



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEXSANDRO ALEIXO PEREIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE MODELO PARA RECAPACITAÇÃO
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE TRAMOS MISTOS**

Recife

2020

ALEXSANDRO ALEIXO PEREIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE MODELO PARA RECAPACITAÇÃO
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE TRAMOS MISTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586d	<p>Silva, Alexsandro Aleixo Pereira da. Desenvolvimento e validação de modelo para recapacitação de linhas de transmissão através de tramos mistos / Alexsandro Aleixo Pereira da Silva. - 2020. 107 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020. Inclui Referências e Anexo.</p> <p>1. Engenharia Elétrica. 2. Linha de transmissão. 3. Recapacitação. 4. Condutor Especial. 5. Tramos Mistos. I. Bezerra, José Maurício de Barros (Orientador). II. Título</p> <p style="text-align: right;">UFPE</p> <p>621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2021-56</p>
-------	---

ALEXSANDRO ALEIXO PEREIRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE MODELO PARA RECAPACITAÇÃO
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ATRAVÉS DE TRAMOS MISTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 30/11/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra (Orientador e Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Geraldo Leite Torres (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Antônio Vasconcelos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Edson Guedes da Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

A minha avó, Maria Isaura (*in memoriam*), e aos meus pais, Elizabete Pereira e Aleixo Miranda, com muito amor.

AGRADECIMENTOS

O doutorado pode ser considerado uma verdadeira odisséia acadêmica: grandes desafios, mil tormentos e muita abnegação. O apoio dos familiares, amigos e colegas é essencial para chegar ao fim desta jornada. Agradeço imensamente a orientação do professor José Maurício de Barros Bezerra, que continua sendo para mim a medida do que um ser humano pode ser. Sem suas cobranças, conselhos, dedicação e insistência este trabalho não teria sido finalizado. Sou imensamente grato por sua disponibilidade, atenção, confiança, grande paciência e amizade.

Agradeço aos meus pais, Elizabete Pereira e Aleixo Miranda, pelo constante incentivo, exemplo e conselhos que me guiam até hoje. Agradeço também a meu irmão e minha cunhada, Anderson e Graciela, pelo apoio, assim como a todos os membros do clã Pereira, principalmente a meu tio Antônio e minhas tias Arlinda, Genilda e Nena.

A Andréa Tenório, Veleida Freitas, Adriana Carla, Alessandro Omena e Nádia Rodrigues pelo apoio e sábios conselhos (mais certos impossíveis).

Aos grandes amigos Priscila Amorim, Anderson Lopes, David Florêncio, Massíria Costa, Emmanuela Nascimento, Fernanda Encarnação, Jefferson Santana, Ayrlw Carvalho, Maherbson Carvalho, Viviane Moraes, Samuel Honorato, Carlos Henrique, Sandro Bezerra, Rafael Coelho, Ricardo Bezerra, Max Luan, Dimas Pereira, Anderson Correia, Bruno da Silva, Wirques Araujo e Márcia Lima pela constante torcida e motivação.

Ao trio de gigantes que acenderam o candieiro em momentos tão tenebrosos, suavizaram e alegraram um caminho tão tortuosos: Janaina Santana, Riccelly Guimarães e Cláudia Fidélis. E ao trio de loucos que partilharam as desventuras da docência e grandes sonhos: Jobson Nascimento, Regina Lima e José Moraes. Agradeço também aos membros do GPTD pelo companheirismo, especialmente a Suelen Holder.

A aplicação em campo da técnica só foi possível graças ao total apoio, confiança, comprometimento e dedicação da equipe da Eletrobrás Alagoas, empresa atualmente pertencente ao grupo Equatorial. Agradeço principalmente a José Caetano, Elvio Ferreira, José Gonçalves, Gonçalves Lima, Edimilson Santos, Krystyanny Cavalcanti, Cícero Viana e Edinaldo Oliveira. Sou grato também a Hugo Tabosa pelo zelo e ensinamentos compartilhados, a Marcel Ferreira (que é um dos melhores exemplares de ser humano) pelos conselhos e imensa generosidade, a Ederaldo Pereira (do qual tive a honra de ser estagiário) pela receptividade e

contínuo aprendizado, a Amaro Saldanha e Diego Souza pela parceria e companherismo. Agradeço imensante a estes cinco pelo acolhimento e cuidado.

Agradeço também aos professores que compuseram a banca examinadora por suas contribuições para o aprimoramento desta tese e sugestões instigantes de trabalhos futuros. Principalmente ao professor Edson Guedes pelo alerta sobre o canto das sereias. A todos que de alguma forma ajudaram fica minha gratidão.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento, aprimoramento e validação de um modelo para cálculo das trações, flechas e temperatura de *knee point* em uma seção de tensionamento com cabos diferentes em vãos nivelados ou desnivelados, iguais ou desiguais a qualquer temperatura, incluindo também situações em que a temperatura do condutor varia ao longo do tramo. A partir deste modelo foi possível aplicar a técnica denominada “Tramos Mistos”, a qual permite resolver diversos problemas de alturas de condutores, representando uma alternativa bastante promissora para solucionar demandas crescentes de recapacitação de linhas aéreas de transmissão. Porém, possui com restrição o peso do condutor e o número de vãos no tramo. A técnica foi testada em uma linha de 69 kV do sistema de distribuição da Eletrobras Alagoas (atualmente pertencente ao grupo Equatorial), localizada entre os municípios de Rio Largo e Pilar, no estado de Alagoas, Brasil, e continua em operação até a data presente. Os estudos de caso demonstraram significativa competitividade econômica, quando comparado com soluções convencionais. Com a aplicação da técnica foi obtido uma redução de até 85% dos custos totais para correção das violações quando comparadas as técnicas de recondutoramento e retensionamento. A modelagem desenvolvida representa uma contribuição significativa de baixo custo para a recapacitação de linhas de transmissão, como também a postergação de novas obras.

Palavras-chave: Linha de transmissão. Recapacitação. Condutor Especial. Tramos Mistos.

ABSTRACT

In this work is presented the development, improvement and validation of a model for calculating the traction, sags and knee point temperatures tension section with different cables in spans at same levels and different levels, equal or unequal lengths and at any temperature, including situation where the cable temperature vary in all tension section. Based on this model, it was possible to apply the technique called “Mixed sections”, which allows to solve several problems of clearances, representing a very promising alternative to solve the growing demands for uprating of overhead transmission lines. The technique was tested on a 69 kV line of the Eletrobras Alagoas distribution system, located between the municipalities of Rio Largo and Pilar, in the state of Alagoas, Brazil, and remains in operation until the present date. The case studies have demonstrated significant economic competitiveness when compared to conventional solutions. With the application of the technique, a reduction of up to 85% of the total costs for correcting violations was obtained when comparing the techniques of re-conducting and retensioning. The modeling developed represents a significant contribution to the upgrading of transmission lines at low cost, as well as the postponement of new works.

Keywords: Transmission line. Uprating. HTLS conductor. Mixed sections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trechos de uma linha de transmissão: antes e após substituição e relocação de uma estrutura para recapacitação	27
Figura 2 – Conversão de duas cadeias de isoladores de suspensão em uma cadeia de falsa amarração	30
Figura 3 – Fotografia do arranjo de pesos adicionais aplicados a uma linha de 138 kV para reduzir os ângulos de balanço após substituição do condutor CAA Partridge 266,8 MCM pelo condutor CAL Butte 321,8 MCM de peso inferior	32
Figura 4 – Alma de compósito após o furto de cabos	33
Figura 5 – Alma do cabo ACCC após furto do alumínio que compõe a coroa.....	34
Figura 6 – Diagrama tensão deformação de um condutor homogêneo	35
Figura 7 – Diagrama tensão deformação de um condutor não-homogêneo	36
Figura 8 – Variação da flecha com a temperatura.....	37
Figura 9 – Variação da temperatura de knee point com o comprimento do vão para o CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à 3517 kgf sob temperatura de 15 °C.....	41
Figura 10 – Variação da temperatura de <i>knee point</i> com o comprimento do vão para o condutor CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à 3517 kgf sob diferentes temperaturas ...	42
Figura 11 – Variação da temperatura de <i>knee point</i> com o comprimento do vão para o condutor CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à diferentes trações sob temperatura de 15 °C.....	42
Figura 12 – Conversão de uma cadeia de isoladores de suspensão em uma cadeia de falsa amarração	49
Figura 13 – Forças atuantes em uma cadeia de isoladores de suspensão e deslocamento horizontal e vertical da sua posição de equilíbrio inicial.	50
Figura 14 – Diagrama simplificado do algoritmo desenvolvido	57
Figura 15 – Tramo de uma linha de transmissão com violação das distâncias de segurança em vãos consecutivos	67
Figura 16 – Tramo de uma linha de transmissão onde foram instalados condutores especiais ou de bitolas diferentes (em azul) para correção das violações das distâncias de segurança	67
Figura 17 – Mapa eletrogeográfico	69
Figura 18 – Vara de manobra telescópica de medição	70
Figura 19 – Medidor de altura do condutor por ultrassom.....	70
Figura 20 – Estação meteorológica	72

Figura 21 – Anemômetro da estação meteorológica	72
Figura 22 – Vibrográfo instalado na linha Rio Largo - Pilar.....	73
Figura 23 – Sensor de Monitoração de Altura (SMT) instalado na LT Rio Largo - Pilar	73
Figura 24 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido à mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CA Tulip.....	76
Figura 25 – Variação da ampacidade com a temperatura do condutor	77
Figura 26 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido à mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CA Tulip e ACCC Partridge.....	78
Figura 27 – Estrutura 8/3 da linha de distribuição Rio Largo-Pilar	79
Figura 28 – Trecho da linha de distribuição Rio Largo-Pilar (à esquerda).....	80
Figura 29 – Invasão sob a linha de distribuição Rio Largo-Pilar	80
Figura 30 – Tramo da linha Rio Largo Pilar escolhido para aplicação da técnica de correção das distâncias de segurança.....	85
Figura 31 – Vãos escolhido para aplicação da técnica de correção das distâncias de segurança	85
Figura 32 – Variação da ampacidade em função da temperatura do condutor.....	86
Figura 33 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CAA Penguin e CAA Pigeon	87
Figura 34 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CAA Penguin e CAA Quail	88
Figura 35 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CAA Penguin e T-CAA Raven	88
Figura 36 – Montagem das cadeias de isoladores	89
Figura 37 – Lançamento do condutor para posterior fixação.....	90
Figura 38 – Cadeia do final do tramo já montada	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comportamento da probabilidade, consequência e risco de falha, componentes afetados e as características elétricas envolvidas na aplicação de algumas técnicas de recapacitação	21
Tabela 2 – Casos de reisolamento	28
Tabela 3 – Hipotéses de carregamento	29
Tabela 4 – Revisão bibliográfica sobre os métodos de cálculo de flecha e tração em linhas de transmissão	47
Tabela 5 – Flechas do condutor Lawping à temperatura de 100°C em 10 vãos contínuos obtidos por (DWIGHT, 1926), (MOTLIS, 1999), (SILVA FILHO, 2003) e pelo algoritmo desenvolvido	58
Tabela 6 – Tração horizontal em vãos desiguais e nivelados.....	59
Tabela 7 – Tração horizontal em vãos desiguais e desnivelados	60
Tabela 8 – Temperatura de <i>knee point</i> para vãos nivelados para o cabo T-CAA Grosbeak....	63
Tabela 9 – Temperatura de <i>knee point</i> para vãos desnivelados para o cabo T-CAA Grosbeak	64
Tabela 10 – Temperatura de <i>knee point</i> para vãos desnivelados para o cabo ACCR 636	65
Tabela 11 – Características das LTs Tabuleiro dos Martins – Benedito Bentes e Rio Largo - Pilar.....	68
Tabela 12 – Dados dos tramos com violação das distâncias de segurança	75
Tabela 13 – Condições para cálculo de ampacidade	76
Tabela 14 – Correções necessárias para viabilizar a operação da linha a 75° C.....	78
Tabela 15 – Dados do levantamento simplificado	82
Tabela 16 – Dados dos tramos com violação das distâncias de segurança	83
Tabela 17 – Dados das estruturas do trecho da LT 69 kV Rio Largo – Pilar escolhido para correção das distâncias de segurança.....	84
Tabela 18 – Dados das estruturas do trecho da LT 69 kV Rio Largo – Pilar escolhido para correção das distâncias de segurança.....	84
Tabela 19 – Dados das estruturas do trecho da LT 69 kV Rio Largo – Pilar escolhido para correção das distâncias de segurança.....	87
Tabela 20 – Dados do tramos analisado considerando o retracionamento e recondutoramento	92
Tabela 21 – Variação na altura do condutor CAL Alliance	92

Tabela 22 – Avaliação econômica da Técnica dos Tramos mistos e recondutoramento	93
Tabela 23 – Avaliação econômica da Técnica dos Tramos mistos	93
Tabela 24 – Avaliação econômica da Técnica dos Tramos mistos e recondutoramento	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACCC	Aluminum Conductor Composite Core
ACCR	Aluminum Conductor Composite Reinforced
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Cabo de Alumínio-liga
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CTC	Composite Technology Corporation
EDS	<i>Every Day Stress</i>
FEX	Feixe Expandido
IACS	Internacional Annealed Copper Standard
IEC	International Electrotechnical Commission
LPNE	Linha de Potência Natural Elevada
LT	Linha de Transmissão
SICALT	Simulação de Carregamento em Linhas de Transmissão
T-CAA	Cabo de Alumínio Termorresistente com Alma de Aço
TTM	Técnica dos Tramos mistos

LISTA DE SÍMBOLOS

a	comprimento do vão [m]
a_r	comprimento do vão regulador [m]
C_i	custos do i -ésimo ano [R\$]
c_i	comprimento do condutor no i -ésimo vão [m]
$Cons_i$	consequências financeiras
D_i	custo determinístico
E_c	módulo de elasticidade do condutor [kgf/mm ²]
f	flecha do condutor [m]
G_k	esforço vertical no ponto de suspensão dos condutores [kgf]
h_y	desnível do vão [m]
H	tração horizontal no condutor [kgf]
H_g	altitude do condutor [m]
J_k	peso da cadeia de isoladores do i -ésimo suporte [kgf]
L	comprimento do condutor [m];
L_k	comprimento da cadeia de isoladores [m]
m_{cg}	peso do condutor por unidade de comprimento [kgf/m]
N	período de investimento levado em consideração [anos]
p_i	peso do condutor por unidade de comprimento relativo ao i -ésimo vão [kgf/m]
$prob_i$	probabilidade de falha da LT
R_i	custo probabilístico
S	seção transversal do condutor [mm ²]
S_x	tração no condutor [kgf]
\bar{S}	tração média do condutor [kgf]
t_j	taxa de juros;
T_a	temperatura ambiente [°C]
T_c	temperatura do condutor [°C]
T_{cx}	temperatura do condutor x [°C]
T_m	temperatura média do condutor [°C]
T_{med}	temperatura média da função densidade de probabilidade [°C]
T_{min}	temperatura mínima do condutor [°C]

