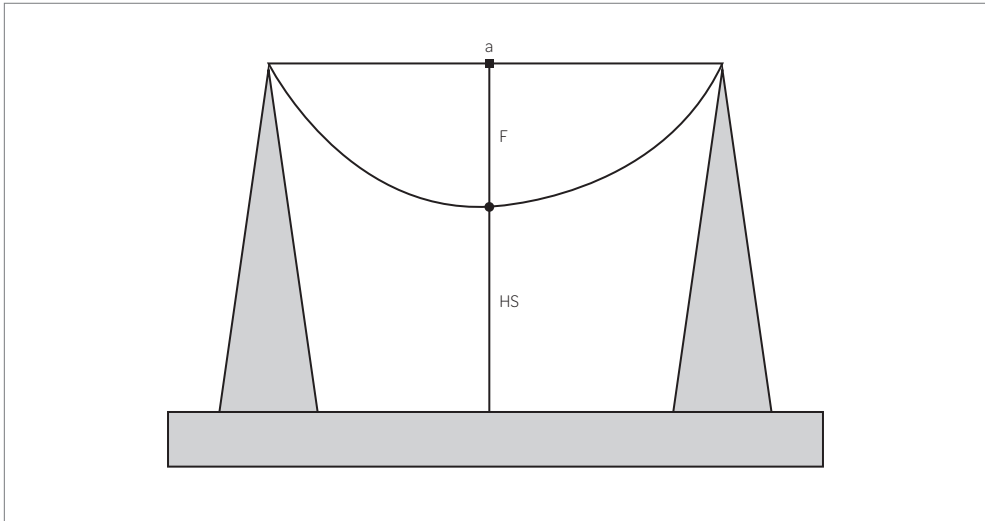
Na etapa de operação, é importante a identificação e o atendimento aos diversos limites que a linha possui, agrupados em sistêmicos, econômicos e físicos. A linha é um equipamento que requer cuidados especiais na sua operação. As limitações sistêmicas estão associadas às condições impostas pela carga elétrica demandada pela linha. Caso a demanda seja muito baixa (carga leve), a tensão tende a elevar-se, desde o terminal emissor até o terminal receptor, devido ao efeito Ferranti (a linha se torna muito capacitiva). Caso a demanda seja muito grande (carga pesada), a linha será submetida a uma queda de tensão. Esses dois casos podem ser compensados por reatores em paralelo e bancos de capacitores em série, respectivamente, de tal forma a atender às restrições normativas do setor elétrico (a queda ou aumento de tensão não deve ser superior a 5%).

Outro aspecto a ser considerado se refere à perda de estabilidade, na qual a defasagem entre os fasores tensão do lado emissor e receptor não deve ser superior a 45 graus (valor típico, que depende da inércia da máquina supridora de energia). Essa compensação também pode ser realizada por meio de bancos de capacitores em série, na atualidade exaustivamente aplicados. Vale ressaltar que a perda de estabilidade leva à perda de sincronismo entre as barras e, conseqüentemente, ao não atendimento à carga demandada (Fuchs, 2015; Elgerd, 1971).

Por outro lado, o limite econômico está relacionado com a condição em que a linha venha a transmitir uma potência menor ou maior do que a sua potência natural. Esse valor referencial assegura o atendimento à demanda com menores perdas. Representa um estado operacional ótimo, no qual as perdas associadas ao suprimento dos campos elétricos e magnéticos da linha são zeradas. Nesse estado, ocorre uma

espécie de ressonância paralela entre os componentes indutivos e capacitivos da linha. Essa é uma condição operacional que deve ser considerada na otimização do fluxo de carga do sistema de potência.

Já os limites físicos estão relacionados com o limite térmico da linha de transmissão e o limite térmico do cabo condutor. No primeiro caso, são fundamentais os atendimentos às distâncias de segurança preconizadas pelas normas, conforme ilustrado na Figura 1.5. No segundo caso, o foco é o cabo condutor, para que não ocorra o seu recozimento, levando à perda de suas características elásticas.



**Figura 1.5** Limite térmico da linha: F – flecha máxima do condutor e HS – altura de segurança.

Fonte: adaptada de Fuchs; Almeida, 2005.

No Capítulo 2 serão enfocados os conceitos relacionados a monitoração, manutenção e recapacitação de linhas de transmissão.

## 1.1 PONTOS PARA REFLEXÃO

- Do ponto de vista econômico e ambiental, quais as tecnologias concorrentes à utilização remota de fontes de energia por meio de linhas de transmissão?
- Quais as vantagens e desvantagens dessas alternativas?

