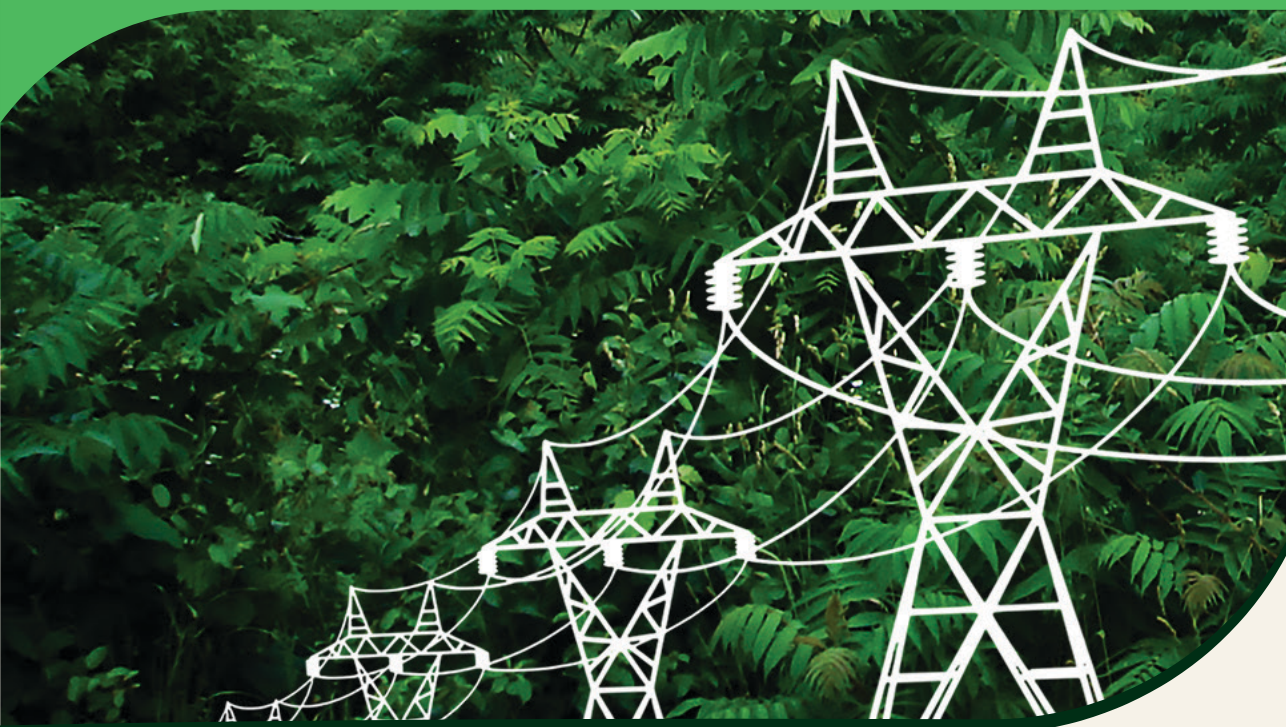


JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA  
ALEXSANDRO ALEIXO PEREIRA DA SILVA  
LÍGIA VERÔNICA GENÉSIO PESSOA  
JULIANA MACIEL MAIA BEÇA  
JONATAN ESAÚ MEJIA QUIJADA

# RECAPACITAÇÃO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Desenvolvimento sustentável do sistema elétrico



**Blucher**

José Maurício de Barros Bezerra  
Alexsandro Aleixo Pereira da Silva  
Lígia Verônica Genésio Pessoa  
Juliana Maciel Maia Beça  
Jonatan Esaú Mejia Quijada

RECAPACITAÇÃO DE LINHAS  
AÉREAS DE TRANSMISSÃO:  
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
DO SISTEMA ELÉTRICO

*Recapacitação de linhas aéreas de transmissão: desenvolvimento sustentável do sistema elétrico*

© 2023 José Maurício de Barros Bezerra, Aleksandro Aleixo Pereira da Silva, Lígia Verônica Genésio Pessoa, Juliana Maciel Maia Beça, Jonatan Esaú Mejia Quijada  
Editora Edgard Blücher Ltda.

*Publisher* Edgard Blücher

*Editor* Eduardo Blücher

*Coordenação editorial* Jonatas Eliakim

*Produção editorial* Lidiane Pedroso Gonçalves

*Preparação de texto* Maurício Katayama

*Diagramação* Taís Lago

*Revisão de texto* Vânia Cavalcanti

*Capa* Leandro Cunha

*Imagem da capa* José Maurício de Barros Bezerra

---

# Blucher

---

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar  
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil  
Tel 55 11 3078-5366  
**contato@blucher.com.br**  
**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... [et al]  
Recapacitação de linhas aéreas de transmissão :  
desenvolvimento sustentável do sistema elétrico / José  
Maurício de Barros Bezerra...[et al]. - São Paulo : Blucher, 2023.  
224 p.

Bibliografia  
ISBN 978-65-5506-418-6

1. Energia elétrica – Transmissão I. Bezerra, José  
Maurício de Barros

22-4884

CDD 621.3192

---

Índices para catálogo sistemático:  
1. Energia elétrica - Transmissão

# CONTEÚDO

<b>INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 Conceitos sobre recapacitação .....	25
1.1.1 <i>Refurbishment</i> .....	25
1.1.2 <i>Uprate</i> .....	25
1.1.3 <i>Upgrade</i> .....	25
1.2 Monitoração do estado da linha de transmissão .....	25
1.2.1 <i>Indicadores de desempenho</i> .....	26
1.2.2 <i>Vibrações eólicas</i> .....	26
1.2.3 <i>Resistência de pé de torre</i> .....	26
1.2.4 <i>Temperatura de conexões</i> .....	27
1.2.5 <i>Oxidação de ferragens</i> .....	27
1.2.6 <i>Poluição em isoladores</i> .....	27
1.2.7 <i>Oxidação de condutores</i> .....	28
1.2.8 <i>Análise de ampacidade</i> .....	28
Referências.....	37