T_{ref}	temperatura de referência do condutor [°C]
T_1	temperatura mínima do condutor para a qual a resistência ca é especificada [°C]
T_2	temperatura máxima do condutor para a qual a resistência ca é especificada [°C]
V	velocidade do vento [m/s]
V_x	componente vertical da tração S_x [kgf]
VPL	valor líquido presente dos gastos anuais
X_i	razão entre a tração horizontal do condutor na condição final e inicial
α_t	coeficiente de variação da resistência com a temperatura para uma determinada temperatura de referência [°C ⁻¹]
δ_i	deslocamento horizontal do i-ésimo suporte [m]
ε	coeficiente de emissividade
ε_i	deslocamento vertical do i-ésimo suporte [m]
ε_t	coeficiente de dilatação térmica linear do condutor [°C ⁻¹]
Δa	variação no comprimento do vão [m]
Δh	variação no desnível do vão [m]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 MOTIVAÇÃO	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.3 CONTRIBUIÇÕES	22
1.4 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TEMA DO TRABALHO	23
1.4.1 Periódicos	23
1.4.2 Anais de congressos.....	24
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	26
2.1 ALTERAÇÃO NAS ESTRUTURAS.....	26
2.2 REISOLAMENTO	27
2.3 RETRACIONAMENTO	28
2.4 TRANSFORMAÇÃO DA CADEIA DE SUSPENSÃO EM FALSA AMARRAÇÃO	29
2.5 LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA.....	30
2.6 RECONDUTORAMENTO	31
2.7 CÁLCULO DA TEMPERATURA DE <i>KNEE POINT</i>	34
2.7.1 Cálculo da temperatura de <i>knee point</i> para vãos isolados e contínuos	37
2.8 CONSIDERAÇÕES GERAIS	42
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	43
4 MODELOS PROPOSTOS.....	48
4.1 EQUAÇÃO GERAL DE MUDANÇA DE ESTADO PARA CÁLCULO DAS FLECHAS E TRAÇÕES.....	49
4.1.1 Validação do algoritmo	56
4.1.2 Cálculo da temperatura de <i>knee point</i> para tramos mistos	60
4.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS	65
5 MATERIAL E MÉTODOS	67
5.1 ESTUDO DE CASOS	68
5.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO SIMPLIFICADO	69

5.3	MONITORAÇÃO DOS DADOS APÓS APLICAÇÃO DA TÉCNICA DOS TRAMOS MISTOS	71
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
6.1	CASO 1: PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DA LT TABULEIRO DOS MARTINS- BENEDITO BENTES	74
6.2	CASO 2: PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DA LT RIO LARGO – PILAR..	79
6.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	91
7	CONCLUSÃO	95
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS.....	97
	ANEXO A – CABOS UTILIZADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	103

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda associado ao custo de novas faixas de servidão tem impulsionado as empresas do setor elétrico a buscar alternativas à construção de novas linhas de transmissão utilizando as instalações em operação. Diante das diversas possibilidades, cabe ao gestor de Linhas de Transmissão (LTs) definir qual técnica utilizar, o momento mais adequado para a sua implementação ou até mesmo optar pela desativação da linha.

Durante muito tempo esse tipo de decisão foi baseada no julgamento qualitativo de especialistas. As linhas de transmissão também eram tratadas como se possuíssem condições plenas de desempenhar eternamente seu papel nominal, no que tange às suas capacidades de condução e níveis de confiabilidade. Por exemplo, no caso de repotencialização não era realizada uma avaliação do estado operacional da LT, o que acarretava um aumento considerável nos valores dos índices que medem a duração de energia interrompida, uma vez que a LT passa a transmitir maiores blocos de energia para as mesmas taxas de falhas e tempos médios de interrupção (BEZERRA, 1998a).

Uma forma de apoiar quantitativamente esse processo decisório, considerando o estado operacional da LT, é a utilização do modelo de risco técnico-econômico segundo o qual o principal objetivo do planejamento estratégico de LTs é minimizar o valor presente líquido dos custos anuais sob um determinado período de investimento (TB175, 2000). Ou seja, minimizar a equação (1.1)

$$VPL = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1 + t_j)^i} \quad (1.1)$$

Em que:

VPL valor presente líquido dos gastos anuais [R\$/ano];

N período de investimento [anos];

t_j taxa de juros;

C_i custos do i -ésimo ano [R\$].

O custo anual, calculado através da equação (1.2), é constituído por duas parcelas: uma de caráter determinístico (D_i) e outra propabilístico (R_i). A primeira corresponde aos custos

planejados com operação normal, manutenção, saídas ou intervenções planejadas e investimentos. Seu valor e data de ocorrência são conhecidos. A segunda parcela, também denominada risco monetário, é um artifício matemático definido como a probabilidade de falha da LT ($prob_i$) multiplicada por suas consequências financeiras ($Cons_i$) e pode ser determinada utilizando a expressão (1.3). Seu valor pode ser estimado, mas a data de sua ocorrência é dificilmente conhecida.

$$C_i = D_i + R_i \quad (1.2)$$

$$R_i = prob_i Cons_i \quad (1.3)$$

Apesar de possuir uma formulação relativamente simples, o modelo de risco técnico-econômico teve sua aplicação prática preterida por causa da dificuldade em se calcular a probabilidade de falha da LT e até mesmo receio em se trabalhar com conceitos probabilísticos. Este último obstáculo teve seu efeito reduzido com a inclusão do conceito de confiabilidade, definido como o complemento da probabilidade de falha, no projeto eletromecânico de linhas de transmissão (IEC Std 60826, 2003) (TB178, 2001). Inicialmente houve certa relutância por parte de alguns engenheiros em aceitar essa abordagem por causa de sua postura conservadora atrelada à abordagem determinística.

O projetista de qualquer componente da LT ainda usará valores determinísticos de cargas e resistências, porém esses valores serão obtidos com base em uma análise probabilística. Deste modo, o projetista terá conhecimento dos índices de confiabilidade aceitos para o projeto (ORAWSKI, 1991). No cenário nacional, a nova versão da NBR 5422, que até o término deste texto não tinha previsão de publicação, abordará critérios probabilísticos para o projeto, dos quais alguns já podem ser observados nos editais de transmissão dos leilões da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021) e nas diretrizes para elaboração de projetos básicos publicado pelo Operador Nacional de Sistemas (ONS, 2013).

No planejamento estratégico será escolhida, entre todas as técnicas disponíveis, aquela que apresentar o menor valor presente líquido dos custos anuais sob um determinado período de investimento. Além da técnica também deverá ser determinado o momento mais adequado para realizar o investimento. O tempo ótimo para aplicação da técnica acontecerá quando o valor mínimo de seu VPL dos custos acumulados por ano de serviço for igual ao da LT (TB353, 2008).

Devido a sua complexidade, extensão e exposição de seus componentes ao meio ambiente, as linhas de transmissão estão sujeitas à degradação e possíveis falhas oriundas de uma ampla variedade de eventos.

Para a avaliação de risco técnico-econômico ou projeto probabilístico de uma LT, a mesma pode ser considerada como um sistema composto por uma série de componentes: fundações, condutores, cadeias de isoladores e suportes. Cada componente é constituído por vários itens com composições químicas e propriedades elétricas e/ou mecânica quase sempre desiguais. Por exemplo, os suportes compreendem as estruturas, hastes de âncoras, estais e seus acessórios. Essa complexidade de composição associada aos mais adversos carregamentos elétricos e mecânicos, aos quais as linhas são submetidas, é que dificultaram o cálculo da probabilidade de falha da LT.

O conceito de probabilidade de falha, utilizado na equação (1.3), deriva dos projetos probabilísticos de LTs, os quais tem como critério a seguinte premissa: uma LT falha quando sua resistência (Re) é inferior ao carregamento (Ca) sob o qual ela está submetida.

$$Re < Ca \quad (1.4)$$

Os conceitos de probabilidade, consequência e risco de falha são bastante utilizados na escolha da técnica de recapacitação. Geralmente, quando se aumenta a capacidade de condução da LT a probabilidade de falha permanece inalterada, mas ocorre um incremento na consequência pois uma quantidade maior de energia deixará de ser entregue no caso de uma ocorrência. Logo o risco de falha também aumentará pois é o produto entre a probabilidade e a consequência. Isto ocorre no caso de repacitação através da instalação de condutores especiais, retracionamento, aumento de tensão, elevação dos pontos de fixação dos condutores, entre outras técnicas. Na Tabela 1 é possível verificar o comportamento da probabilidade, consequência e risco de falha, os componentes afetados e as características elétricas envolvidas na aplicação de algumas técnicas de recapacitação (TB353, 2008). O “o”, “x” e “-” significam possibilidade, certeza e ausência de alteração, respectivamente. Por exemplo, no caso de um reforço na estrutura aumentando sua resistência mecânica ocorrerá uma redução na probabilidade de falha e conseqüentemente no risco. Os componentes envolvidos serão evidentemente a estrutura e dependendo do reforço será necessária uma intervenção na fundação.

Tabela 1 – Comportamento da probabilidade, consequência e risco de falha, componentes afetados e as características elétricas envolvidas na aplicação de algumas técnicas de recapacitação

Técnica	Efeitos na linha														Probabilidade de falha	Consequência da falha	Risco de falha
	Componentes ou elementos							Características elétricas									
	Estruturas	Fundações	Condutores	Isoladores	Ferragem	Aterramento	Cabos pára-raios	Aumento de potencial no solo	Desempenho contra descargas	Indução	EMF	Rádio interferência	Ruído audível	Desempenho contra poluição			
Instalação de condutores especiais	o	o	x	o	o	-	-	-	-	o	o	O	o	-	=	↑	↑
Instalação de condutores adicionais	x	x	x	x	x	-	-	o	-	o	x	x	x	-	=	↑	↑
Instalação de sistema de montagem	-	-	-	-	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	=	↑	↑
Aumento da tração do condutor	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	=	↑	↑
Aumento da altura dos pontos de fixação dos condutores	x	x	-	o	o	-	-	-	-	-	o	O	o	-	=	↑	↑
Adoção de avaliação probabilística	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	=	↑	↑
Aumento da tensão de operação	o	o	o	x	x	-	-	-	x	-	x	x	x	o	=	↑	↑
Aumento da resistência da estrutura	x	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	=	↓
Aumento da resistência da fundação	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

Fonte: TB353 (2008).

1.1 MOTIVAÇÃO

O surgimento de alturas incorretas dos condutores, devido à imprecisão de projeto e construção ou mudanças nas atividades realizadas sob as LTs, também podem restringir o nível de carregamento elétrico da linha. Neste contexto é proposta uma nova técnica, denominada Técnica dos Tramos mistos, para correção das violações nas distâncias de segurança aplicando condutores especiais ou de bitolas diferentes apenas nos vãos que apresentem essas incorreções, mantendo os demais cabos do tramo. Tal técnica pode ser bastante útil também quando se pretende aumentar o limite térmico de uma linha que apresenta restrições em pequenos trechos e folgas no restante da instalação e até para corrigir violações de campos elétricos e magnéticos provenientes da linha. A substituição dos condutores em apenas alguns trechos do tramo é uma solução mais econômica do que a troca dos condutores no tramo inteiro. No entanto, para aplicação desta técnica foi necessário desenvolver um modelo matemático para o cálculo das trações e flechas que incorporassem todas as peculiaridades citadas, assim como as propriedades dos condutores especiais. Com a utilização de condutores diferentes em um mesmo tramo pode-

se ter módulos de elasticidades, coeficientes de dilatação térmica, diâmetros, pesos e temperaturas também diferentes. Alguns modelos matemáticos atuais até consideram a diferença de temperatura, mas não as demais particularidades. Como há possibilidade de utilizar condutores especiais na aplicação da Técnica dos Tramos mistos, também foi preciso desenvolver um modelo matemático para o cálculo da temperatura de *knee point*. As análises e aplicação da Técnica dos Tramos mistos em uma LT permitiu determinar as suas vantagens e limitações.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um modelo para recapacitação de linhas de transmissão através de tramos mistos.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos também devem ser alcançados:

- a) desenvolver um modelo matemático para cálculo das flechas e trações considerando a presença de condutores diferentes em um mesmo tramo;
- b) desenvolver um modelo matemático para determinação das temperaturas de *knee point* em tramos com condutores diferentes;
- c) aplicar a técnica em uma linha de distribuição real;
- d) determinar as limitações da Técnica dos Tramos mistos;
- e) comparar a relação custo-benefício da Técnica dos Tramos mistos com o retracionamento e recondutoramento.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de modelos matemáticos para cálculo de flecha, tração e temperatura de *knee point* em seções de tensionamento com quaisquer características: vãos nivelados ou desnivelados, com comprimentos diferentes ou iguais, temperaturas diferentes e mais de um tipo de condutor. A abrangência destes modelos vai além da aplicação da Técnica dos Tramos mistos, apesar de terem sido desenvolvidos para esta finalidade. As restrições dos modelos matemáticos tradicionais restringiram a forma como as LTs são projetadas. Por exemplo, os vãos em um mesmo tramo não possuem tamanhos muito diferentes. Quando isto ocorre o vão é transformado em um tramo através da utilização de estruturas de amarração. Também não eram utilizadas temperaturas de projeto muito elevadas devido a imprecisão no valor da flecha calculada. Com a utilização de condutores especiais essa

restrição torna-se um fator crítico. Os modelos propostos nesta tese não possuem essas limitações e abrem espaço para uma grande diversidade de estudos.

1.4 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TEMA DO TRABALHO

Os estudos apresentados nesta tese foram iniciados em 2009 e por motivos maiores foram interrompidos em determinados períodos, por isso há um lapso de tempo entre as últimas publicações e a data defesa.

1.4.1 Periódicos

BEZERRA, J. M. B.; SILVA, A. A. P.; LINS, Z. D.; CAETANO JUNIOR, J.

Field validation of a new model for uprating transmission lines. *Electric Power Systems Research (Print)*, v.134, p.30 - 37, 2016.

Total de citações no *SCOPUS* (pesquisa realizada em 21/12/2020): 4.