## REFERÊNCIAS

- ELGERD, Olle Ingermar. *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*. Columbus, OH, US.: McGraw\_Hill Inc., US, 1971. 564 p. v. 1.
- FUCHS, Rubens Dario; ALMEIDA, Márcio Tadeu; LABEGALINI, Paulo Roberto; LABEGALINE, José Ayrton. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. 2. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2005. 529 p. v. 1.
- FUCHS, Rubens Dario. *Transmissão de Energia Elétrica*. 3. ed. rev. Uberlândia/MG: Editora da Universidade Federal de Uberlândia – Edufu, 2015. 450 p. v. 2.

## CAPÍTULO 2

# Monitoração, manutenção e recapacitação de linhas de transmissão

Neste capítulo, serão avaliadas três ações fundamentais a serem empreendidas sobre uma linha de transmissão: a monitoração, a manutenção e a recapacitação.

### 2.1 MONITORAÇÃO

A monitoração de parâmetros eletromecânicos de linhas de transmissão é uma ação fundamental na aferição do seu estado operacional, não apenas com o enfoque no desencadeamento de ações preditivas rotineiras, mas também com o intuito de aferir com precisão a vida útil remanescente de seus componentes, visando a uma avaliação econômica criteriosa da viabilidade de recapacitação da instalação.

Dentre os parâmetros que requerem uma avaliação permanente, por meio da análise de registros estatísticos ou instrumentações adequadas, pode-se citar: indicadores de desempenho, vibrações eólicas, resistência de pé de torre, temperatura de conexões, alturas condutor-solo, oxidação de ferragens, poluição de isoladores e oxidação de condutores.

Os indicadores de desempenho (taxas de falha permanente e transitória, principalmente) são registros estatísticos que, associados com as causas desses eventos, fornecem subsídios fundamentais a ações de melhoramentos estruturados da ins-

talação. Essas taxas de falha são computadas a partir da Equação (2.1) (Bezerra *et al.*, 1995).

$$I = \frac{N \times 100}{A_o \times L} \quad (2.1)$$

Em que:

- N – número de falhas no período de observação;
- A<sub>o</sub> – tempo de observação em anos;
- L – extensão da linha em km.

Na Figura 2.1, encontram-se ilustrados gráficos de barras que ressaltam as causas de diversas ocorrências em uma linha de transmissão.

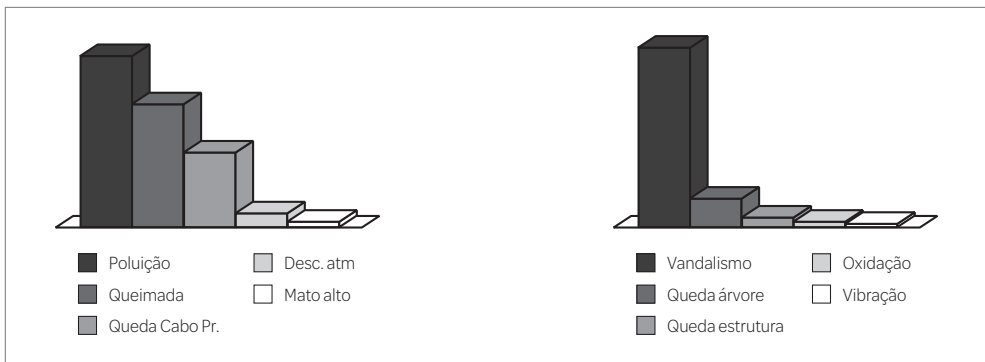


Figura 2.1 Taxas de falha em linhas de transmissão.

Esses registros são agrupados em falhas transitórias e falhas permanentes. As falhas transitórias são aquelas em que não se faz necessária a ação da manutenção para recompor a linha de transmissão ao seu estado operacional, pois a causa da falha é autoextinta. Já as falhas permanentes conduzem à necessidade de ações de equipes de manutenção para reporem a linha à operação.

Nos exemplos formulados na Figura 2.1, observa-se a necessidade de atenção especial quanto à poluição em isoladores a fim de minimizar as falhas transitórias; e, no vandalismo, para restringir as falhas permanentes. A estruturação adequada desses dados permite computar as taxas de falha por 100 km/ano, a qual pode ser obtida a partir da Equação (2.1). Essa equação pode ser reescrita de tal forma a computar a taxa de falha para um grupo de linhas, o qual pode caracterizar, por exemplo, o sistema de 230 kV, ou 500 kV, da empresa. Tal reformulação conduz à Equação (2.2).