<b>TÉCNICA DE RECONDUTORAMENTO .....</b>	<b>39</b>
2.1 Tipos de condutores utilizados.....	40
2.1.1 Condutores tradicionais.....	40
2.1.2 Condutores especiais.....	42
2.2 Estudos de recondutoramento .....	47
2.2.1 O aplicativo computacional.....	47
2.2.2 Metodologia aplicada .....	48
2.2.3 Estudo de caso 1 – Derivação-Suape II.....	48
2.2.4 Estudo de caso 2 – Morro do Chapéu-Irecê.....	52
2.2.5 Estudo de caso 3 – Ibiapina-Sobral.....	54
Referências.....	57
 <b>TÉCNICA DE RELOCAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO.....</b>	 <b>59</b>
3.1 Relocação de estruturas metálicas com alteamento .....	60
3.2 Levantamento topográfico – refinamentos tecnológicos .....	63
3.2.1 Teodolito.....	64
3.2.2 Estação total .....	64
3.2.3 GPS-RTK .....	65
3.2.4 Aerofotogrametria e ortofotocarta.....	65
3.2.5 Lidar .....	66
3.2.6 Imagens de satélites.....	66
3.3 A técnica de relocação de estruturas.....	67
3.3.1 Fundação em concreto armado.....	67
3.3.2 Fundação composta de concreto armado e areia adensada.....	67
3.3.3 Premissas e cuidados essenciais.....	69
3.3 Esquema de implantação da solução proposta.....	70
3.4 Estudo de caso: recapacitação da LT 230 kV Aquiraz/Fortaleza II C1.....	74
3.4.1 Solução tradicional.....	74
3.4.2 Solução proposta.....	77
3.5 Análise dos resultados.....	78

3.5.1 Administração local para montagem de canteiro de obra .....	78
3.5.2 Montagem e desmontagem de canteiro de obra .....	79
3.5.3 Transporte de material.....	79
3.5.4 Carga e descarga de material .....	79
3.5.5 Construção de estradas de acesso .....	80
3.5.6 Supressão de vegetação.....	80
3.5.7 Serviços de escavação e reaterro .....	80
3.5.8 Montagem de estrutura metálica .....	81
3.5.9 Transferência de estrutura de concreto.....	81
3.5.10 Aplicação de concreto .....	81
3.6 Considerações finais sobre relocação de estruturas .....	82
Referências.....	82

## **TÉCNICA DE INSERÇÃO DE CONDUTOR .....** 85

4.1 Breve revisão sobre o desenvolvimento da técnica LPNE .....	86
4.2 Fundamentação teórica .....	86
4.2.1 Potência natural .....	86
4.2.2 Matriz de parâmetros longitudinais das linhas de transmissão .....	88
4.2.3 Aumento da potência natural da linha de transmissão.....	90
4.2.4 Cálculo de campos eletromagnéticos.....	91
4.2.5 Comportamento mecânico dos condutores.....	92
4.2.6 Modelo de ampacidade.....	93
4.2.7 Cálculo da distribuição de corrente devido à incorporação de um condutor.....	94
4.3 Material e metodologia utilizados para geração dos resultados.....	95
4.3.1 Condutores .....	95
4.3.2 Aplicativos computacionais.....	97
4.4 Estudo de caso .....	100
4.4.1 Implementação da metodologia proposta .....	105
4.5 Discussão.....	117

4.6 Conclusões .....	120
Referências.....	120

## **TÉCNICA DE TRAMO MISTO – USO DE CABOS ESPECIAIS ..... 123**

5.1 Breve revisão sobre o desenvolvimento da tecnologia dos cabos condutores .....	124
5.1.1 <i>Cabo de alumínio (CA)</i> .....	124
5.1.2 <i>Cabo de alumínio com alma de aço (CAA)</i> .....	125
5.1.3 <i>Cabo de alumínio-liga 6201 (CAL 6201)</i> .....	126
5.1.4 <i>Cabo de alumínio termorresistente com alma de aço (T-CAA ou T-ACSR)</i> .....	127
5.1.5 <i>Cabo tipo gap de liga de alumínio ultratermorresistente reforçado com aço (GZTACSR)</i> .....	128
5.1.6 <i>Condutor de liga de alumínio ultratermorresistente reforçado com Invar (ZTACIR)</i> .....	129
5.1.7 <i>Condutor de liga de alumínio ultratermorresistente reforçado com Invar (ZTACIR)</i> .....	130
5.1.8 <i>Cabo de alumínio reforçado por compósito (ACCR)</i> .....	131
5.1.9 <i>Condutor de alumínio com alma de compósito (ACCC)</i> .....	132
5.1.10 <i>Considerações finais sobre os cabos especiais</i> .....	133
5.2 Revisão dos modelos de ampacidade com foco nos cabos especiais .....	134
5.2.1 <i>Ganho de calor devido à condução da corrente elétrica</i> .....	137
5.2.2 <i>Ganho de calor devido ao aquecimento solar</i> .....	141
5.2.3 <i>Dissipação de calor por convecção</i> .....	155
5.2.4 <i>Dissipação de calor por radiação</i> .....	163
5.2.5 <i>Considerações finais sobre os modelos de ampacidade</i> .....	167
5.3 Comportamento eletromecânico.....	169
5.3.1 <i>Equacionamento básico</i> .....	172
5.3.2 <i>Equação de mudança de estado em vão isolado</i> .....	174
5.3.3 <i>Equação de mudança de estado em uma seção de tensionamento com vãos contínuos</i> .....	178

5.3.4 Equação de mudança de estado em uma seção de tensionamento com vãos contínuos e condutores diferentes.....	180
5.3.5 Validação da metodologia .....	185
5.3.6 Considerações finais sobre o comportamento eletromecânico dos condutores .....	189
5.4 Estudos de caso .....	189
5.4.1 Escolha dos condutores .....	191
5.4.2 Descrição dos casos.....	193
5.4.3 Considerações finais sobre os estudos de caso (sub2) .....	211
5.5 Comentários finais sobre a técnica de tramo misto.....	214
5.5.1 Vantagens da modelagem proposta .....	214
5.5.2 Desafios para aprimoramento da metodologia .....	215
Referências.....	215
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>221</b>
Referências.....	223



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

*José Maurício de Barros Bezerra*

Nos estudos de um sistema de potência, surge a necessidade de geração e transmissão da energia elétrica no sentido do atendimento às diversas demandas por esse insumo essencial à sociedade moderna.

Entretanto, 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 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; estudos de impacto ambiental; definição da classe de tensão; estudos da geometria da torre; escolha do condutor; e definição do limite térmico. É uma etapa que agrega profissionais de áreas multidisciplinares com o objetivo de estabelecer o traçado menos impactante ao meio ambiente, quer seja em seus aspectos físico, biótico ou socioeconômico.