Citações mais recentes:

RIBA, Jordi-Roger et al. Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110334, 2020.

FERNANDEZ, Elvira et al. Field validation of gap-type overhead conductor creep. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 105, p. 602-611, 2019. Citações no *Web of Science* em 11/12/2020: 4.

SILVA, A.A.P.; Bezerra, J.M.B. Applicability and limitations of ampacity models for HTLS conductors. *Electric Power Systems Research (Print)*, v. 93, p. 61-66, 2012.

Total de citações no *SCOPUS* (pesquisa realizada em 21/12/2020): 18.

Citações mais recentes:

RIBA, Jordi-Roger et al. Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110334, 2020.

REDDY, B. S.; MITRA, Gaurav. Investigations on High Temperature Low Sag (HTLS) Conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 35, n. 4, p. 1716-1724, 2020.

SILVA, A.A.P.; J. M. B. Bezerra . A Model for Uprating Transmission Lines by Using HTLS Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, p. 2180-2188, 2011.

Total de citações no *SCOPUS* (pesquisa realizada em 21/12/2020): 15.

Citações mais recentes:

RIBA, Jordi-Roger et al. Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 134, p. 110334, 2020.

AGÜERO-RUBIO, José et al. A Didactic Procedure to Solve the Equation of Steady-Static Response in Suspended Cables. ***Mathematics***, v. 8, n. 9, p. 1468, 2020.

1.4.2 Anais de congressos

BEZERRA, J. M. B.; SILVA, A. A. P.; LINS, Z. D. ; CAETANO JUNIOR, J.; PESSOA, A. Nova Tecnologia para Expansão de Clearance em Linhas de Transmissão. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013, Brasília. Anais do SNPTEE, 2013.

SILVA, A. A. P.; BEZERRA, J. M. B. Análise Crítica de Modelos de Ampacidade para Condutores Especiais. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010. Anais SBSE.

SILVA, A. A. P. ; BEZERRA, J. M. B. ; EMERENCIANO, V. R. A. ; LINS, Z. D. ; J. C. O. Junior . Aplicabilidade e limitações dos modelos de ampacidade para condutores especiais. In: Transmission & Distribution Conference and Exposition Latin America, 2010, São Paulo. 9th IEEE/PES 2010 Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, 2010.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, onde no primeiro capítulo é introduzido o tema da pesquisa com apresentação dos objetivos e motivações.

Nos capítulos 2 são apresentadas as principais técnicas de repotencialização, sua relevância e contribuições tanto para o meio acadêmico como para o meio industrial. Também é apresentado o conceito de temperatura de *knee point*.

No capítulo 3 são apresentadas as principais pesquisas realizadas nos últimos anos que tiveram contribuição para o estudo.

No capítulo 4 é apresentada a equação geral de mudança de estado, através da qual é possível calcular as tensões mecânicas e flechas de cabos em uma seção de tensionamento com condutores diferentes em vãos nivelados ou desnivelados a qualquer temperatura. Também é apresentado um novo modelo para determinar a temperatura de *knee point*. Esta teoria foi fundamental para avaliação da técnica de correção das distâncias de segurança proposta neste trabalho.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia adotada e no capítulo 6 são apresentadas as aplicações, as limitações técnicas e ganhos da técnica de correção das distâncias de segurança apresentadas neste trabalho. Também é realizada uma comparação da Técnica dos Tramos mistos com outras convencionais.

No capítulo 6 são descritas as principais conclusões deste trabalho. O texto se encerra com a apresentação das referências bibliográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os países com grande infraestrutura elétrica estão sendo confrontados com a seguinte questão: grande parte das linhas, construídas antes da década de 1980, encontram-se no final de sua vida útil e é cada vez maior a demanda por energia elétrica, associada às restrições ambientais e escassez de recursos para novos investimentos. Isso tem impulsionado as empresas a buscarem novas alternativas para aumentar a capacidade de transmissão aproveitando a infraestrutura existente. É possível encontrar na literatura uma infinidade de termos relacionados ao aumento da utilização das LTs, muitas vezes termos diferentes são empregados para descrever a mesma técnica. Em 2008, o CIGRÉ publicou a brochura técnica 353 – *Guidelines for Increased utilization of Existing Overhead Transmission Lines* padronizando esses termos. Nesta tese será empregada a tradução livre proposta por (PESSOA, 2017) baseada na brochura 353 (TB353, 2008). Deste modo, repotencialização (upgrade) consiste em um aumento na capacidade de transmissão, revitalização (upgrading) é o aumento na confiabilidade da linha e restauração (refurshiment) equivale a renovação extensiva da linha ou reparo de algum componente capaz de reestabelecer sua vida útil. Outro termo bastante empregado na literatura nacional é recapacitação, a qual é composta por repotencialização e revitalização. A Técnica do Tramo Misto, analisada nesta tese, é uma recapacitação, pois permite aumentar a capacidade de condução e a confiabilidade da linha ao corrigir violações na distância do condutor ao solo ou obstáculo. As principais técnicas para aumentar a ampacidade da linha e corrigir violações nas distâncias de segurança serão discutidos ao longo deste capítulo.

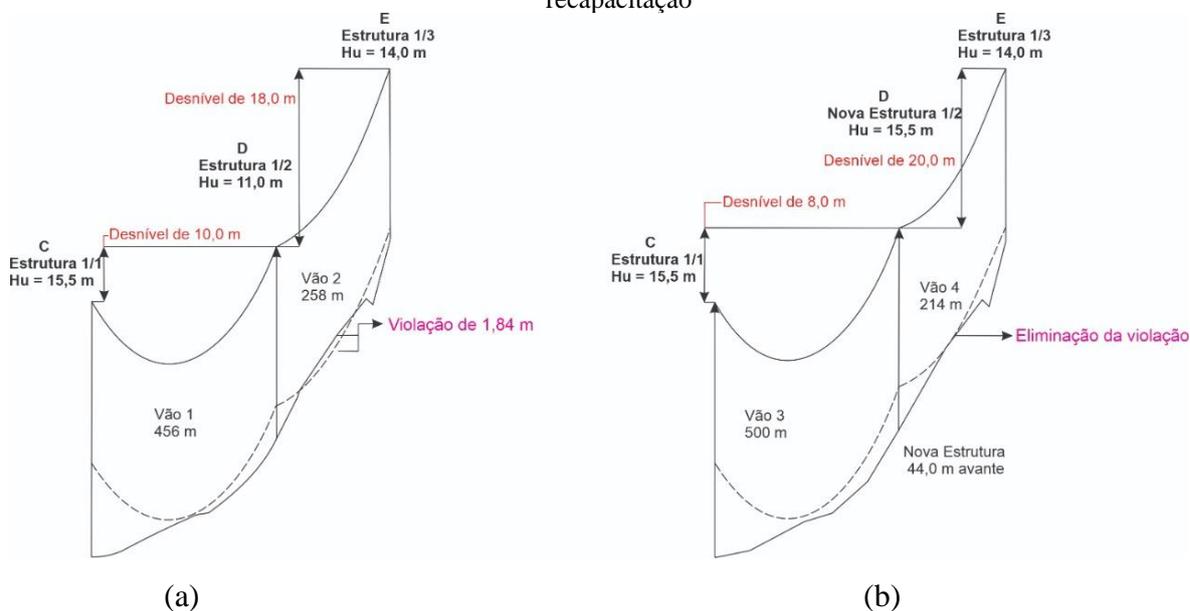
2.1 ALTERAÇÃO NAS ESTRUTURAS

O ganho na capacidade de transmissão utilizando essa técnica de recapacitação pode ser obtida através do aumento da altura e/ou relocação da estrutura. Estudos indicam que o aumento de todas as estruturas de uma linha de transmissão não é viável economicamente devido a magnitude dos trabalhos estruturais necessários. Porém, um aumento na capacidade de condução pode ser obtido aumentando seletivamente cerca de 10% das estruturas (LINDSY, 2008).

Na Figura 1 é possível visualizar a relocação e substituição de uma estrutura por outra de maior comprimento, que tornou possível a recapacitação de uma linha de transmissão da CHESF (PESSOA, 2017). Durante o estudo para aumento da ampacidade foi verificada a

ocorrência de uma violação de 1,84 m, Figura 1(a). O problema foi solucionado substituindo a estrutura D de 11 m por uma de 15,5 m e a reposicionando 44 m avante. Figura 1(b).

Figura 1 – Trechos de uma linha de transmissão: antes e após substituição e relocação de uma estrutura para recapacitação



Fonte: PESSOA (2017).

2.2 REISOLAMENTO

O aumento do nível de tensão é a solução que oferece o maior ganho na capacidade de transporte de energia da LT, porém requer um número elevado de alterações na linha, um longo período para ser implementada e possui um custo elevado.

A primeira proposta de reisolamento no Brasil foi realizada pela CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco). Em 1979, os engenheiros de planejamento diagnosticaram a necessidade de uma LT de 500 kV para atender o aumento de demanda do Ceará, mas o investimento em uma subestação de 500 kV era inviável financeiramente naquele momento. Logo, foi construída uma LT em circuito duplo de 230 kV com dois cabos CAA Grosbeak por fase, a qual permaneceu em operação durante vários anos e em seguida foi reisolada para 500 kV com quatro cabos por fase (GALIANO *et al.*, 1979).

Com o aumento do nível de tensão é preciso reavaliar as distâncias de segurança da linha, os valores de campo eletromagnéticos, ruído audível, radio interferência e o desempenho contra descarga atmosférica. Se for necessário aumentar as distâncias do condutor ao solo ou obstáculo pode ser realizado um retracionamento. Esta nova condição de esticamento mecânico dos cabos condutores exige estudos de vibração eólica, para verificação do sistema de

amortecimento da LT, e suportabilidade mecânica das estruturas e fundações (HATASHITA *et al.*, 2015). Caso a nova solução seja o aumento de tração dos cabos condutores ou a troca do cabo condutor por outro com maior diâmetro ou maior peso, as hipóteses de carregamento projetadas para a condição anterior podem ser violadas, exigindo assim, reforços nas estruturas e/ou fundações existentes na LT (SILVA *et al.*, 1989). Para manter as taxas de desligamento e religamento dos estudos da coordenação de isolamento dentro dos níveis padronizados as mísulas das estruturas metálicas podem ser aumentadas e as cruzetas das estruturas de concreto podem ser trocadas. Quando necessário pode ser realizado o travamento das cadeias de isoladores, transformando-as em cadeias do tipo "L" ou "V", evitando o desligamento da LT por abertura do espaçamento devido ao balanço da cadeia em regime permanente no vento máximo ou na condição de surto de manobra (BRAGA; VEIGA; MOREIRA, 1993).

O reisolamento é uma prática bastante comum no setor elétrico. Apenas a COPEL, de 1982 a 1997, reisolou 835,3 km de 69 kV para 138 kV e 316,7 km de 88 kV para 138 kV. Quando dissociado do valor de novas subestações, o custo total de implementação da técnica é de até 30% do valor de uma nova linha de transmissão. Investimento considerável já que esse critério deve garantir um longo período de utilização sem problemas operacionais ou de manutenção (BRAGA M.L. BRAGA; MOREIRA, 2000). A Tabela 2 registra alguns casos de reisolamento realizados em diversos países (BHATTARAI *et al.*, 2010).

Tabela 2 – Casos de reisolamento

País	Tensão original [kV]	Tensão final [kV]
Japão	66	154
EUA	41,6	115
Alemanha	220	380
África do Sul	275	400

Fonte: BHATTARAI *et al.* (2010).

2.3 RETRACIONAMENTO

O aumento da tração eleva a distância do condutor ao solo, permitindo a eliminação da violação na distância de segurança e/ou uma elevação na temperatura do condutor, desde que não sejam ultrapassados seu limite térmico e os carregamentos mecânicos suportados pelas estruturas e fundações. O risco associado com a probabilidade de uma condição operacional insegura é o mesmo que o anterior ao aumento da tração (STEPHEN, 2008).

Nesse tipo de solução, entretanto, deve ser avaliada com detalhes a possibilidade de deteriorar o desempenho da linha de transmissão quanto a vibrações eólicas, fato que se torna

ainda mais grave quando se trata de uma linha com elevado tempo de operação. A NBR 5422 estabelece os limites de tração para três hipóteses de carregamento: condição de trabalho de maior duração, temperatura mínima e máximo carregamento. As características de cada condição estão registradas na Tabela 3. O limite de tração na condição de trabalho de maior duração, também conhecida como EDS (*Every Day Strees*), depende do tipo do condutor: 20% para o Cabo de Alumínio com Alma de Aço (CAA), 18% para Cabo de Alumínio Liga (CAL) e 21% para Cabo de Alumínio (CA).

Os limites de tração para evitar fadiga nos condutores tem sido amplamente pesquisados. Em 2005, o Cigré publicou a brochura 273 intitulada *Overhead Conductor Safe Design Tension with Respect to Aeolian Vibrations* (TB273, 2005) na qual propõe a utilização do parâmetro H/W (razão entre a tração horizontal no condutor e o seu peso) para evitar fadiga mecânica no condutor e provável ruptura de seus tentos, porém ainda está vigente no Brasil a NBR 5422 (ABNT,1985).

Tabela 3 – Hipóteses de carregamento

Condição	Trabalho de maior duração	Máximo carregamento	Temperatura mínima
Temperatura	Média	Coincidente	Mínima
Velocidade do vento	Sem vento	Vento de projeto	Sem vento
Tração máxima	Consultar NBR 5422	50% da tração de ruptura	33% da tração de ruptura
<i>Creep</i>	Sim	Sim	Não

Fonte: ABNT (1985).

Também deve ser realizada uma avaliação mecânica das estruturas e fundações, de modo que não sejam ultrapassados os limites de carregamento. Caso haja violação, as estruturas e fundações devem ser reforçadas.

2.4 TRANSFORMAÇÃO DA CADEIA DE SUSPENSÃO EM FALSA AMARRAÇÃO

Quando as duas estruturas adjacentes ao vão que apresenta violação da distância de segurança forem de suspensão e a diferença de alturas máximas a crescer for igual ou menor que o comprimento da cadeia de suspensão, estas podem ser transformadas em cadeias de falsa amarração. O ganho na distância do condutor ao solo ou obstáculo é proporcional ao comprimento reduzido na componente vertical da cadeia de isolador. Embora haja um ganho na altura de suspensão, acaba-se onerando o isolamento e a suportabilidade mecânica ao rompimento de fase.