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^N I_i A_{o_i} L_i}{\sum_{i=1}^N A_{o_i} L_i} \quad (2.2)$$

Em que:

- $I_s$  – taxa de falhas de um grupo de linhas;
- $i$  – identificador de uma determinada linha.

Ao analisar-se essa última equação, pode ser observado que o numerador caracteriza o somatório das contribuições das taxas de falha de cada linha do grupo. Portanto, a linha “ $i$ ” que apresentar o maior valor no numerador representa a instalação que requer maior atenção para a redução da taxa de falha do sistema sob análise. Dessa forma, avaliações conjuntas dessa equação e da estratificação das causas das ocorrências ilustradas na Figura 2.1 permitem, estrategicamente, delinear ações preventivas, priorizando a linha que mais contribua para a taxa do sistema ( $I_s$ ). Esse tipo de planejamento pode ser caracterizado como ação proativa no sentido de se evitar que o desempenho da linha venha a impactar na parcela variável contratual exaustivamente cobradas pelos agentes reguladores.

## 2.2 MANUTENÇÃO

Já as ações de manutenção preventivas são desenvolvidas rotineiramente, de tal forma a assegurar a operacionalidade das instalações. Essas ações são capitaneadas por inspeções terrestres ou aéreas, periodicamente realizadas nas linhas de transmissão. São procedimentos estruturados que procuram de forma padronizada efi- cientizar o deslocamento das equipes, direcionando prioritariamente para a elimi- nação de defeitos mais graves nas linhas mais impactantes do sistema. No desenvolvimento dessas ações, algumas palavras-chave precisam estar em evidência (Bezerra, 2000):

- padronização: executar os serviços normativamente planejados, primando pela qualidade e segurança;
- descentralização: alocar as equipes de manutenção em pontos estratégicos do sistema;
- histórico operacional: aprender com os erros e acertos;
- reprogramação de pendências: incorporar procedimentos que permitam sub- meter as pendências de programações anteriores ao novo ciclo de planejam- to, respeitadas as prioridades específicas do novo momento;

- priorização de atividades: fazer primeiro o mais importante, eficientizando as ações das equipes;
- periodicidades: primar por não se “esquecer” de ações estratégicas que tenham que ser realizadas, muitas vezes a cada década (medições de resistências de aterramento, por exemplo);
- simulação de cenários: adequar as programações a eventuais restrições atemporais e/ou sazonais;
- avaliação de custos: restringir o planejamento às limitações financeiras do momento;
- supervisão em tempo real: permitir remanejamento de programações, diante de imprevistos;
- indicadores operacionais: registrar as ocorrências de forma estruturada, conforme ilustrado na Figura 2.1, anteriormente analisada;
- indicadores gerenciais: permitir aferir a eficiência e/ou deficiência da gestão dos recursos humanos e materiais, no atendimento ao planejamento formulado.

De uma forma geral, as ações de manutenção são realizadas com desligamento (programado ou não programado) ou sem (a distância ou ao potencial), sendo esses últimos procedimentos prioritariamente desejáveis. Os desligamentos são realizados diante da identificação de defeitos que não permitam a atuação das equipes de linha energizada, diante dos altos riscos envolvidos. Quando possível, programam-se as suas correções para domingos ou feriados. Caso contrário, balizando-se adequadamente a segurança de terceiros e das instalações, são realizadas ações emergenciais de curto prazo.

A técnica de manutenção com a linha energizada a distância prima pelo contato com as partes “vivas” da instalação por meio de bastões isolantes, conforme ilustrações registradas na Figura 2.2. Obedecem a distâncias regulamentares para prevenir, inclusive, contra eventuais sobretensões no sistema. Exige destreza, muita atenção e treinamentos exaustivos de trabalho em equipe.



**Figura 2.2** Técnica de manutenção a distância.

Fonte: Foto gentilmente cedida pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf).

Já na técnica de manutenção ao potencial, o eletricitista veste uma roupa especial de algodão impregnado com nitrato de prata, a qual permite equalizar todo o potencial do seu corpo, funcionando como uma “gaiola de Faraday” e evitando a circulação de correntes prejudiciais aos seus órgãos. Tal estratégia permite que o eletricitista seja levado para um contato direto com as partes energizadas da instalação e realize localmente a manutenção requerida, conforme pode ser verificado na Figura 2.3.





**Figura 2.3** Técnica de manutenção ao potencial.

Fonte: Foto gentilmente cedida pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf).