Já a etapa de projeto procura detalhar as diversas premissas levantadas no planejamento, incorporando as seguintes subetapas: levantamento topográfico; projeto de locação das torres; definição de alturas; projetos de fundações; ferragens; acessórios; e aterramento (FUCHS, 2015).

A etapa de construção, por sua vez, busca concretizar o projeto concebido, executando as subetapas relacionadas com a montagem das fundações, içamento das torres,

lançamento dos condutores, nivelamento e fixação destes e, finalmente, numeração das torres e sinalização.

Ao final da construção, inicia-se a etapa precursora da operação, a qual se denomina “comissionamento”. Nesta etapa, são aferidas as conformidades da linha de transmissão com o projeto e, principalmente, o atendimento aos critérios de manutenibilidade 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 das estradas vicinais de acesso às estruturas.

Não obstante todos esses passos, criteriosamente cumpridos, a linha pode ser objeto de acidente, causando o colapso no fornecimento de energia elétrica a diversos consumidores. Em alguns desses casos, a ocorrência se deve à superação de parâmetros ambientais, diante de critérios minunciosamente estabelecidos. São situações prescritas em normas, nas quais ações da natureza levaram a esforços estatisticamente não considerados.

Na etapa de operação são importantes a identificação e o atendimento aos diversos limites que a linha tem, agrupados em sistêmicos, econômicos e físicos. A linha é um equipamento que requer cuidados especiais de 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 se elevar, 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, o qual depende da inércia da máquina supridora de energia). Essa compensação também pode ser realizada por meio de bancos de capacitores em série, exaustivamente aplicados. Vale ressaltar que a perda de estabilidade acarreta perda de sincronismo entre as barras e, conseqüentemente, o não atendimento à carga demandada (UCHS, 2015; ELGERD, 1971).

Por sua vez, o limite econômico está relacionado com a condição de 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 primeiros caso, são fundamentais os atendimentos às distâncias de segurança preconizadas pelas normas. No segundo caso,

o foco é o cabo condutor para que não ocorra o seu recozimento, levando à perda de suas características elásticas.

No contexto dessa análise panorâmica das etapas que compõem o complexo “transmissão de energia elétrica”, as ações voltadas para a recapacitação da linha de transmissão representam o foco central deste livro. A título ainda introdutório, serão feitas análises preliminares sobre os conceitos básicos inerentes a essas ações.

## **1.1 CONCEITOS SOBRE RECAPACITAÇÃO**

A recapacitação de uma linha de transmissão representa uma ação estruturada no sentido de melhorar ou de restabelecer o seu desempenho do ponto de vista quantitativo (capacidade de transmissão) ou qualitativo (continuidade de transmissão). Esta ação pode ser classificada de acordo com as formas descritas a seguir (IEEE, 1996).

### **1.1.1 REFURBISHMENT**

Visa restaurar as características originais da linha (exemplo: substituição generalizada de isoladores oxidados por outros novos, mas com as mesmas características dos anteriores).

### **1.1.2 UPRATE**

Objetiva aumentar a capacidade de transmissão. Diversos exemplos serão enfocados ao longo deste livro.

### **1.1.3 UPGRADE**

Procura aumentar a disponibilidade da linha (exemplo: substituição de isoladores de vidro por cadeias poliméricas em região de alto índice de vandalismo).

## **1.2 MONITORAÇÃO DO ESTADO DA LINHA DE TRANSMISSÃO**

A monitoração de parâmetros eletromecânicos das linhas de transmissão é uma ação fundamental na aferição do seu estado operacional, não apenas com o enfoque no desencadeamento de ações preditivas rotineiras, como também para aferir com precisão a vida útil remanescente de seus componentes, visando a uma avaliação econômica criteriosa da viabilidade de recapacitação da instalação (CIGRÉ, 2000).

São descritos a seguir os principais parâmetros que requerem uma avaliação permanente, mediante análise de registros estatísticos ou de instrumentações adequadas (BEZERRA *et al.*, 1998; BEZERRA, 2000).

### 1.2.1 INDICADORES DE DESEMPENHO

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 instalação.

Na Figura 1.1, é ilustrado um gráfico de barras ressaltando as causas das diversas ocorrências em uma linha de transmissão.

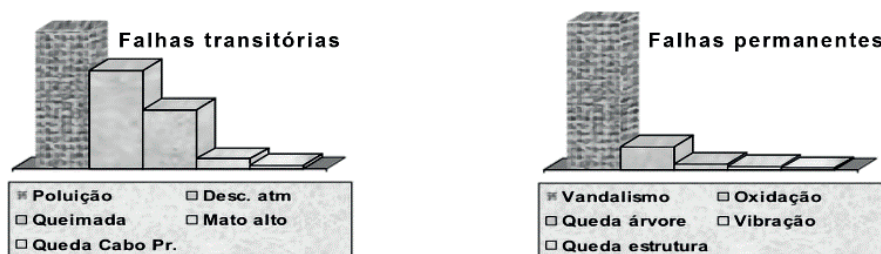


Figura 1.1 – Falhas em linhas de transmissão, por causa.

### 1.2.2 VIBRAÇÕES EÓLICAS

As vibrações eólicas são causadas por ventos transversais brandos (em torno de 2 m/s), os quais incidem sobre os condutores, que, quando submetidos a trações mecânicas superiores a 20% de suas cargas de rupturas, absorvem essas energias e transmitem-nas aos pontos de suspensão. Esses pontos podem ser gradativamente deteriorados por fadiga mecânica do material, requerendo cuidados especiais de montagem e monitoração.

A forma preditiva de atacar o problema direciona-se a identificar a presença do fenômeno, pela instalação de vibrógrafos, os quais necessitam permanecer na linha, registrando o fenômeno durante um período mínimo de 7 dias, diante do surgimento aleatório dele. Durante esses ensaios, são também registradas a temperatura ambiente, a velocidade do vento e a sua direção. O perfeito desempenho da linha quanto a vibrações eólicas estará assegurado a partir da identificação da ausência do fenômeno, mesmo tendo ocorrido ventos brandos transversais à linha de transmissão (1 a 6 m/s) e temperaturas baixas ( $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Existe instrumental totalmente direcionado a esta monitoração, utilizando recursos computacionais que permitem, inclusive, a predição da vida útil remanescente dos cabos condutores.

### 1.2.3 RESISTÊNCIA DE PÉ DE TORRE

A resistência de aterramento de estruturas (resistência de pé de torre) representa um parâmetro que responde diretamente pelo desempenho das linhas de transmissão quando submetidas a descargas atmosféricas. A medição dessas resistências deve ser

realizada periodicamente (no mínimo a cada 10 anos) ou se o desempenho da linha quanto a descargas atmosféricas estiver além dos padrões esperados.