Esta técnica pode ser utilizada tanto para corrigir violações nas distâncias de segurança quanto para aumentar a capacidade de condução da LT. Em 2018, o *Transmission System Operator* na República Tcheca conseguiu elevar a temperatura de projeto de 40 °C para 80 °C em LTs de 220 kV e 440 kV através da conversão de cadeias de suspensão em falsa amarração em locais críticos. As cadeias de suspensão originais, com 4,9 m de comprimento, foram substituídas por cadeias de falsa amarração, com componente vertical de 1,9 m. Através da Figura 2 é possível visualizar a substituição das cadeias em duas fases do circuito duplo de 440 kV (INMR, 2018).

Figura 2 – Conversão de duas cadeias de isoladores de suspensão em uma cadeia de falsa amarração



Fonte: INMR (2018).

2.5 LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA

Uma das formas de aumentar a capacidade de condução de corrente das linhas de transmissão, quando ocorre limitação por restrições sistêmicas, é por meio da aplicação da tecnologia de Linha de Potência Natural Elevada (LPNE). Em linhas existentes pode ser utilizada a técnica de feixe expandido (FEX), que consiste no redimensionamento do feixe de condutores proporcionando o aumento da potência natural através da redução da impedância e consequente redução da queda de tensão (JUNIOR et al, 1995) (ESMERALDO et al, 1999). Quando a linha tiver originalmente um cabo por fase, esta solução implica na adição de um cabo auxiliar, em posição determinada pelos estudos elétricos e mecânicos. Como o cabo de menor bitola, utilizado no FEX, pode ser submetido a uma densidade de corrente maior do que a do cabo original e consequentemente a uma maior temperatura a utilização de cabos termorresistentes pode ser uma boa opção devido a seu limite térmico superior (JUNIOR et al, 1999). Geralmente é

possível encontrar a solução mais adequada para o sistema a partir de uma ampla análise de engenharia diante da enorme quantidade de possibilidades que a técnica do FEX oferece. Para linhas novas pode ser avaliada a adoção de um feixe com dois cabos em vez de um, mantendo área total de alumínio de forma a não aumentar os custos, ou o desenvolvimento de novos padrões estruturais, como o proposto em (BEZERRA, 2007) que proporcionou um ganho de 212% no nível de carregamento.

2.6 RECONDUTORAMENTO

Uma técnica clássica de recapacitação é o recondutoramento da LT com um condutor de seção maior. O aumento da seção do condutor reduz sua resistência elétrica, diminuindo a dissipação de calor por efeito Joule, conseqüentemente permitindo um aumento na ampacidade. A substituição do condutor implica, na maioria dos casos, em mudanças nas torres e fundações. Logo, torna-se necessário efetuar um redimensionamento estrutural completo na série de estruturas utilizadas, levando em consideração seu tempo de operação e estado de conservação (ALBIZU, 2005).

O recondutoramento também pode ser realizado utilizando condutores de liga de alumínio, 6201 ou 1120. O cabo de alumínio de liga de alumínio 6201 foi utilizado com grande sucesso em sistemas de transmissão devido ao reconhecimento de suas melhores características elétricas em relação aos cabos de alumínio com alma de aço (CAA) tanto para linhas novas quanto para recapacitar linhas existentes. A COPEL (Companhia Paranaense de Energia) utilizou o cabo de alumínio-liga 6201 na recapacitação de mais 150 km de linhas de transmissão em 138 kV. A recapacitação foi realizada com a substituição dos cabos CAA Partridge 266,8 MCM por cabos CAL Butte 321,8 MCM, passando de uma temperatura de projeto de 55°C para 75°C. As linhas recapacitadas foram construídas a cerca de 40 anos, originalmente para 69 kV e, em 1985, foram reisoladas para 138 kV. Como o peso unitário do cabo Butte é inferior ao do Partridge os ângulos de balanço ultrapassaram dos seus limites em grande parte das estruturas. A solução foi instalar próximo aos grampos de suspensão um arranjo com pesos adicionais, visando diminuir os ângulos de balanço verificados, conforme (WIEDMER et al, 2007).

Figura 3 – Fotografia do arranjo de pesos adicionais aplicados a uma linha de 138 kV para reduzir os ângulos de balanço após substituição do condutor CAA Partridge 266,8 MCM pelo condutor CAL Butte 321,8 MCM de peso inferior



Fonte: WIEDMER et al (2007).

A partir de 2011, a COPEL passou a utilizar em seus novos empreendimentos e na recapacitação de linhas existentes os cabos CAL 1120 e CALA 1120, totalizando mais de 1300 km de linhas de transmissão, tanto em 230 kV como 500 kV (HOFFMANN et al, 2015). A liga de alumínio 1120 é uma opção com características intermediárias entre a liga 1350, utilizada no CAA, e a 6201. Sua condutividade é de 59% IACS, sua resistência mecânica é cerca de 15% inferior à da liga 6201 e fluência até 60% inferior à das outras ligas de alumínio. O cabo CAL 1120 é amplamente utilizado na Austrália há mais de 40 anos (FARMAIN, 2017).

A substituição do condutor existente por condutores que de baixa flecha e alta temperatura, conhecidos também como condutores especiais, fornece um ganho considerável na ampacidade sem aumentar os esforços sobre as estruturas. Estes condutores possuem propriedades que possibilitam para uma mesma flecha uma temperatura maior de trabalho. Existem vários tipos de condutores especiais disponíveis no mercado, cada um fornecendo um ganho de ampacidade específico, todos requerendo avaliações econômicas diante dos elevados custos ainda praticados. Entre os condutores especiais os mais promissores são o cabo de alumínio reforçado com compósito (ACCR) e o cabo de alumínio com alma de compósito (ACCC).

No Brasil duas empresas já utilizam o cabo ACCR. A CPFL Energia empregou o condutor para aumentar a capacidade de uma linha de transmissão que atravessa uma região densamente povoada onde a construção de novas linhas apresentaria várias dificuldades devido

à proximidade das residências. Já a Companhia de Transmissão Elétrica Paulista (CTEEP) está utilizando o cabo ACCR na operação, desde 2009, de uma linha de 138 kV com 1,7 km de comprimento que cruza o rio Paraná. A instalação foi realizada em seis dias, aumentou a ampacidade em 121% e reduziu o peso sobre as estruturas em 30%. Com o uso deste condutor, no lugar de um com peso superior, não foi necessário substituir ou reforçar as fundações de concreto localizadas no interior do rio para sustentar as torres, o que exigiria o uso de dinamite em uma área ambientalmente sensível (COMPANHIA, 2004).

Em relação ao ACCC, existem 6 aplicações no país, totalizando 391,9 km (CTC, 2020). Entre elas, encontra-se a recapacitação de duas linhas de 138 kV da CEMIG, na qual conseguiu-se aumentar a potência de 95 MVA para 220 MVA. Foi necessário trocar ou inserir 15 torres, transformar três estruturas de suspensão em falsa amarração e realizar a raspagem do terreno em uma torre. Os cabos ACCC, assim como os demais cabos especiais, exigem técnicas de instalação e manuseio específicas. Uma dificuldade que houve na obra foram os furtos de cabo, mesmo após a energização. Apesar de não haver uma relação direta com a tecnologia construtiva do cabo, uma vez que o furto também acontece com cabos convencionais, a liga de alumínio utilizada no ACCC possui têmpera mole o que facilita sua separação da alma de compósito e transporte, conforme pode ser verificado na

Figura 4 e na Figura 5 (BRAGA, 2019). Está prevista para o final de 2020 o início da repotencialização da LT Londrina Ibiporã de 230 kV em circuito duplo da COPEL através da substituição do cabo CAA Drake por um ACCC Cordoba, proporcionando o aumento da ampacidade de 570 A para 879 A (CTC, 2020).

Figura 4 – Alma de compósito após o furto de cabos



Fonte: BRAGA (2019).

Figura 5 – Alma do cabo ACCC após furto do alumínio que compõe a coroa



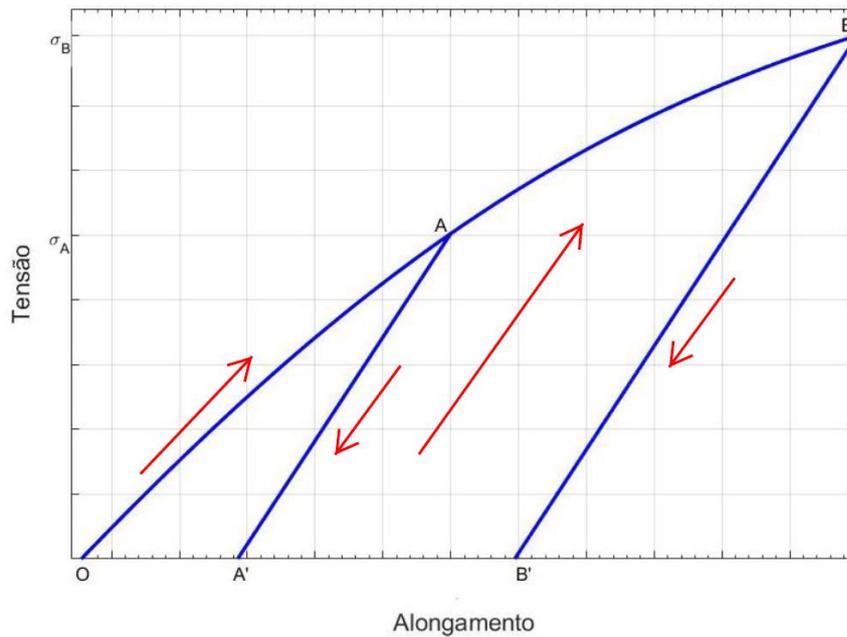
Fonte: BRAGA (2019).

2.7 CÁLCULO DA TEMPERATURA DE *KNEE POINT*

A locação das estruturas de linhas de transmissão deve ser realizada para os maiores valores de flechas que podem ocorrer durante a vida útil da linha (ABNT, 1985). A utilização de valores inferiores aumentaria os custos e a de valores superiores poderiam causar violações nas distâncias de segurança. O valor máximo da flecha depende do comprimento do condutor, o qual é influenciado por sua temperatura e por seu alongamento permanente. Enquanto o efeito da temperatura é facilmente calculado através da equação de mudança de estado, para o cálculo do alongamento permanente existem vários modelos, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Um das formas de analisar o alongamento permanente é utilizando os diagramas de tensão-deformação, nos quais registra-se no eixo das ordenadas as tensões mecânicas aplicadas aos condutores e no eixo das abcissas os alongamentos unitários medidos, conforme representado na Figura 6 (LABEGALINI,1992). Considere, por exemplo, que seja aplicada uma tensão mecânica variando de 0 a σ_A em um condutor homogêneo (formado por um único tipo de material) e que os respectivos alongamentos sejam registrados no diagrama. O comportamento observado será o descrito pela curva OA. Se a tensão for reduzida gradativamente até zero o comportamento não será mais descrito pela curva citada anteriormente e sim pela reta AA'. Quando a tensão for reduzida a zero permanecerá na amostra um alongamento permanente igual a OA', o qual é atribuído ao encruamento e acomodação dos fios e camadas de fios entre si.

Figura 6 – Diagrama tensão deformação de um condutor homogêneo



Fonte: adaptado de LABEGALINI (1992).

Se o condutor for novamente tensionado, verifica-se que até σ_A ele obedecerá à lei dada pela reta A'A, passando em seguida a descrever a curva AB para valores maiores que σ_A . Uma nova redução gradativa da tensão, após atingir σ_B , mostra que há um aumento no alongamento permanente sofrido pela amostra. No entanto, observa-se que as retas AA' e BB' são paralelas e representam o módulo de elasticidade final do condutor.

Caso a tensão fosse inicialmente elevada de 0 para σ_A e mantida nesse valor por um determinado tempo e depois reduzida a zero novamente, o alongamento permanente total seria superior ao encontrado no primeiro cenário analisado. Esse componente de alongamento, proporcional ao valor e duração da tensão aplicada, é conhecido como fluência ou *creep*.

No caso de um condutor não-homogêneo (formado por mais de um material) o diagrama tensão-deformação pode ser construído a partir dos diagramas dos materiais que compõe a alma e a coroa, de acordo com a seguinte expressão (TB324, 2016) (PLS-CADD, 2019):

$$\sigma_{condutor} = \frac{S_{alma}}{S_{condutor}} \sigma_{alma} + \frac{S_{coroa}}{S_{condutor}} \sigma_{coroa} \quad (2.1)$$

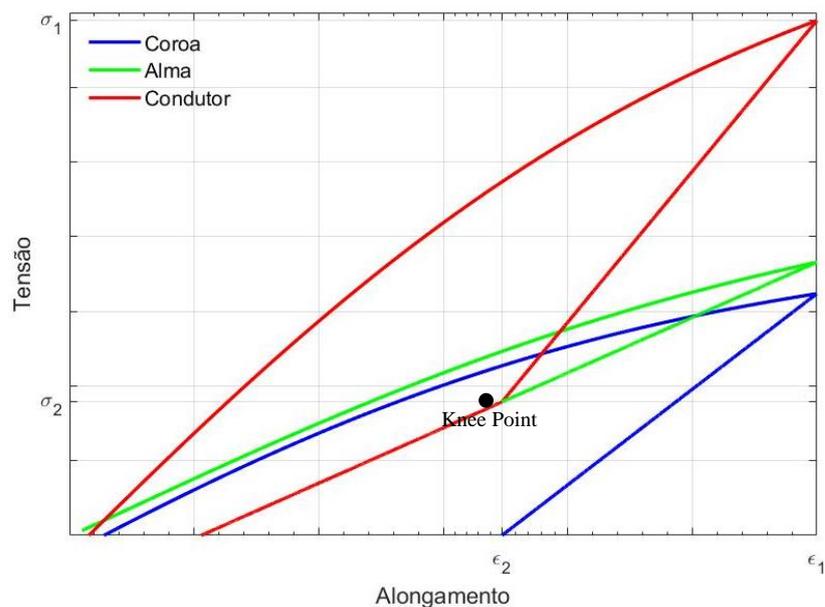
Em que:

S_{alma} seção transversal da alma do condutor
 S_{coroa} seção transversal da coroa do condutor

$S_{condutor}$	seção transversal do condutor
σ_{alma}	tensão mecânica na alma do condutor
σ_{coroa}	tensão mecânica na coroa do condutor
$\sigma_{condutor}$	tensão mecânica no condutor

As curvas verde e azul da Figura 7 representam os diagramas tensão- deformação da alma e da coroa do condutor, respectivamente. Já a curva vermelha representa o diagrama do condutor. Deste modo, pode-se concluir que durante o tensionamento do condutor a tensão se distribui entre sua coroa e sua alma. No início do destensionamento isto também ocorre, mas a partir de certo valor de tensão os fios que formam a coroa deixam de participar da absorção de tensão, que fica inteiramente por conta da alma do condutor. Este ponto é conhecido como *knee point*.