Essas ações se caracterizam por um trabalho harmonioso, que requer uma supervisão permanente, a fim de se evitarem acidentes graves. Não podem existir “craques individualistas”, e sim procedimentos criteriosamente orquestrados.

Nesse agrupamento de ações, podem ser citadas ainda as manutenções com helicóptero, conforme ilustrações contidas na Figura 2.4. Para esses procedimentos, a aeronave deve possuir capacidade adequada que permita a estabilidade necessária à precisão das ações.



**Figura 2.4** Manutenção de linhas de transmissão com o uso de helicóptero.

Fonte: Criativo Brasil, 25 abr. 2017. Disponível em: <https://youtu.be/TF2gcBU57jI>.

Nesse agrupamento, também estão tomando vulto as atividades realizadas por meio de *drones*, conforme registro feito na Figura 2.5. São ainda ações incipientes, dadas as limitações de autonomia existentes. Vislumbra-se um crescimento desses procedimentos, diante de diversas pesquisas em andamento, que procuram aumentar a autonomia desses veículos e dotá-los de mais “inteligência”, principalmente na implementação de sensores especiais que agreguem mais valor às ações de monitoramento de componentes estratégicos.



**Figura 2.5** Uso de *drones* na manutenção de linhas de transmissão.

Fonte: AERO Drone Brasil.

## 2.3 RECAPACITAÇÃO

Por outro lado, as ações de recapacitação passam a ser necessárias quando a linha de transmissão tem as suas funções superadas em relação às necessidades do sistema. Nesse momento, são necessárias análises específicas para aferir-se a real possibilidade de a linha vir a ser recapacitada. A recapacitação é uma ação que engloba três tipos principais de vertentes: *refurbishment* (restauração das características originais), *uprate* (aumento da capacidade de transmissão) e *upgrade* (aumento da disponibilidade) (Pohlman, 1991). Seguem alguns exemplos:

- *refurbishment*: troca de isoladores e ferragens oxidados por componentes idênticos aos originais;
- *uprate*: aumento das alturas condutor-solo, repercutindo no aumento do limite térmico da linha; inserção de novo condutor, por fase, aumentando a sua potência natural e ampacidade;
- *upgrade*: substituição de isoladores de vidro por poliméricos em regiões críticas de poluição e/ou vandalismo; instalação de cabos para-raios em linhas que não os possuem; diminuição da resistência de pé de torre.

Entretanto, essas ações de recapacitação precisam ser precedidas por aferições criteriosas da vida útil remanescente dos condutores, estado das conexões, fundações, aterramento, poluição ambiental etc. Tais cuidados se fazem necessários, não obstante a vertente voltada para *uprate* poder conduzir para uma situação operacional indesejável, na qual os aspectos relacionados à disponibilidade poderão não ser adequadamente atendidos, e a linha poderá passar a transportar uma carga elétrica superior ao seu limite original. Essa situação, como a taxa de falha estará mantida, conduz a impactos operacionais mais abrangentes. É importante, portanto, que as ações de *uprate* sejam sempre acompanhadas por ações de *upgrade*. Dessa forma, é fundamental que as ações de recapacitação sejam precedidas de monitorações históricas e complementares, de tal modo que a decisão quanto à viabilidade dessas ações seja alicerçada em um balanço criterioso de custo-benefício, tendo-se em mente o tempo de vida remanescente dos componentes que ainda permanecerão na linha candidata à recapacitação.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE PANORAMA GERAL DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

Este capítulo complementa o anterior e encerra a visão panorâmica de uma linha de transmissão, em suas diversas etapas. Nos próximos capítulos, serão abordados os diversos temas introduzidos de uma maneira geral, buscando-se aprofundar mais detalhadamente os seus diversos aspectos tecnológicos.

## 2.5 PONTOS PARA REFLEXÃO

- Quais os riscos inerentes às atividades de manutenção com a linha de transmissão energizada, separando-os em conformidade com as técnicas a distância e ao potencial?
- Qual a importância de se constituir procedimentos estatísticos robustos para construção de indicadores de desempenho de uma linha de transmissão?

## REFERÊNCIAS

- BEZERRA, J. M. B. Linhas de Transmissão. *In*: Curso de extensão universitária – atualização de engenheiros e técnicos de empresas de energia elétrica, 2000, Recife – UFPE. *Anais [...]*. Recife: UFPE/DEE, 2000. Tema: Linha de Transmissão, p. 1-46.
- BEZERRA J. M. B.; ARAÚJO, P. I. S.; CAVALCANTI, J. H.; CAVALCANTI, F. J. M. M. Uso de Indicadores Gerenciais no Planejamento da Manutenção de Linhas de Transmissão. I-Semase, 14., 1995, Foz do Iguaçu/PR. *Anais [...]*. Foz do Iguaçu/PR: Itaipu Binacional, 1995. 5 p. Tema: Manutenção do Setor Elétrico.
- POHLMAN J. C. Assessement of Overhead lines. *In*: IEEE/PES T&D Conference, 1991, Dallas, Texas, 1991. p. 10-15.