#### 1.2.4 TEMPERATURA DE CONEXÕES

O aquecimento das conexões elétricas é um problema grave em um sistema de potência, diante de sua característica evolutiva que pode conduzir a dilatações que eliminam por completo os contatos elétricos necessários ao transporte de energia elétrica. Geralmente, é fruto de inadequação de materiais utilizados nessas conexões ou do projeto de fixação do conector ou, ainda, dos torques utilizados em sua fixação.

Convencionalmente, são utilizados termovisores para avaliar o “estado térmico” dessas conexões. Existem modelos que permitem a realização dos ensaios durante o dia, pela utilização interna de filtros solares, além de viabilizar essas inspeções por via aérea, incorporando facilidades como a gravação das imagens visuais e térmicas para posterior processamento digital.

#### 1.2.5 OXIDAÇÃO DE FERRAGENS

O processo degenerativo dos materiais componentes de uma linha de transmissão tem a oxidação das partes metálicas como uma das mais preocupantes, tendo em vista a redução gradativa de sua seção e de suportabilidade mecânica, com consequente risco de ruptura/queda de componentes que podem levar ao colapso no fornecimento de energia elétrica.

No que tange às partes aéreas, as inspeções minuciosas realizadas por técnico especializado ainda são a forma mais adequada de avaliar o estado das peças metálicas. Inspeções com drone vêm sendo introduzidas com bons resultados, não obstante as questões relacionadas com a autonomia do voo. Quanto às partes metálicas estruturais enterradas, procuram-se correlacionar medições eletroquímicas do solo com possíveis estados degenerativos sem a necessidade de proceder a dispendiosas escavações. Técnicas de análise de reflexões de sinais de alta frequência aplicadas a ferragens subterrâneas vêm sendo usadas experimentalmente em hastes de âncora de estruturas estaiadas (BEZERRA *et al.*, 2014).

#### 1.2.6 POLUIÇÃO EM ISOLADORES

A poluição de isoladores ocorre pela deposição de material contaminante, quer seja de origem industrial, marítima ou ambiental. Esses depósitos, junto com a presença de umidade e tensão elétrica mais elevada, propiciam o surgimento de descargas superficiais que podem evoluir para o fechamento de um arco de potência sobre a cadeia de isoladores e consequente interrupção no fornecimento de energia (Karaday, 1999).

Os processos de monitoração da contaminação dos isoladores mais utilizados são:

- inspeções noturnas;

- medição de ESDD (densidade equivalente de sal depositado);
- medição de corrente de fuga.

### 1.2.7 OXIDAÇÃO DE CONDUTORES

A oxidação em condutores ocorre nos tentos de alumínio próximo à alma de aço, após longos períodos de operação, e pode ser acelerada em decorrência da agressividade do meio ambiente (umidade, acidez etc.). A preocupação reside no enfraquecimento mecânico do condutor e na consequente ruptura.

Como método de monitoração, são utilizadas medições especiais que permitem aferir o estado dos tentos de alumínio próximos à alma de aço sem a necessidade de desligamento da linha. Pode-se, inclusive, inferir o tempo de vida útil remanescente do cabo condutor.

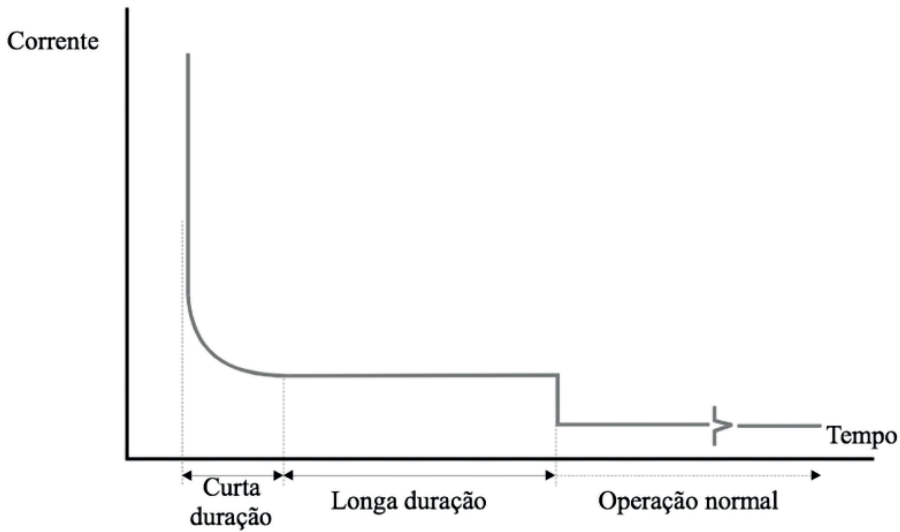
A medida para evitar esses problemas, principalmente em meios mais agressivos, tem sido a utilização de cabos condutores com alma de liga de alumínio, eliminando, dessa forma, a pilha galvânica existente entre o alumínio e o aço (SHANNON TECHNOLOGY, 1998).

### 1.2.8 ANÁLISE DE AMPACIDADE

A ampacidade de uma linha de transmissão está intrinsecamente relacionada com as distâncias verticais (*clearances*) condutor-solo. Representa um parâmetro fundamental na identificação da capacidade de carregamento elétrico de linhas de transmissão, no sentido de assegurar que os condutores, mesmo aquecidos pelo efeito Joule e ação do sol, não violem as condições de segurança estabelecidas em normas técnicas. A aferição dessas distâncias requer uma avaliação do comportamento eletromecânico da linha de transmissão, a partir do qual se possam identificar vãos críticos a serem corrigidos ou monitorados em condições de carregamento normal ou emergenciais.

Os modelos para cálculo dos limites operacionais de uma linha, no que tange à temperatura máxima que o condutor pode atingir sem violar as distâncias verticais, são aplicados quando do projeto e da construção da linha; entretanto, com o passar do tempo, requerem aferições específicas de campo no intuito de levantar e/ou comparar premissas adotadas que podem ter sido alteradas ou por interferências de terceiros ou por distorções ambientais presentes. Outra situação aferida é a possibilidade de incorreções no modelo adotado ou em critérios construtivos.