Figura 7 – Diagrama tensão deformação de um condutor não-homogêneo



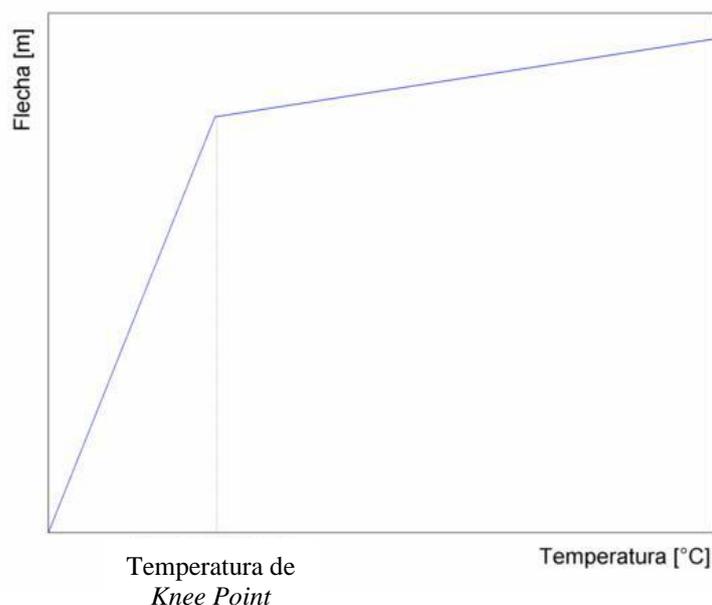
Fonte: O Autor (2020).

Embora o conceito de *knee point* tenha origem nos diagramas de tensão-deformação, ele é mais associado a um valor de temperatura do que tensão e seu estudo ganhou destaque após o advento dos condutores especiais. Através do diagrama da Figura 7 observa-se que o *knee point* ocorrerá para valores baixos de tensão, os quais podem estar associados a valores elevados de temperatura. Para os condutores CAA esses valores de temperatura geralmente são superiores aos de recozimento, justificando o fato deste parâmetro não ser utilizado como critério de projeto. Como os condutores especiais podem operar a temperaturas superiores à de

knee point, ele passa a ser um parâmetro importante no projeto. A Figura 8 registra a variação da flecha com o aumento da temperatura para um condutor não homogêneo (ALBIZU, 2010). Acima da temperatura de *knee point*, a flecha possui uma menor taxa de variação com a temperatura pois depende apenas do material empregado na alma do condutor.

A temperatura de *knee point* dependerá do comprimento do vão, das características do condutor, da condição inicial de trabalho e da condição EDS. Seu valor irá variar em cada vão, implicando em grandes dificuldades na avaliação da flecha do condutor. A maioria dos modelos atuais calcula um valor para um vão representativo, porém perde-se a precisão na determinação da flecha. Neste capítulo é apresentado um modelo para cálculo do *knee point* para vãos isolados e contínuos, nivelados e desnivelados, com condutores diferentes em uma mesma seção de tensionamento.

Figura 8 – Variação da flecha com a temperatura



Fonte: O Autor (2020).

2.7.1 Cálculo da temperatura de *knee point* para vãos isolados e contínuos

O comprimento de um condutor em determinado vão sofrerá uma contração ou expansão se a sua temperatura ou tensão se alterar, resultando em uma modificação no valor da tração mecânica. A variação no comprimento pode ser determinada em função da dilatação elástica e térmica do condutor. A primeira obedece a lei de Hooke, a qual estabelece a proporcionalidade entre deformações elásticas e as tensões aplicadas. A dilatação térmica está

relacionada ao coeficiente de dilatação térmica linear do condutor. Desta forma, pode-se escrever (KIESSLING,2014):

$$L_2 = L_1[1 + \varepsilon_t(T_{c_2} - T_{c_1})][1 + (\bar{S}_2 - \bar{S}_1)/(E_c S)]. \quad (2.2)$$

onde,

- L_2 comprimento do condutor relativo a condição 2 [m];
- L_1 comprimento do condutor relativo a condição 1 [m];
- ε_t coeficiente de dilatação térmica linear do condutor [$^{\circ}\text{C}^{-1}$];
- E_c módulo de elasticidade do condutor [kgf/mm^2];
- T_{c_2} temperatura do condutor na condição 2 [$^{\circ}\text{C}$];
- T_{c_1} temperatura do condutor na condição 1 [$^{\circ}\text{C}$];
- \bar{S}_2 tração média do condutor na condição 2 [kgf];
- \bar{S}_1 tração média do condutor na condição 1 [kgf];
- S seção transversal do condutor [mm^2].

Neste capítulo as variáveis referentes ao estado inicial são descritas com o subscrito 1 e as variáveis relativas ao estado final possuem o subscrito 2. Os termos $\varepsilon_t(T_{c_2} - T_{c_1})$ e $(\bar{S}_2 - \bar{S}_1)/(E_c S)$ são pequenos quando comparados a condição inicial, seu produto pode ser desprezado na equação (2.2), resultando na seguinte relação:

$$L_2 = L_1 + L_1 \varepsilon_t(T_{c_2} - T_{c_1}) + L_1(\bar{S}_2 - \bar{S}_1)/(E_c S). \quad (2.3)$$

As tensões \bar{S}_1 e \bar{S}_2 são descritas como:

$$\bar{S}_1 = \frac{H_1 L_1}{a}, \quad (2.4)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{H_2 L_2}{a}. \quad (2.5)$$

Onde,

- H_1 tração do condutor relativa a condição 2 [kgf];
- H_2 tração do condutor relativa a condição 1 [kgf].

Pode-se considerar que a diferença $\bar{S}_2 - \bar{S}_1$ é aproximadamente igual a $H_2 - H_1$ (KIESSLING, 2014). Substituindo as equações (2.4) e (2.5) em (2.3) e realizando as manipulações algébricas necessárias, tem-se:

$$(L_2 - L_1)/L_1 = \varepsilon_t(T_{c_2} - T_{c_1}) + (H_2 - H_1)/(E_c S). \quad (2.6)$$

A equação (2.6) pode ser aplicada tanto para alma do condutor quanto para a sua coroa, resultando nas equações (2.7) e (2.8) (MAMALA, 2015). As variáveis referentes à alma do condutor são descritas com o subscrito A e as variáveis relativas à coroa do condutor possuem o subscrito C . Por exemplo, $L_{2,A}$ corresponde ao comprimento da alma no estado final.

$$(L_{2,A} - L_{1,A})/L_{1,A} = \varepsilon_{t,A}(T_{c_{2,A}} - T_{c_{1,A}}) + (H_{2,A} - H_{1,A})/(E_{c,A} S_A) \quad (2.7)$$

$$(L_{2,C} - L_{1,C})/L_{1,C} = \varepsilon_{t,C}(T_{c_{2,C}} - T_{c_{1,C}}) + (H_{2,C} - H_{1,C})/(E_{c,C} S_C) \quad (2.8)$$

Para determinar temperatura de Knee point ($T_{c_{kpt}}$) considera-se que a temperatura do condutor se distribui uniformemente ao longo de sua sessão, tanto na condição inicial quanto final, que o condutor sofre apenas deformação plástica e que seu valor é equivalente para alma e para a coroa. Ou seja:

$$T_{c_{2,A}} = T_{c_{2,C}} = T_{c_2} = T_{c_{kpt}} \quad (2.9)$$

$$T_{c_{1,A}} = T_{c_{1,C}} = T_{c_1} \quad (2.10)$$

$$(L_{2,A} - L_{1,A})/L_{1,A} = (L_{2,C} - L_{1,C})/L_{1,C} \quad (2.11)$$

Considerando as equações (2.9) e (2.10) e substituindo as equações (2.7) e (2.8) em (2.11), tem-se:

$$\varepsilon_{t,A}(T_{c_{kpt}} - T_{c_1}) + \frac{(H_{2,A} - H_{1,A})}{(E_{c,A} S_A)} = \varepsilon_{t,C}(T_{c_{kpt}} - T_{c_1}) + \frac{(H_{2,C} - H_{1,C})}{(E_{c,C} S_C)} \quad (2.12)$$

Reorganizando os termos da equação anterior, considerando que no instante inicial a tensão se distribui equitativamente entre a alma e a coroa, obtém-se a seguinte equação:

$$(T_{c_{kpt}} - T_{c_1}) = \frac{1}{(\varepsilon_{t,C} - \varepsilon_{t,A})} \left[\frac{H_{2,A}}{(E_{c,A}S_A)} - \frac{H_{2,C}}{(E_{c,C}S_C)} \right] \quad (2.13)$$

Na temperatura de knee point a tensão do condutor é completamente aplicada a sua alma, logo (BASSI, 2016):

$$T_{c_{kpt}} - T_{c_1} = \frac{H_{2,A}}{(\varepsilon_{t,C} - \varepsilon_{t,A})(E_{c,A}S_A)} \quad (2.14)$$

Substituindo (2.14) na equação de mudança de estado para um vão isolado, pode-se determinar a tração no condutor quando ele está submetido a temperatura de knee-point utilizando a seguinte equação:

$$\left(1 + \frac{\varepsilon_{t,A}}{\varepsilon_{t,C} - \varepsilon_{t,A}} \right) H_2^3 + \left(\frac{E_{c,A}S_A(am_{c_{1,A}}g)^2}{24H_{1,A}^2} - H_{1,A} \right) H_2^2 - \frac{E_{c,A}S_A(am_{c_{2,A}}g)^2}{24} = 0 \quad (2.15)$$

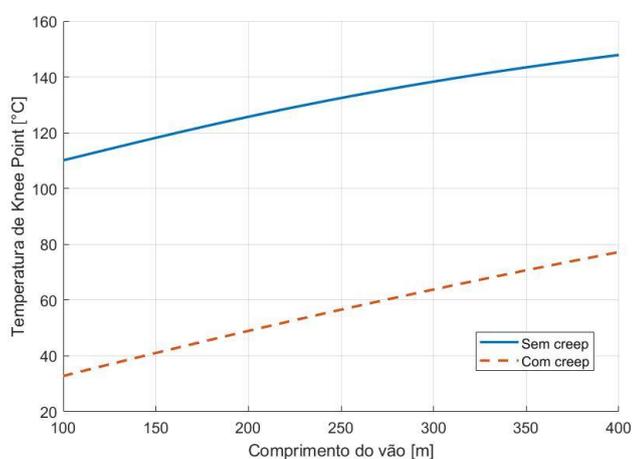
A temperatura de knee point pode ser calculada substituindo o valor de tração, encontrado através da resolução da equação (2.15), em (2.14). Para vãos contínuos, a única alteração na equação anterior é a substituição do comprimento do vão isolado (a) pelo comprimento do vão regulador (a_r). A tração inicial na alma do condutor ($H_{1,A}$) é obtida através da seguinte equação:

$$H_{1,A} = \frac{E_{c,A}S_A}{E_cS} H_1 \quad (2.16)$$

A partir das equações (2.15) e (2.16) foram realizadas algumas simulações para avaliar o comportamento do *knee point* com a variação de alguns parâmetros. A Figura 9 mostra a variação da temperatura de *knee point* com o comprimento do vão para o condutor CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à 3517 kgf sob temperatura de 15 °C. A curva contínua foi obtida sem considerar o valor do *creep*, o que corresponde ao estado do condutor imediatamente após a instalação. Neste caso, todos os valores encontrados são superiores a temperatura de recozimento do condutor. Por esse motivo é que o cálculo da temperatura de *knee point* não é

considerado quando são utilizados condutores convencionais em linhas de transmissão. Para um *creep* de 0,25%, curva tracejada da Figura 9, os valores da temperatura de *knee point* podem estar até abaixo da temperatura de projeto dependendo do comprimento do vão. Mesmo assim ela não é um parâmetro no projeto de linhas utilizando condutores convencionais devido à natureza incerta do *creep*. É uma decisão conservadora já que os valores de flecha calculados serão maiores sem considerar a temperatura de *knee point*.

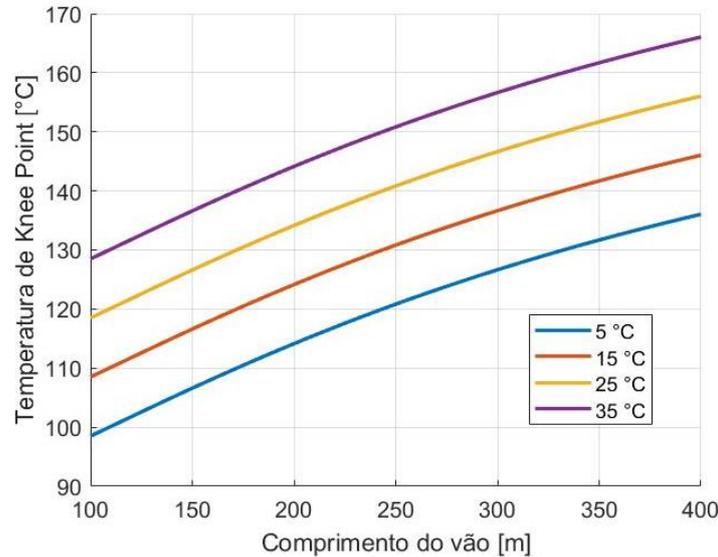
Figura 9 – Variação da temperatura de knee point com o comprimento do vão para o CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à 3517 kgf sob temperatura de 15 °C



Fonte: O Autor (2020).