**O fornecimento de energia elétrica aos centros de consumo pode ocorrer de duas maneiras: por meio da geração local ou pela transmissão de energia a partir de fontes remotas. No primeiro caso, é necessária uma linha de transmissão de pequena extensão; já no segundo, surge a demanda por linhas de transmissão mais longas e com uma elevada classe de tensão.**

A concepção dessas linhas, portanto, envolve uma série de estudos detalhados que abrangem o planejamento, o projeto, a construção e o comissionamento, culminando nas fases de operação, manutenção e monitoramento. Com o passar dos anos, pode ser necessário recapacitar a linha projetada, especialmente se seus limites operacionais forem superados. Essas linhas podem ser aéreas ou subterrâneas, de corrente alternada ou contínua, cada uma com aplicações específicas.

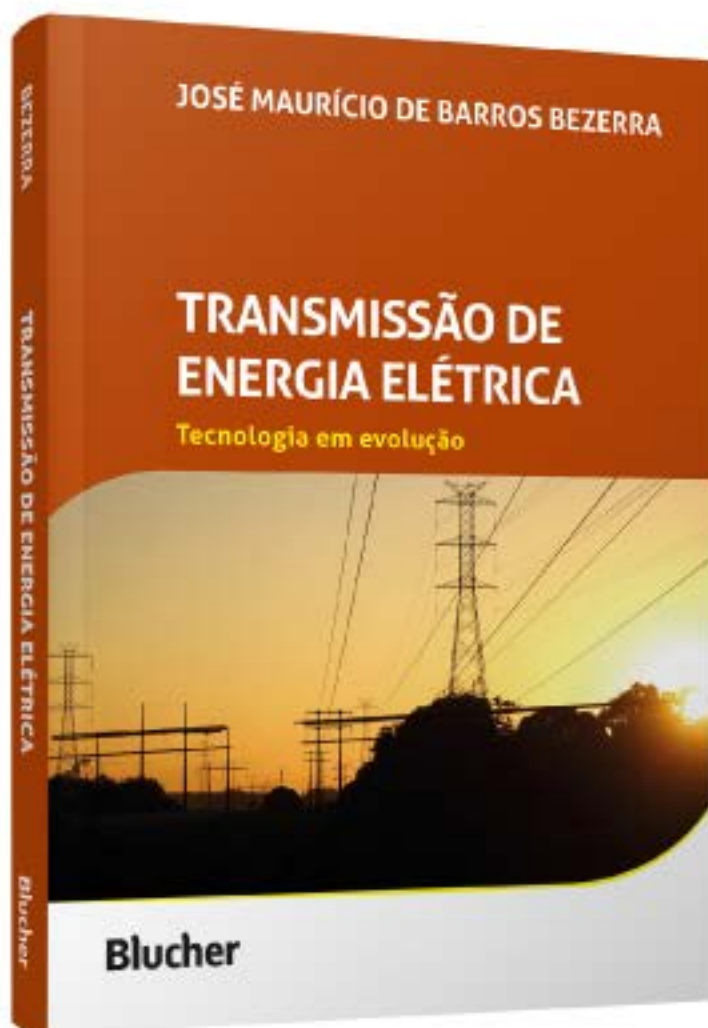
Dessa forma, o foco deste livro recai sobre as linhas aéreas de corrente alternada trifásica, compostas de cabos condutores, isoladores, ferragens, estruturas de suporte e cabos para-raios.

Ao longo da obra, o empreendimento "Linha de transmissão" é amplamente caracterizado, com a descrição detalhada das suas etapas de concepção, dos atributos dos componentes e das modelagens operacionais, todas embasadas por rigorosas fundamentações físicas e matemáticas.

Além disso, são avaliadas as questões ambientais, assim como os indicadores de desempenho operacional, de modo a constituir parâmetros que garantam uma instalação ecologicamente sustentável e capaz de fornecer à sociedade moderna um insumo essencial, com os padrões de qualidade adequados.



**Blucher**



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

## Transmissão de energia elétrica

Tecnologia em evolução

---

José Maurício de Barros Bezerra

ISBN: 9788521222484

Páginas: 282

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2025

---