Por meio de instrumentações específicas, em levantamento de campo, é possível aferir as alturas dos condutores na ocasião do levantamento e inferir se essas alturas estão compatíveis com os critérios de segurança quando da operação da linha em seu limite térmico (BEZERRA; LIBERATO; EDUARDO, 1987). Essa metodologia permite expressar os limites operacionais em uma curva similar à apresentada na Figura 1.2.



**Figura 1.2** – Curva de carga de uma linha de transmissão.

A identificação de correções de altura a ser feita está diretamente associada à recuperação da ampacidade nominal da linha para que ela possa operar em seu limite térmico nominal (*refurbishment*), enquanto a busca de um perfil de alturas maiores do que as definidas no projeto da linha está associada ao aumento da ampacidade nominal, ou *uprate*, conforme definições anteriores.

Para proceder à aferição dos limites de carregamento de uma linha já em operação, os levantamentos de campo podem ser realizados de forma expedita e simplificada em relação aos processos tradicionais associados a levantamentos topográficos. Podem ser realizados quando de inspeções terrestres rotineiramente realizadas para aferir o estado da linha de transmissão. Os procedimentos ora descritos visam definir as diretrizes necessárias para estabelecer de forma padronizada e uniforme os limites de carregamento em linhas aéreas de transmissão.

Para subsidiar as simulações computacionais posteriores, devem ser levantadas, por vão e por fase, as seguintes informações: a menor distância vertical do condutor ao solo ou obstáculo; a menor distância vertical entre condutores, no caso de travessia linha-linha; a distância do vértice da catenária ao solo. Para cada um dos pontos levantados, devem ser medidas também as distâncias horizontais do ponto à estrutura mais próxima.

Os tipos de travessia devem ser identificados/codificados em consonância com o que estabelecem as normas técnicas (ABNT, 1986). A título de exemplo, na Tabela 1.1 é registrada a codificação já praticada (BEZERRA; LIBERATO; EDUARDO, 1987), (BEZERRA; RAMOS; RÉGIS JR., 1998):

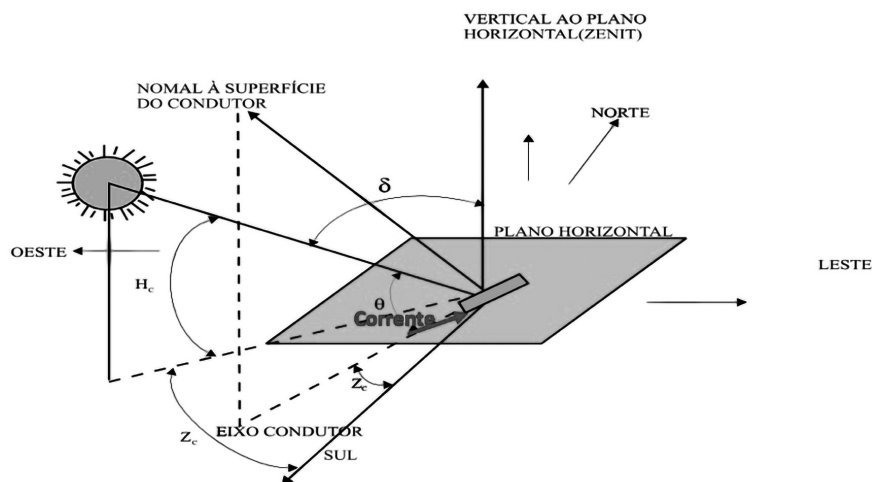
Tabela 1.1 – Exemplo de codificação de tipos de travessia

Código	Descrição
01	Locais acessíveis apenas a pedestres ou águas não navegáveis
02	Locais onde circulam máquinas agrícolas
03	Rodovias, ruas e avenidas
04	Ferrovias não eletrificadas
05	Ferrovias eletrificadas
06	Suporte de linhas pertencentes a ferrovias
07	Águas navegáveis
08	Linhas de energia elétrica
09	Linhas de telecomunicação
10	Telhados e terraços
11	Paredes, instalações transportadoras, veículos rodoviários e ferroviários e encostas

Quando do levantamento de campo, são necessários, ainda, os seguintes registros: data e hora em que o levantamento foi realizado; registro da temperatura ambiente; e registro da leitura da corrente de carga da linha quando do levantamento.

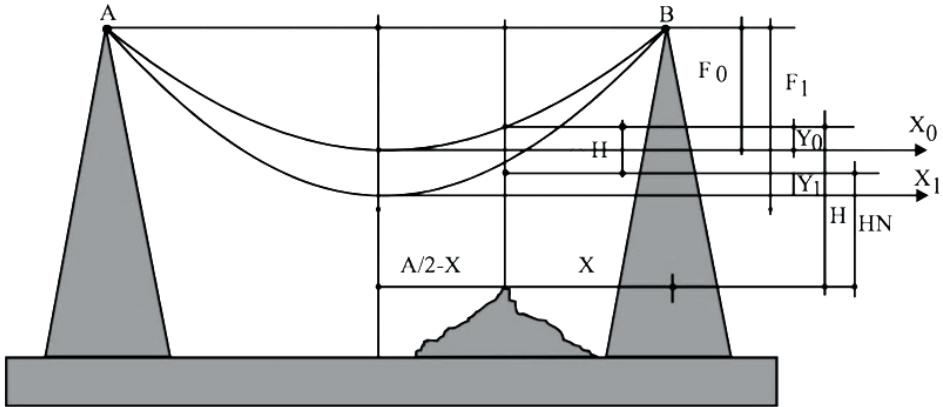
São necessários basicamente os seguintes equipamentos para a realização do levantamento de campo: vara telescópica; termômetro; trena; e relógio.

Os dados levantados permitem a utilização de modelos de cálculo da temperatura do cabo condutor, a qual depende das condições ambientais e operacionais reinantes (HOUSE; TURTLE, 1958; MORGAN, 1982; (IEEE, 2007), conforme ilustração contida na Figura 1.3. Ressalta-se que, mesmo com a disponibilidade de termovisores, a metodologia mantém o uso dos modelos de cálculo para inferir também a temperatura do cabo quando do levantamento de campo por dois motivos: minimização dos custos envolvidos; e a imprecisão da temperatura absoluta obtida por esses equipamentos, os quais são precisos na aferição de temperaturas referenciais (ponto observado em relação ao corpo adjacente).

Figura 1.3 – Ilustração posicionamento linha  $\times$  Sol.



A inferência de variações da altura dos condutores, nos pontos específicos levantados, é possível por meio de formulações tradicionais do comportamento mecânico de cabos condutores suportados em dois pontos (FUCHS; ALMEIDA, 2005), conforme ilustração contida na Figura 1.4.