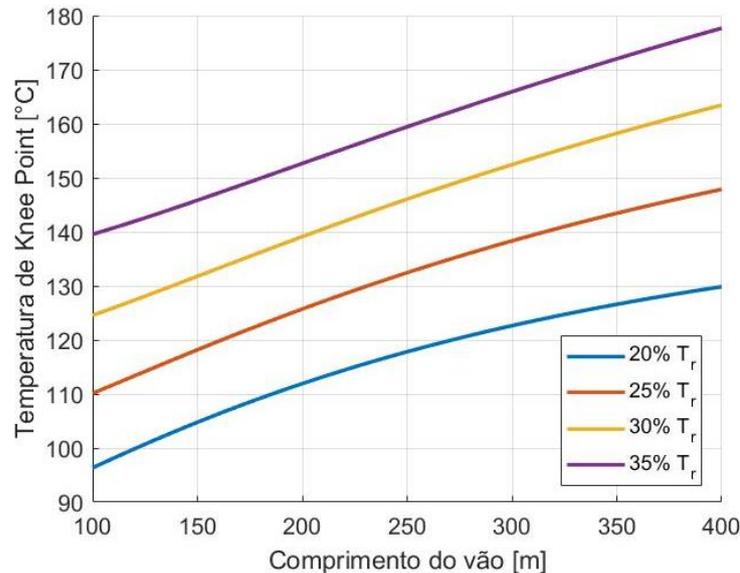
Além do *creep*, o comportamento da temperatura de *knee-point* em função do comprimento do vão é influenciado pela condição inicial do condutor (temperatura e tração). A Figura 10 e a Figura 11 registram, respectivamente, um aumento de aproximadamente 20% no valor da temperatura de *knee point* para uma variação de 20°C na temperatura inicial do condutor e de 30% quando a tração inicial é alterada de 20% para 35% do valor de ruptura.

Figura 10 – Variação da temperatura de *knee point* com o comprimento do vão para o condutor CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à 3517 kgf sob diferentes temperaturas



Fonte: O Autor (2020).

Figura 11 – Variação da temperatura de *knee point* com o comprimento do vão para o condutor CAA Drake Classe B tracionado inicialmente à diferentes trações sob temperatura de 15 °C



Fonte: O Autor (2020).

2.8 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A escolha adequada de um método de recapitação é um processo complexo e varia de acordo com as características do projeto. A relação custo-benefício, as restrições a implantação, o tempo de execução, e o ganho desejado da solução são fatores determinantes nesta decisão. Também é bastante comum a associação de técnicas, como um aumento de tensão acompanhado de um retracionamento ou um recondutoramento com raspagem do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma linha de transmissão, geralmente, é composta por várias seções de tensionamento, também conhecidas como tramos. Estas seções são limitadas por estruturas de amarração, que emprestam a linha uma maior rigidez mecânica e são dimensionadas para resistirem à tração unilateral de todos os cabos. Estas estruturas representam uma descontinuidade para o sistema mecânico dos cabos, pois não transmitem esforços mecânicos entre os vãos adjacentes (LABEGALINI,1992). Geralmente, a análise da capacidade de transporte de energia elétrica é realizada com base em um vão representativo da seção de tensionamento, conhecido como vão regulador, e a partir deste são estimadas as flechas nos demais vãos da seção. O método do vão regulador tem sido amplamente utilizado nos últimos 90 anos para calcular as tensões e flechas em seções de tensionamento (DWIGHT, 1926). Ele parte da premissa básica que durante o trabalho de tensionamento os cabos podem deslizar livremente sobre os apoios intermediários transmitindo igualmente a tensão em todos os vãos. Os valores de flecha obtidos são satisfatórios para vãos nivelados a qualquer temperatura e para vãos aproximadamente nivelados de comprimentos semelhantes com condutores operando abaixo de 100°C. Existem programas disponíveis para calcular o erro no valor da flecha quando se deseja aumentar o limite térmico de uma linha existente. A principal fonte de erro está relacionada ao fato de se desprezar o balanço longitudinal da cadeia de isoladores nos tramos com vãos diferentes. No caso de linhas projetadas para operar com altas temperaturas é recomendado adicionar 1 m na distância do condutor ao solo na condição de flecha máxima. Outra limitação deste método está associada a utilização de isoladores *line post*. Em vários casos, estes isoladores podem fazer com que os vãos tenham comportamento equivalente ao de um tramo (MOTLIS, 1999).

Durante o projeto de linha de transmissão, vários fatores limitam a precisão que pode ser obtida no cálculo da flecha, entre eles: o peso incerto do condutor, a flexibilidade das estruturas e o rigidez do condutor. O valor nominal do peso do condutor corresponde ao menor peso admissível, porém, a sua massa normalmente aumenta ligeiramente devido ao efeito *tarnish*, cerca de 0,6%. Além disso, o peso de um condutor úmido pode exceder o peso seco em 2,5%. Também ocorre mudanças na tensão do condutor nas estruturas de ângulo ou fim de linha que causam deflexões elásticas e plásticas na estrutura. Se a deflexão resultante da estrutura for de 1 cm, o aumento na flecha pode ser de até 1,2%. Se a rigidez à flexão dos condutores for considerada, a flecha real em vãos formados por estruturas de suspensão será menor que os valores obtidos nos cálculos, diferença de até 0,9% pode ser obtida (TB324, 2016). POLEVOY (2014) apresentou um modelo para estimar o erro total no cálculo da flecha. O erro absoluto

para um CAA pode ser de até 1,5 m para um vão de 350 m e cerca de 2 m para um vão entre 500 e 600 m. O nível de erro nos dados iniciais tem um impacto diferente no erro de cálculo da flecha total devido à diferente magnitude dos fatores de ponderação. Usar o valor médio constante do módulo de elasticidade, em vez do valor da variável em função da deformação do condutor, leva a apenas um pequeno erro nos cálculos de flecha para temperaturas abaixo de 100 C. O fator de ponderação para erro de fluência é pequeno, então até mesmo 20% de erro na previsão de fluência leva a resultados aceitáveis se os dados restantes tiverem precisão aceitável. A temperatura do condutor e os valores de flecha devem ser medidos com precisão durante as operações de encordoamento devido aos grandes fatores de ponderação para esses erros e seu impacto significativo no erro de cálculo de curvatura total. O erro absoluto do cálculo da curvatura para o condutor ACSR é de cerca de 1,5 m para o intervalo de 350 m e cerca de 2 m para o intervalo de 500–600 m. O erro de curvatura absoluto para o condutor AAAC é inferior em cerca de 25%.

A forma como se projeta linhas de transmissão até hoje é limitada pelas restrições do método do vão regulador. Por exemplo, os vãos de um tramo possuem praticamente o mesmo comprimento e caso seja necessário um vão de comprimento muito diferente ele é transformado em um tramo. Em 2000 foi publicado o método do Vão Regulador Modificado, o qual permite a determinação das tensões e flechas em seções de tensionamento apenas com vãos nivelados de tamanhos diferentes a altas temperaturas através da inclusão do efeito da inclinação da cadeia de isoladores nos cálculos. O equilíbrio da tração horizontal em cada vão é obtido permitindo o movimento do suporte do condutor. O desequilíbrio é eliminado iterativamente para garantir que a tração será a mesma em todos os vãos (KESHAVARZIAN, 2000).

Em 2003, SILVA FILHO apresentou um método para calcular os parâmetros citados em seções de tensionamento com vãos contínuos, nivelados ou não. Possibilitando, também, a análise de situações em que a temperatura do condutor varia ao longo da seção de tensionamento, o que não é possível no caso do método do vão regulador e no método do vão regulador modificado onde a temperatura é única para todos os vãos. Enquanto o método do vão regulador e do vão regulador modificado permite determinar a tração com basicamente uma equação, o método desenvolvido por SILVA FILHO (2003) utiliza um sistema de equações com ordem igual ao número de vãos do tramo. (KIESSLING,2014) também propõem a determinação do cálculo de flechas e trações através de um sistema de equações. Através destes dois modelos é possível determinar a tração do condutor em cada vão e avaliar a ocorrência de temperaturas diferentes em uma mesma seção de tensionamento.

Os valores de flecha e tensão dos condutores aéreos também são influenciados pela fluência desenvolvida durante a vida útil da linha. ALBIZU (2011) apresentou um modelo que a permite o cálculo da flecha e tração considerando a fluência de modo sequencial. Assim, a fluência desenvolvida nas fases anteriores impacta a fluência desenvolvida nas fases subsequentes. Dois períodos são diferenciados no desenvolvimento da fluência: o período de instalação e o período de operação. O método é adequado para modelar o comportamento do condutor, incluindo os vários estágios durante a vida útil da linha. Além disso, permite uma modelagem detalhada do processo de instalação e considera a interação entre a fluência metalúrgica e a acomodação geométrica. Assim, o método calcula a tensão de instalação para novas linhas levando em consideração as condições esperadas durante a vida útil da linha. Além disso, o método também é útil para o cálculo do estado atual das linhas em operação cujas condições históricas de operação são conhecidas. A maioria dos métodos consideram a fluência através de um aumento de temperatura equivalente.

Alguns modelos aumentam a complexidade do equacionamento, como os métodos dos elementos finitos ou probabilísticos, para obter resultados semelhantes aos fornecidos através dos modelos tradicionais. Com base nas imprecisão nos valores das flechas, ABEBE (2015) utiliza o conceito de incerteza para determinar as flechas e trações do tramo. O modelo é baseado na Aritmética Afim (AA) e fornece como saída uma faixa de valores com os possíveis valores de flecha e tração. Quando comparado ao método da Aritmética Intervalar Clássica e ao método de Monte Carlo, o método AA é mais conservador.

O maior ganho de precisão no cálculo das flechas ocorre quando o modelo considera o balanço da cadeia de isoladores e sua rigidez mecânica. Isto permite uma maior diversidade de aplicações, incluindo a utilização de condutores especiais os quais podem operar com temperaturas muito superiores aos 100 °C. A utilização do método do vão regulador e do vão regulador modificado fornece resultados inaceitáveis nesses casos. A Técnica dos Tramos mistos, proposta nessa tese, cria uma necessidade que não é prevista por nenhum dos modelos: a possibilidade de haver mais de um condutor na seção de tensionamento. Deste modo, foi desenvolvido pelo autor um modelo, baseado no descrito em (KIESSLING,2014), para determinação da equação de mudança de estado em seções de tensionamento constituída por vãos nivelados ou desnivelados, iguais ou desiguais, admitindo além de temperaturas diferentes em cada vão, a presença de condutores diferentes no tramo. Com a utilização de condutores especiais também foi necessário desenvolver um modelo para o cálculo da temperatura de *knee point* em cada vão. Na Tabela 4 é apresentada uma síntese do levantamento bibliográfico realizado, destacando os principais trabalhos pesquisados e comparando com o trabalho

desenvolvido. O símbolo “–” indica que o método referido não apresenta a característica apresentada na tabela, o símbolo “✓” indica que o método apresenta a característica apresentada na tabela.

Tabela 4 – Revisão bibliográfica sobre os métodos de cálculo de flecha e tração em linhas de transmissão

	(DWIGHT, 1926)	(KESHAVARZIAN, 2000)	(SILVA FILHO, 2003)	(KIESSLING, 2014)	ALBIZU (2011)	(ABEBE, 2015)	Modelo proposto
Vãos nivelados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vãos pouco desnivelados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vãos desnivelados	–	–	✓	✓	✓	✓	✓
Vãos com comprimentos iguais	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vãos com comprimentos semelhantes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vãos com comprimentos diferentes	–	–	✓	✓	✓	–	✓
Baixas temperaturas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Altas temperaturas	–	–	✓	✓	✓	–	✓
Temperaturas diferentes em cada vão	–	–	✓	✓	–	–	✓
<i>Creep</i> incorporado ao método	–	–	–	–	✓	–	–
Trações diferentes em cada vão	–	–	✓	✓	–	–	✓
Condutores diferentes em cada vão	–	–	–	–	–	–	✓

Fonte: O Autor (2020).

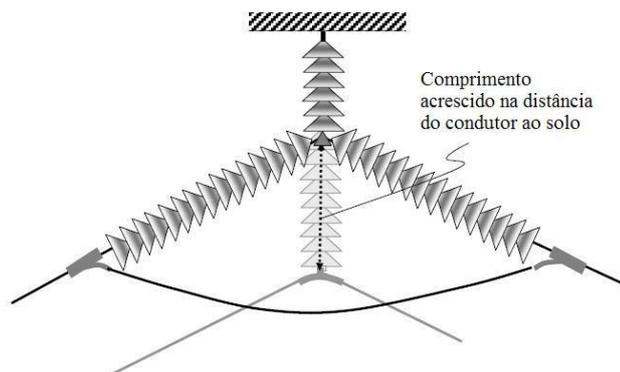
4 MODELOS PROPOSTOS

Na Técnica dos Tramos mistos há a aplicação simultânea de mais de um tipo de condutor em uma mesma seção de tensionamento no qual passa a existir comportamentos elásticos diferentes se os condutores tiverem propriedades físicas, elétricas ou químicas distintas. Todos esses fatores devem ser levados em consideração para determinar as tensões e flechas. Deste modo, foi desenvolvido pelo autor um modelo, baseado no descrito em (KIESSLING,2014), para determinação da equação de mudança de estado em seções de tensionamento constituída por vãos nivelados ou desnivelados, iguais ou desiguais, admitindo além de temperaturas diferentes em cada vão, a presença de condutores diferentes no tramo.

Para garantir o confinamento do condutor especial ao vão com restrições são utilizadas cadeias de falsa amarração, conforme pode ser observado na Figura 12 (BARTHOLD, 2008). O elemento vertical deste conjunto pode ser uma cadeia de isoladores com comprimento igual ou inferior ao da cadeia de suspensão original ou uma haste com comprimento de 0,5 m. Também é possível utilizar uma falsa amarração sem elemento vertical.

A redução no comprimento da cadeia de isoladores de suspensão é definida em função do ganho desejado na distância de segurança. No caso de uma redução parcial do comprimento da cadeia de suspensão, todo o conjunto sofreria um deslocamento com a variação de estado da linha e o peso dos isoladores da falsa amarração deve ser levado em consideração nos cálculos. Esta técnica é aplicável em situações pontuais e deve ser assegurado que os esforços mecânicos no tramo alterado não serão superados no caso de queda de uma das torres do mesmo. Vale ressaltar que essa situação de contingência é atenuada pelas estruturas de suspensão através da movimentação das suas cadeias de isoladores. No caso da conversão total da cadeia de suspensão em ancoragem não haverá mais deslocamento e a estrutura terá que suportar os esforços longitudinais resultantes.

Figura 12 – Conversão de uma cadeia de isoladores de suspensão em uma cadeia de falsa amarração



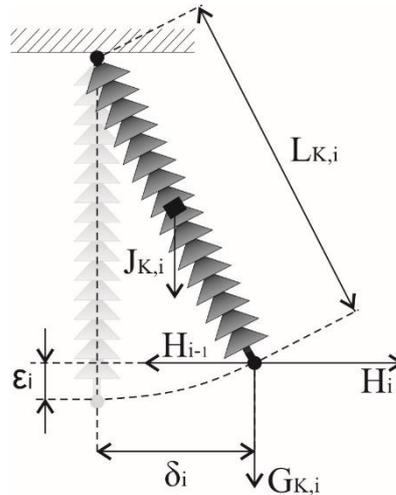
Fonte: BARTHOLD (2008).