**Figura 1.4** – Ilustração para cálculo das variações de altura em pontos específicos da linha.

Nesta figura, pode ser demonstrado que a variação de altura é obtida por (1.1).

$$\Delta H = F_1 - Y_1 - F_0 + Y_0 \quad (1.1)$$

em que:

$$Y_0 = \frac{P(a/2 - X)^2}{2T_{01}} \quad (1.2)$$

$$Y_1 = \frac{P(a/2 - X)^2}{2T_{02}} \quad (1.3)$$

$$F_0 = \frac{P \cdot a^2}{8T_{01}} \quad (1.4)$$

$$F_1 = \frac{P \cdot a^2}{8T_{02}} \quad (1.5)$$

$X$  = distância do ponto crítico do vão à estrutura mais próxima em m;

$\theta_1$  = temperatura inicial do condutor em °C;

$\theta_2$  = temperatura final do condutor em °C;

$a$  = vão da LT em m;

$P$  = peso condutor por unidade de comprimento em Kgf/m;

$T_{01}$  = tensão de esticamento em Kgf à temperatura  $\theta_1$  em °C;

$T_{O_2}$  = tensão de esticamento em Kgf à nova temperatura  $\theta_2$  em °C;

Para o cálculo dos novos valores da tração após a dilatação térmica do condutor, é utilizada a “equação de mudança de estado” dada por (1.6).

$$T_{O_2}^3 + T_{O_2}^2 \left\{ \frac{S \cdot E \cdot P_1^2 \cdot A^2}{24 \cdot T_{O_1}^2} + E \cdot S \left[ \varepsilon + - (, 2 -, , 1 ) \right] - T_{O_1} \right\} = \frac{E \cdot S \cdot P_2^2 \cdot A^2}{24} \quad (1.6)$$

em que:

$T_{O_1}$  = tensão de esticamento em Kgf à temperatura  $\theta_1$  em °C;

$T_{O_2}$  = tensão de esticamento em Kgf à nova temperatura  $\theta_2$  em °C;

$$P_2 = \sqrt{P_1^2 + F_v^2};$$

$$F_v = 0,047 \cdot v^2 \cdot d;$$

$v$  = velocidade do vento em m/s;

$d$  = diâmetro do condutor em m;

$S$  = área total da seção do cabo em m<sup>2</sup>;

$P_1$  = peso unitário do cabo em Kgf/m;

$A$  = vão básico da LT em m;

$E$  = módulo de elasticidade em Kgf/mm<sup>2</sup>;

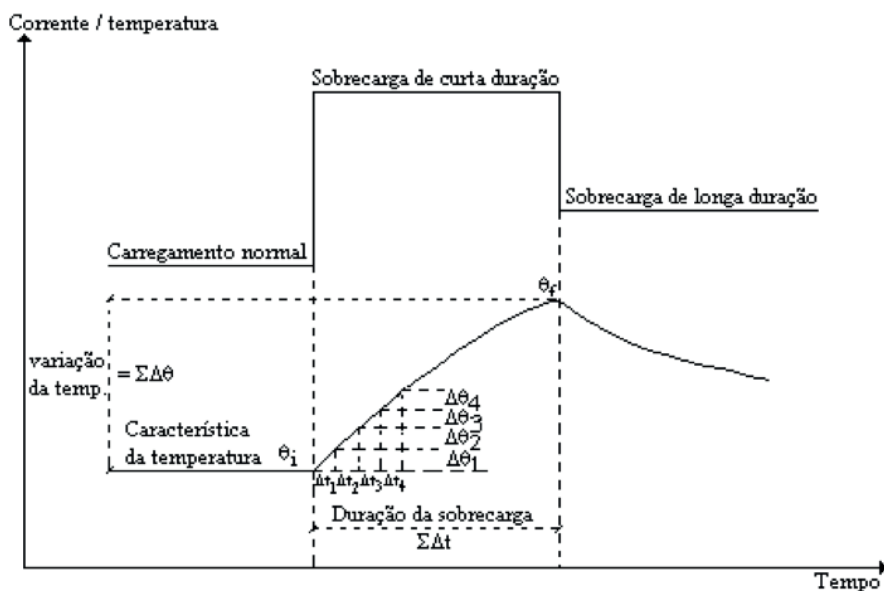
$\varepsilon$  = alongamento calculado em m/m;

$\alpha$  = coeficiente de dilatação térmica do material em 1/°C;

$P_2$  = peso virtual do cabo (com vento) em Kgf/m – na ausência de vento  $P_2 = P_1$ ;

$F_v$  = esforço do vento transversal ao condutor em Kgf/m.

Já para o carregamento de curta duração, condição temporária associada à necessidade de operações especiais de remanejamento de cargas, quando da perda de algum componente do sistema de potência, há de se considerar que a temperatura do condutor não sobe instantaneamente. Existe toda uma dinâmica, a qual viabiliza a aplicação de sobrecargas específicas em intervalos de tempo determinados (DAVISON *et al.*, 1969), conforme ilustração registrada na Figura 1.5.



**Figura 1.5** – Variação da temperatura do condutor em função da duração da sobrecarga.

Os cálculos associados às diversas alturas dos condutores, para cada regime de operação, na condição de limite térmico da linha, são realizados por meio de algoritmo computacional similar ao ilustrado na Figura 1.6.

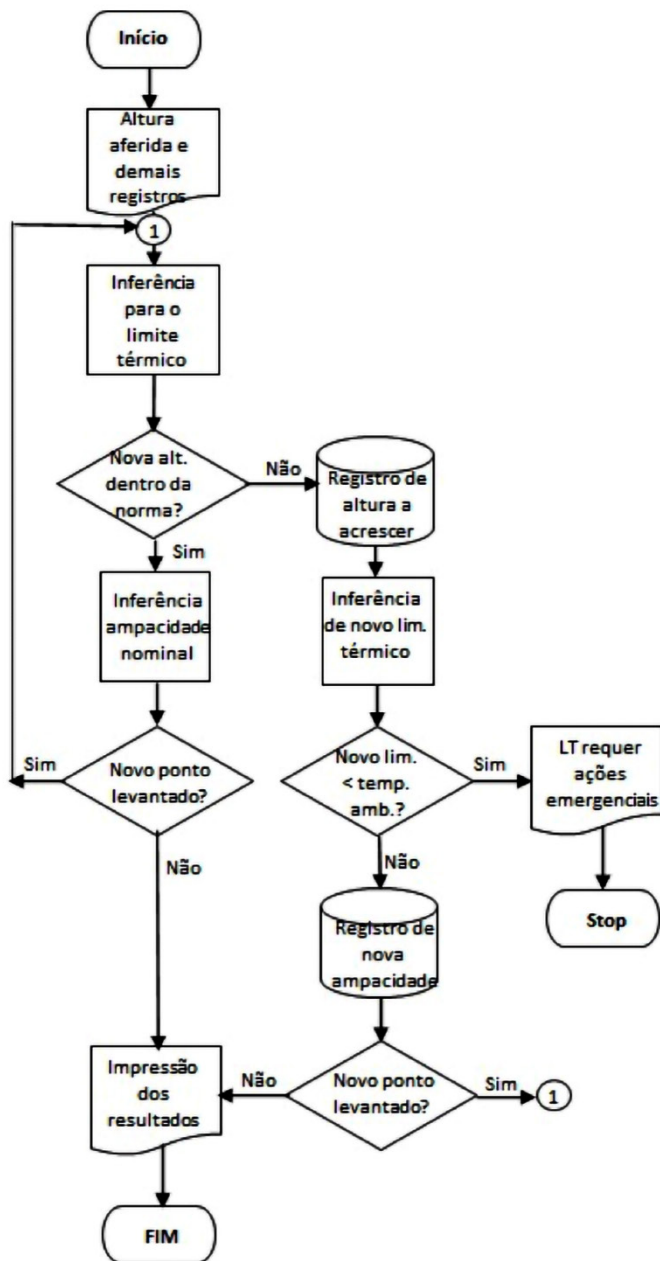


Figura 1.6 – Algoritmo computacional – cálculo da ampacidade.

As saídas dos resultados seriam do tipo ilustrados nas Tabelas 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5, nas quais são identificados os vãos de frente das estruturas que violam as alturas de segurança normatizadas e a ampacidade da linha, em conformidade com o regime operacional, em sua condição nominal e eventual restrição temporária.

Tabela 1.2 – Simulação de carregamento em linha de transmissão

SITUAÇÃO DA LT PARA O CARREGAMENTO EM CONDIÇÕES NORMAIS DIURNA E NOTURNA																
LT AGL-MSI-04M7																
ESTRU	VAO	CODIGO TRAVESSIA	HORA	TEMP AMB.	ALTURAS MEDIDAS			DIST. EST. M/ PROX			CORRENT MEDIDA	CRUZ LT	ALT. MAST	ALTURA PARA LIM. TERMICO		
					A	B	C	A	B	C				A	B	C
I042/2	361.0	14	11	29.0	5.0	5.0	5.0	137.0	137.0	137.0	360.0	230	.0	4.4	4.4	4.4
I042/2	361.0	3	11	29.0	11.0	11.0	11.0	137.0	137.0	137.0	360.0	0	.0	10.4	10.4	10.4
I043/2	399.0	3	15	37.0	11.2	11.2	11.2	145.0	145.0	145.0	320.0	0	.0	10.7	10.7	10.7
I043/3	260.0	2	15	38.0	8.6	8.6	8.6	84.0	84.0	84.0	320.0	0	.0	8.4	8.4	8.4
I043/3	260.0	14	15	38.0	9.7	9.7	9.7	59.0	59.0	59.0	320.0	230	.0	9.5	9.5	9.5
I043/4	260.0	2	15	30.0	10.5	10.5	10.5	85.0	85.0	85.0	370.0	0	.0	10.2	10.2	10.2
I043/4	260.0	14	15	30.0	4.4	4.4	4.4	85.0	85.0	85.0	370.0	230	.0	4.1	4.1	4.1
I044/1	315.0	1	16	37.0	9.0	9.0	9.0	150.0	150.0	150.0	320.0	0	.0	8.6	8.6	8.6
I044/3	335.0	1	16	35.0	7.3	7.3	7.3	166.0	166.0	166.0	320.0	0	.0	6.8	6.8	6.8
I045/1	362.0	1	9	33.0	7.2	7.2	7.2	132.0	132.0	132.0	320.0	0	.0	6.7	6.7	6.7

Tabela 1.3 – Limites operacionais

```

*****
*
* CONDIÇÕES LIMITANTES PARA OPERAÇÃO NORMAL
* -----
*
* TEMPERATURA DO CONDUTOR PARA ATENDER A NBR-5422 = 46.0
*
* CORRENTE DIURNA = 217.0
*
* CORRENTE NOTURNA = 586.4
*
* LIMITE TERMICO DA LT = 60.0
*
* CORRENTE PARA O LIMITE TERMICO DIURNO = 583.1
*
* CORRENTE PARA O LIMITE TERMICO NOTURNO = 788.8
*
* CONDIÇÕES LIMITANTES PARA OPERAÇÃO DE EMERGENCIA
* -----
*
* TEMPERATURA DO CONDUTOR PARA ATENDER A NBR-5422 = 51.0
*
* CORRENTE DIURNA = 392.5
*
* CORRENTE NOTURNA = 667.4
*
*****

```

OBSERVAÇÃO - A LT SE ENCONTRA FORA DE NORMA.  
FAVOR CONSULTAR LISTAGEM DE ALTURAS A ACRESCEER

**Tabela 1.4 – Restrições verificadas**

RELACAO DAS ALTURAS NECESARIAS A ACRESCECER AOS CONDUTORES NOS DIVERSOS PONTOS CRITICOS OBSERVADOS PARA RESTABELECECER A LT AGL-MSI-04M7 AS CONDICOOES NORMAIS DE OPERACAO								
NUM. ESTR.	SITUACAO ATUAL H. NORM.	PARA O LIMITE TERMICO			ACRESCECIMO DE ALTURA			TIPO DE TRAVESSIA
		FASE A	FASE B	FASE C	FASE A	FASE B	FASE C	
004/1	6.5	6.1	6.1	6.1	.4	.4	.4	ACESSO APENAS A PEDESTRES
004/2	6.5	4.5	7.0	7.0	2.0	-.5	-.5	ACESSO APENAS A PEDESTRES
007/1	6.5	5.1	6.2	6.2	1.4	.3	.3	ACESSO APENAS A PEDESTRES
018/1	6.5	6.1	6.6	6.6	.4	-.1	-.1	ACESSO APENAS A PEDESTRES
021/2	6.5	6.1	6.1	6.1	.4	.4	.4	ACESSO APENAS A PEDESTRES

Observação: valores negativos indicam que a altura está com folga.