A correção da distância do cabo ao solo empregando condutores especiais nos vãos com restrições pode requerer que os vãos adjacentes possuam uma folga em suas distâncias ao solo dependendo do arranjo da suspensão ancorada utilizado. Com a utilização de um elemento vertical na cadeia de falsa amarração haverá um ganho na distância do condutor ao solo no vão com condutor especial, porém ocorre uma redução nestas distâncias nos vãos adjacentes. Isto ocorre devido ao condutor especial possuir um peso inferior aos dos cabos utilizados tradicionalmente. Sem elemento vertical o comportamento mecânico do condutor especial fica restrito ao seu vão e a variação na distância dos cabos ao solo dos vãos adjacentes se deve a elevação do ponto de suspensão dos condutores. No próximo tópico será descrito o modelo matemático para determinação das tensões e flechas através da Técnica dos Tramos mistos (TTM).

4.1 EQUAÇÃO GERAL DE MUDANÇA DE ESTADO PARA CÁLCULO DAS FLECHAS E TRAÇÕES

Em vãos adjacentes com comprimentos desiguais uma variação no estado inicial, seja por mudança de temperatura, efeito do vento ou camada de neve sob os condutores, provoca o deslocamento longitudinal da cadeia de isoladores de suspensão de sua posição original, como mostrado na Figura 13 (KIESSLING,2014). O mesmo fenômeno ocorre com a aplicação de condutores diferentes nos vãos adjacentes à cadeia.

Figura 13 – Forças atuantes em uma cadeia de isoladores de suspensão e deslocamento horizontal e vertical da sua posição de equilíbrio inicial.



Fonte: KIESSLING (2014).

A análise dos esforços atuantes sobre a cadeia de isoladores de suspensão, representados na Figura 13, possibilita a determinação do seu deslocamento horizontal (δ_i) e vertical (ϵ_i) através de (4.1) e (4.2) (KIESSLING,2014).

$$\delta_i = \frac{(H_i - H_{i-1})L_{k,i}}{\sqrt{G_{k,i}^2 + (H_i - H_{i-1})^2}}. \quad (4.1)$$

$$\epsilon_i = \left[1 - \frac{G_{k,i}}{\sqrt{G_{k,i}^2 + (H_i - H_{i-1})^2}} \right] L_{k,i}. \quad (4.2)$$

Em que:

δ_i deslocamento horizontal do i-ésimo suporte [m];

ϵ_i deslocamento vertical do i-ésimo suporte [m];

H_i tração horizontal no vão à direita do i-ésimo suporte [kgf];

H_{i-1} tração horizontal no vão à esquerda do i-ésimo suporte [kgf];

$G_{k,i}$ esforço vertical no ponto de suspensão dos condutores dos vãos adjacentes ao i-ésimo suporte [kgf];

$L_{k,i}$ comprimento da cadeia de isoladores do i-ésimo suporte [m].

O esforço vertical no ponto de suspensão dos condutores dos vãos adjacentes ao i-ésimo suporte ($G_{k,i}$) é constituído pela contribuição do peso da cadeia de isoladores e pelo esforço

vertical devido ao peso dos condutores destes vãos, podendo ser calculado através da expressão (4.3) (KIESSLING,2014). Os valores de x_i , L_i e h_i podem ser obtidos aplicando (4.4), (4.5) e (4.6).

$$G_{k,i} = \frac{J_{k,i}}{2} + X_{i-1}H_0 \sinh \left[\frac{p_i(a_{i-1} + x_{i-1})}{X_{i-1}H_0} \right] - X_iH_0 \sinh \left[\frac{p_ix_i}{X_iH_0} \right], \quad (4.3)$$

$$x_i = \frac{H_i}{p_i} \ln \left[\frac{H_i}{p_i(L_i - h_i)} \left(1 - e^{-\frac{p_i}{H_i}a_i} \right) \right], \quad (4.4)$$

$$L_i = \sqrt{h_i^2 + \left[\frac{2H_i}{p_i} \sinh^2 \left(\frac{p_i}{2H_i a_i} \right) \right]}, \quad (4.5)$$

$$h_i = \frac{2H_i}{p_i} \sinh \left[\frac{p_i}{2H_i} (a_i + 2x_i) \right] \sinh \left[\frac{p_i}{2H_i a_i} \right]. \quad (4.6)$$

- $J_{k,i}$ peso da cadeia de isoladores do i-ésimo suporte [kgf];
 p_i peso do condutor por unidade de comprimento relativo ao i-ésimo vão [kgf/m];
 a_{i-1} vão a jusante do i-ésimo suporte [m];
 a_i vão a jusante do i-ésimo suporte [m];
 X_i razão entre a tração horizontal no condutor do i-ésimo vão e a tração inicial ;
 X_{i-1} razão entre a tração horizontal no condutor do (i-1)-ésimo vão e a tração inicial H_0 ;
 x_i abscissa no apoio A em relação ao vértice do i-ésimo vão [m];
 x_{i-1} abscissa no apoio A em relação ao vértice do (i-1)-ésimo vão [m];
 H_0 tração horizontal inicial do condutor [kgf].

Caso o vão a_i de uma seção de tensionamento seja limitado por duas estruturas de suspensão, a mudança de estado provoca uma variação no seu comprimento (Δa_i) e em seu desnível (Δh_i), dados por (4.7) e (4.8). As variáveis $\delta_{0,i}$ e $\varepsilon_{0,i}$ representam o deslocamento inicial da cadeia de isoladores, que pode ser diferente ou igual a zero (posição vertical).

$$\Delta a_i = (\delta_{i+1} - \delta_{0,i+1}) - (\delta_i - \delta_{0,i}). \quad (4.7)$$

$$\Delta h_i = (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{0,i+1}) - (\varepsilon_i - \varepsilon_{0,i}). \quad (4.8)$$

A equação para o cálculo do comprimento do condutor (L_i) é expressa em termos de uma função hiperbólica que pode ser desenvolvida como uma série exponencial, resultando em:

$$L_i = L_{0,i}(1 + \bar{L}_i), \quad (4.9)$$

onde as variáveis $L_{0,i}$ e \bar{L}_i são:

$$L_{0,i} = \sqrt{a_i^2 + h_i^2}, \quad (4.10)$$

$$\bar{L}_i = \frac{a_i^2}{L_{0,i}^2} \left[\frac{a_i^2 p_i^2}{24H_0^2} + \frac{a_i^4 p_i^4}{720H_0^4} \right] - \frac{a_i^4}{L_{0,i}^4} \left[\frac{a_i^4 p_i^4}{1152H_0^4} \right]. \quad (4.11)$$

A variação $\Delta L_{0,i}$ do comprimento $L_{0,i}$ entre o estado inicial e final é obtida por:

$$\Delta L_{0,i} = L_{02,i} - L_{01,i} = \sqrt{(a_i + \Delta a_i)^2 + (h_i + \Delta h_i)^2} - \sqrt{a_i^2 + h_i^2}. \quad (4.12)$$

A expressão acima pode ser aproximada por:

$$\Delta L_{0,i} \cong \frac{a_i \Delta a_i + h_i \Delta h_i}{L_{0,i}}. \quad (4.13)$$

O deslocamento do isolador altera o comprimento dos vãos e as condições dos condutores nos vãos adjacentes. Considerando que o vão a_i sofre uma dilatação térmica e elástica, assumindo que na condição inicial todos os isoladores estão na posição vertical e a tração horizontal em todos os vãos é igual a H_0 , obtém-se:

$$L_{2,i} = L_{1,i} + L_{1,i} \alpha_i (T_{2,i} - T_{1,i}) + L_{1,i} \frac{(\bar{S}_{2,i} - \bar{S}_{1,i})}{(E_i S_i)}. \quad (4.14)$$

As tensões $\bar{S}_{1,i}$ e $\bar{S}_{2,i}$ são descritas como:

$$\bar{S}_{2,i} = \frac{H_2 L_2}{a_i}. \quad (4.15)$$

$$\bar{S}_{1,i} = \frac{H_1 L_1}{a_i}. \quad (4.16)$$

Em que:

H_1 tração horizontal do condutor na condição 1 [kgf];

H_2 tração horizontal do condutor na condição 2 [kgf].

Como está sendo proposta uma abordagem da equação de mudança de estado para condutores diferentes em uma mesma seção de tensionamento, considera-se que o condutor do vão a_i possui módulo de elasticidade E_i , coeficiente de dilatação térmica α_i , seção transversal S_i , na condição inicial está a uma temperatura $T_{1,i}$ e na condição final a uma temperatura $T_{2,i}$. Substituindo (4.9), (4.15) e (4.16) em (4.14):

$$\begin{aligned} L_{02,i}(1 + \bar{L}_{2,i}) &= L_{01,i}(1 + \bar{L}_{1,i}) + L_{01,i}\alpha_i(1 + \bar{L}_{1,i})(T_{2,i} - T_{1,i}) \\ &+ \frac{L_{01,i}(1 + \bar{L}_{1,i})}{a_i E_i S_i} [L_{02,i}(1 + \bar{L}_{2,i})X_i H_0 - L_{01,i}(1 + \bar{L}_{1,i})H_0]. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Na equação anterior a tração horizontal $H_{2,i}$ na condição 2 foi expressa como $X_i H_0$ e na condição 1 a tração horizontal $H_{1,i}$ é igual a H_0 . Desenvolvendo os termos e considerando em seguida que $L_{01,i} \approx L_{02,i} \approx L_{0i}$, obtém-se:

$$\begin{aligned} (\bar{L}_{1,i} - \bar{L}_{2,i}) + (1 + \bar{L}_{1,i}) \frac{L_{0i}}{a_i E_i S_i} [(1 + \bar{L}_{2,i})X_i H_0 - (1 + \bar{L}_{1,i})H_0] \\ + (1 + \bar{L}_{1,i})\alpha_i(T_{2,i} - T_{1,i}) - \frac{a_i \Delta a_i + h_{y_i} \Delta h_{y_i}}{L_{0i}^2} = 0. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Um sistema com n equações para a tração horizontal do condutor $H_{2,i} = X_i H_0$ (i=1, 2, 3, ..., n) pode ser obtido da equação acima, onde n é o número de vãos na seção de tensionamento e cada equação do sistema é expressa por:

$$X_i^4 (K_{1,i} X_i + K_{2,i} - C_i) + (K_{3,i} X_i^2 + K_4) \left(K_{1,i} X_i - \frac{E_i S_i}{H_0} \right) \frac{a_i^2}{L_{0,i}^2} = 0. \quad (4.19)$$

Em (4.19) os seguintes termos são usados:

$$K_{1,i} = (1 + \bar{L}_{1,i}) \frac{L_{0,i}}{a_i}, \quad (4.20)$$

$$K_{2,i} = -(1 + \bar{L}_{1,i})^2 \frac{L_{0,i}}{a_i} + \frac{E_i S_i}{H_0} \bar{L}_{1,i} + \frac{E_i S_i}{H_0} \alpha_i (1 + \bar{L}_{1,i}) (T_{2,i} - T_{1,i}), \quad (4.21)$$

$$K_{3,i} = \frac{a_i^2 p_{2,i}^2}{24H_0}, \quad (4.22)$$

$$K_{4,i} = \frac{a_i^4 p_{2,i}^4}{720H_0^4} - \frac{a_i^2}{L_{0,i}^2} \left[\frac{a_i^4 p_{2,i}^4}{1152H_0^4} \right], \quad (4.23)$$

$$C_i = \frac{E_{c_i} S_i}{H_0 L_{0,i}^2} (a_i M_i + h_i N_i). \quad (4.24)$$

Em (4.24), M_i e N_i podem ser obtidos através das seguintes expressões:

$$M_i = \left[\frac{X_{i+1} - X_i}{\sqrt{\left(\frac{G_{k,i+1}}{H_0}\right)^2 + (X_{i+1} - X_i)^2}} L_{k,i+1} - \delta_{0,i+1} \right] - \left[\frac{X_i - X_{i-1}}{\sqrt{\left(\frac{G_{k,i}}{H_0}\right)^2 + (X_i - X_{i-1})^2}} L_{k,i} - \delta_{0,i} \right]. \quad (4.25)$$

$$N_i = \left[\left(1 - \frac{\frac{G_{k,i+1}}{H_0}}{\sqrt{\left(\frac{G_{k,i+1}}{H_0}\right)^2 + (X_{i+1} - X_i)^2}} \right) L_{k,i+1} - \delta_{0,i+1} \right] - \left[\left(1 - \frac{\frac{G_{k,i}}{H_0}}{\sqrt{\left(\frac{G_{k,i}}{H_0}\right)^2 + (X_i - X_{i-1})^2}} \right) L_{k,i} - \delta_{0,i} \right]. \quad (4.26)$$

A aplicação da equação (4.19) aos n vãos da seção de tensionamento forma um sistema de n equações não-lineares onde as incógnitas são as razões entre as tensões do estado final e inicial (X_i) nos vãos da LT. O sistema de equações pode ser reescrito como:

$$f(X) = \begin{bmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ \vdots \\ f_i(X) \\ \vdots \\ f_n(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ f_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \vdots \\ f_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \vdots \\ f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) \end{bmatrix} = 0. \quad (4.27)$$

Onde $f_i(X)$ corresponde à equação (4.19). A não linearidade destas funções impossibilita a resolução direta do sistema com um número finito de passos. É preciso utilizar um método iterativo. Para encontrar a solução do sistema foi utilizado o método de Newton-Raphson que converge quando a estimativa inicial está próxima da raiz. Admitindo uma estimativa inicial X_0 as próximas iterações do método são descritas como:

$$X_{V+1} = X_V - [F_V]^{-1} f(X_V). \quad (4.28)$$

A matriz F_V representa a matriz Jacobiana de $f(X)$ e pode ser determinada por:

$$F_V(X) = \begin{bmatrix} f_{11}(X) & f_{12}(X) & \dots & f_{1n}(X) \\ f_{21}(X) & f_{22}(X) & \dots & f_{2n}(X) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1}(X) & f_{n2}(X) & \dots & f_{nn}(X) \end{bmatrix}, \quad (4.29)$$

Em que:

$$f_{ik}(X) = \frac{\partial f_i(X_1, \dots, X_n)}{\partial X_k} \quad i, k = 1, 2, \dots, n. \quad (4.30)$$

A tentativa de derivar analiticamente levaria a formulações extensas (mais de cem páginas foram obtidas utilizando o MAPLE[®] apenas para representação de um termo), deste modo a derivada da função $f_i(X)$ em relação a X_k pode ser aproximada por (KIESSLING,2014):

$$f_{ik}(X) = \frac{f_i(X_1, \dots, X_k + p_k, X_n) - f_i(X_1, \dots, X_k - p_k, X_n)}{2p_k}. \quad (4.31)$$

A quantidade p_k representa o elemento do vetor P_k que deve ser selecionado de forma adequada para o comprimento dos passos das iterações.