**Tabela 1.5 – Contingências de curta duração**

LT AGL-MSI-04M7 TEMP. INICIAL DO CONDUTOR 46.0 TEMP. FINAL DO CONDUTOR 51.0				
VELOCIDADE DO VENTO 1.0		TEMPERATURA AMBIENTE 30.0		
CONDICOOES DIURNAS		CONDICOOES NOTURNAS		
TEMPO MAXIMO (MIN.)	CORRENTE LIMITE (A)	TEMPO MAXIMO (MIN.)	CORRENTE LIMITE (A)	
5	597.0	5	806.4	
10	477.0	10	726.4	
15	437.0	15	696.4	
20	407.0	20	676.4	
25	397.0	25	676.4	
30	387.0	30	666.4	

Essas tabelas viabilizam a montagem da curva de carregamento ilustrada na Figura 1.2. Há de se ressaltar que são procedimentos que incorporam facilidade/dinâmica a um baixo custo, não obstante, inclusive, o aproveitamento que se faz das inspeções periodicamente realizadas nas linhas. Entretanto, aferições mais precisas requereriam levantamentos topográficos com todo o requinte tecnológico envolvido, porém a um custo bem superior. Todavia, mesmo na aplicação da metodologia simplificada, quando da identificação de restrições, se faz necessário acionar levantamentos topográficos com o intuito de se projetar com precisão a melhor solução para as violações pontuais encontradas.

Nos capítulos a seguir, serão abordadas diversas técnicas voltadas tanto para a correção da ampacidade como para o aumento dessa característica. As técnicas são denominadas “recondutoramento”, “relocação de estruturas”, “inserção de condutor”, “retracionamento” e “tramo misto”, as quais serão abordadas em capítulos específicos a seguir.

Por fim, é importante ressaltar que as ações de recapacitação devem ser precedidas do levantamento do estado da instalação para que o investimento a ser feito considere também eventual recuperação desse estado a níveis compatíveis com a linha devidamente recapacitada, não apenas repotencializada. Esse enfoque é importante, pois a linha repotencializada sem a recuperação do seu estado operacional aumentará o indicador relacionado ao DEC, uma vez que atenderá a uma quantidade de consumidores maior e/ou a uma demanda de energia elétrica em um patamar mais elevado. A definição quanto a recapacitar é, portanto, uma escolha entre custo e benefício, enfatizando os aspectos de preservação dos níveis de confiabilidade e disponibilidade desejáveis.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. *Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica* – Procedimento. NBR-5422. 1986.
- BEZERRA, J. M. B.; LIBERATO, J. A. L.; EDUARDO, J. V. Aplicação de processos semi-probabilísticos na definição de limites de carregamento de LTS em condições normais e de emergência. *In: IX SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 1987, Belo Horizonte. *Anais do IX-SNPTEE-GLT*, 1987.
- BEZERRA, J. M. B.; RAMOS, F.; RÉGIS JR., O. Refurbishment of transmission lines, costs and benefits, economic decision. *In: CEPSE – CONFERENCE ON ELECTRIC POWER SUPPLY INDUSTRY*, 12., 1998, Nonthaburi, 1998.
- BEZERRA, J. M. B.; Regis, O.; Amaral, W. *Limites de carregamento de linhas de transmissão. definição e expansão*. [S. l.]: UFPE, 1998. (Curso de Extensão Universitária).
- BEZERRA J. M. B. Diagnóstico de linhas de transmissão com vistas a implementação do processo de recapacitação. *In: ENEAT*, 2., Campina Grande/PB. 2000.
- BEZERRA, J. M. B *et al.* Location and diagnosis of stay rod of V guyed towers corrosion. *In: ICHVE*, Poznan, Poland, 2014.
- CIGRÉ. The thermal behaviour of overhead conductors. Section 1 and 2: mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and the application thereof. *Electra*, n. 144, p. 107-125, out. 1992.
- CIGRÉ. Management of Existing Overhead Transmission Lines. [S. l.], 2000. (Brochura Técnica, 175).
- DAVISON, G. *et al.* Short-time thermal rating for bare Overhead conductors. *IEEE Transactions PAS-88*, n. 3, , p. 194-199, Mar. 1969.
- ELGERD, O. I. *Electric energy systems theory: an introduction*. New York: McGraw-Hill, 1971.
- FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T.. *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. Itajubá: Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2005.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de energia elétrica*. Uberlândia: Editora Edufu, 2015.

- HOUSE, H. E.; TUTTLE, P. D. Current-carrying capacity of ACSR. Power apparatus and systems, part III. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 77, n. 3, p. 1169-1173, abr. 1958.
- IEEE. The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms. IEEE Std 100. [S. l.: s. n.], 1996.
- IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors, IEEE Std 738-2006 (Revision of IEEE Std 738-1993). [S. l.: s. n.], 2007.
- KARADAY, G. G. Flashover mechanism of non-ceramic insulators. *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, 1999.
- MORGAN, V. T. The thermal rating of overhead-line conductors part I: The steady-state thermal model. *Electric Power Systems Research*, n. 5, p. 119-139, 1982.
- SHANNON TECHNOLOGY. Conductor Corrosion Assessment Services. Home page da Shannon Technology. Canadá, 1998.



**Em um sistema de potência, as distâncias entre a fonte de geração e os centros de consumo nem sempre são pequenas, fazendo-se necessárias linhas de transmissão extensas e de elevadas classes de tensão.**

O passar dos anos leva as linhas concebidas à superação dos seus limites operacionais. A constatação desse estado conduz os planejadores a optar ou pela expansão do sistema ou por buscar tecnologias que permitam aumentar a capacidade das linhas em operação.

Esse livro explora tais tecnologias, produzindo procedimentos factíveis e competitivos em relação ao projeto e construção de uma nova linha de transmissão, minimizando, inclusive, os impactos ambientais advindos de uma obra nova.



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

**Blucher**



Clique aqui e:

**VEJA NA LOJA**

## **Recapacitação de linhas aéreas de transmissão** Desenvolvimento sustentável do sistema elétrico

---

**José Maurício de Barros Bezerra,  
Alexsandro Aleixo Pereira da Silva, Lígia Verônica Genésio Pessoa,  
Juliana Maciel Maia Beça, Jonatan Esaú Mejia Quijada**

ISBN: 9786555064186

Páginas: 224

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2022

---