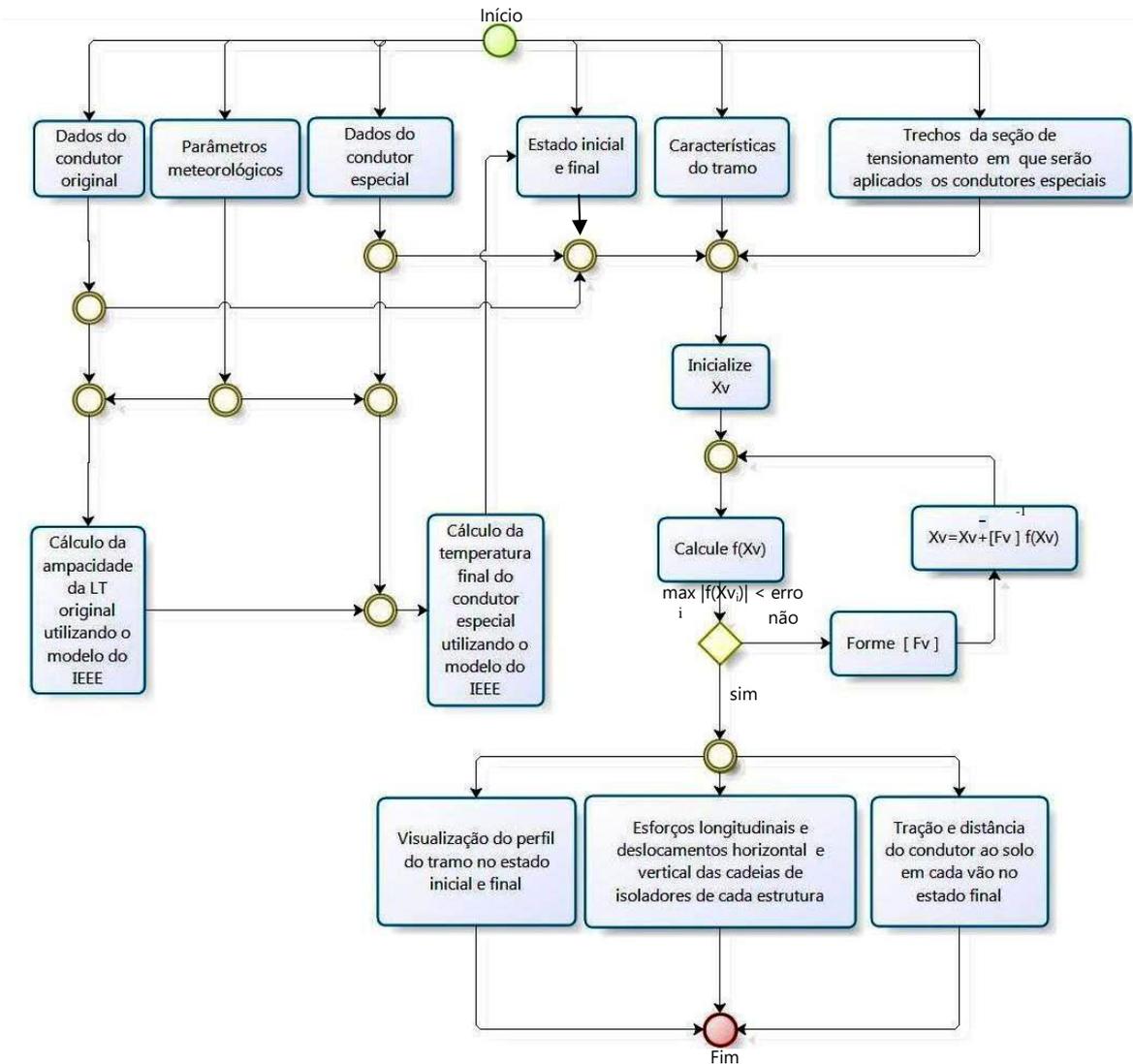
4.1.1 Validação do algoritmo

A partir do método descrito na seção anterior foi desenvolvido um algoritmo em linguagem MATLAB[®] para sua resolução. O usuário deve fornecer as características do tramo (número, comprimento e desnível dos vãos); tipo, comprimento e peso das cadeias de isoladores utilizadas em cada estrutura; temperatura, peso e tração do condutor na condição inicial e final; dados do condutor original e especial; trechos da seção de tensionamento onde o condutor especial será aplicado; parâmetros meteorológicos da região onde a LT está inserida.

A aplicação dos condutores especiais em determinados trechos da seção de tensionamento, sem substituição dos condutores dos outros vãos, pode produzir temperaturas diferentes no mesmo tramo. A temperatura do condutor especial na condição final é determinada através da aplicação do modelo proposto em (IEEE Std 738-2012, 2012), considerando uma corrente igual a ampacidade da LT. Esta temperatura complementa os dados de entrada e possibilita a execução do algoritmo.

Além da tração final em todos os vãos do tramo, o algoritmo disponibiliza como dados de saída as flechas ou distâncias do condutor ao solo no estado inicial e final, os deslocamentos horizontal e vertical de todas as cadeias de isoladores, as variações das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado, os esforços longitudinais nas estruturas e visualização do perfil do tramo no estado inicial e final. Na Figura 14 está representado um diagrama simplificado do algoritmo desenvolvido.

Figura 14 – Diagrama simplificado do algoritmo desenvolvido



Fonte: O Autor (2020).

O principal objetivo do modelo, e grande diferencial em relação aos modelos disponíveis, é a resolução da equação de mudança de estado para tramos que possuem condutores diferentes. No entanto, pode ser perfeitamente utilizado em seções de tensionamento com cabos iguais.

A validação do modelo é realizada através dos exemplos disponíveis na literatura. Um dos mais utilizados para validação foi apresentado pela força tarefa do IEEE com o intuito de avaliar as limitações do método de vão regulador (MOTLIS, 1999), conforme comentado anteriormente. O exemplo de validação consiste em uma seção de tensionamento com as seguintes características:

- condutor: CAA Lawping 45/7;
- temperatura inicial do condutor: 10°C;
- temperatura final do condutor: 100°C;

- tramo: 10 vãos;
- comprimento das cadeias de suspensão: 1,52 m;
- peso da cadeia de suspensão: 54 kgf;
- tração horizontal inicial: 3815 kgf.

Os comprimentos dos vãos estão relacionados na Tabela 5. Na mesma tabela são comparados os resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido com os valores constantes nas referências (DWIGHT, 1926), (MOTLIS, 1999) e (KESHAVARZIAN,2000). A segunda e quarta coluna correspondem aos resultados da aplicação do método do vão regulador e do vão regulador modificado, respectivamente. Na terceira coluna constam as médias dos valores obtidos por seis programas computacionais desenvolvidos por especialistas diferentes, divulgados pela força tarefa do IEEE. Também são apresentados os valores encontrados através do método desenvolvido por pesquisadores do CEPEL. Pode-se constatar através da análise dos dados da Tabela 5 a consonância entre os resultados obtidos utilizando o algoritmo desenvolvido e os resultados disponíveis na literatura para vãos nivelados de comprimentos diferentes a altas temperaturas. Neste caso, a variação máxima entre o modelo proposto e do vão regulador é de 6,3%, já entre o modelo proposto e o do CEPEL a variação máxima é de 1,5%.

Tabela 5 – Flechas do condutor Lawping à temperatura de 100°C em 10 vãos contínuos obtidos por (DWIGHT, 1926), (MOTLIS, 1999), (SILVA FILHO, 2003) e pelo algoritmo desenvolvido

Vão [m]	Flecha [m]				
	Vão regulador (DWIGHT, 1926)	Média de 6 programas (SILVA FILHO,2003)	Vão regulador modificado (MOTLIS,1999)	CEPEL (SILVA FILHO,2003)	Algoritmo desenvolvido
213,4	5,5	5,8	5,8	5,8	5,8
350,5	14,9	15,3	15,2	15,2	15,2
228,6	6,3	6,8	6,7	6,7	6,7
137,2	2,3	2,5	2,4	2,4	2,4
274,3	9,1	9,7	9,6	9,6	9,6
228,6	6,3	6,6	6,5	6,6	6,5
289,6	10,1	10,2	10,1	10,1	10,1
457,2	25,3	23,8	23,6	23,7	23,7
259,1	8,1	8,2	8,1	8,1	8,2
198,1	4,8	4,9	4,9	4,9	4,9

Fonte: O Autor (2020).

Ainda considerando o mesmo exemplo, a Tabela 6 compara os valores das trações horizontais em cada vão obtidos aplicando o método do vão regulador modificado (KESHAVARZIAN,2000) e o algoritmo proposto. Para a análise foram mantidas as unidades

utilizadas no artigo que contém os dados mostrados na tabela citada com o intuito de evitar erros de arredondamento durante a conversão das unidades. A maior diferença entre os valores é inferior a 2%.

Tabela 6 – Tração horizontal em vãos desiguais e nivelados

Vão [m]	Tração horizontal [kgf]	
	Vão regulador modificado	Algoritmo desenvolvido
213,4	2618	2628
350,5	2684	2686
228,6	2603	2592
137,2	2583	2573
274,3	2620	2605
228,6	2663	2660
289,6	2766	2766
457,2	2947	2929
259,1	2759	2713
198,1	2688	2636

Fonte: O Autor (2020).

Já a Tabela 7 compara os valores das trações horizontais em vãos desiguais e desnivelados encontradas pelo método desenvolvido por pesquisadores do CEPEL com os resultados obtidos utilizando o algoritmo desenvolvido. Nos dois casos o erro máximo foi inferior a 1%. Os valores foram calculados para uma seção de tensionamento com as seguintes condições:

- Condutor: CAA Linnet;
- Temperatura inicial do condutor: 25°C;
- Temperatura final do condutor: 70°C e 100°C;
- Tramo: 20 vãos;
- Comprimento da cadeia de suspensão: 2,5m;
- Peso da cadeia de suspensão: 80 kgf;
- tração horizontal inicial: 6393 kgf

Os comprimentos e desníveis dos vãos constam na Tabela 7. Uma análise dos dados da tabela mostra a coerência dos resultados obtidos através do algoritmo para vãos nivelados e desnivelados a altas temperaturas. Para as condições estudadas, o método do vão regulador modificado não poderia ser aplicado, pois os vãos utilizados são desnivelados. A pequena

diferença observada entre os valores de tração contidos na Tabela 7 se deve ao fato que, conforme citado anteriormente, o método do CEPEL considera apenas o deslocamento longitudinal da cadeia de isoladores, enquanto o modelo desenvolvido leva em conta os deslocamentos horizontais e verticais de todas as cadeias. O modelo desenvolvido apresenta a vantagem adicional de possibilitar a aplicações de condutores diferentes em um mesmo tramo. Para aplicações com condutores especiais é preciso determinar a temperatura de *knee point* antes de calcular as trações utilizando o modelo proposto. Com base nestas temperaturas é que se definirá quais parâmetros do cabo utilizar na avaliação eletromecânica, como será discutido no próximo tópico.

Tabela 7 – Tração horizontal em vãos desiguais e desnivelados

Vão [m]	Desnível [m]	Tração Horizontal [kgf]			
		70° C		100°C	
		CEPEL	Algoritmo desenvolvido	CEPEL	Algoritmo desenvolvido
290	-1,7	1017	1020	902	906
310	-3,1	1021	1023	909	911
340	-1,6	1027	1026	918	917
340	3,2	1028	1028	920	918
330	0,2	1025	1026	915	915
280	1,5	1021	1022	908	910
330	-3,3	1023	1023	912	912
310	-4,3	1021	1022	911	911
320	-2,6	1022	1022	912	912
330	0,6	1022	1021	912	911
340	2,9	1018	1018	908	907
310	2,7	1008	1010	893	896
170	3,7	1000	1002	879	884
280	-2,7	1000	1002	883	885
360	-3,9	1005	1004	892	889
290	1,5	994	994	876	874
250	1,3	983	985	859	860
250	-4,2	976	980	849	853
270	-0,4	974	978	846	850
260	-0,4	972	976	844	849

Fonte: O Autor (2020).

4.1.2 Cálculo da temperatura de *knee point* para tramos mistos

O modelo matemático apresentado no tópico anterior pode ser utilizado para calcular a temperatura de *knee point* para vãos isolados ou contínuos, porém não considera a possibilidade de haver condições meteorológicas distintas ao longo da linha nem condutores diferentes em um mesmo tramo. A equação de mudança de estado geral, apresentada no capítulo anterior, pode ser adequada para determinar a temperatura de *knee point* para cada vão em qualquer situação. Substituindo (2.14) em (4.21), pode-se montar um sistema com n equações para a

tração horizontal do condutor $H_{2,i}=X_i H_{0,A}$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$, onde n é o número de vãos na seção de tensionamento) e cada equação do sistema é expressa por:

$$X_i^4 (A_{1,i} X_i + A_{2,i} - B_i) + (A_{3,i} X_i^2 + A_{4,i}) \left(A_{1,i} X_i - \frac{E_{c,i,A} S_{i,A}}{H_{0,A}} \right) \frac{a_i^2}{L_{0,i}^2} = 0 \quad (4.32)$$

Em que:

$$\begin{aligned} B_i(X_{i-1}, X_i, X_{i+1}) &= \frac{E_{c,i,A} S_{i,A} a_i}{H_0 L_{0,i}^2} \left\{ \left[\frac{X_{i+1} - X_i}{\sqrt{(G_{k_{i+1}}/H_{0,A})^2 + (X_{i+1} - X_i)^2}} L_{k_{i+1}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \delta_{0_{i+1}} \right] - \left[\frac{X_i - X_{i-1}}{\sqrt{(G_{k_i}/H_{0,A})^2 + (X_i - X_{i-1})^2}} L_{k_i} - \delta_{0_i} \right] \right\} \\ &\quad + \frac{E_{c,i,A} S_{i,A} h_i}{H_{0,A} L_{0,i}^2} \left\{ \left(1 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{G_{k_{i+1}}/H_{0,A}}{\sqrt{(G_{k_{i+1}}/H_{0,A})^2 + (X_{i+1} - X_i)^2}} \right) L_{k_{i+1}} - \varepsilon_{0_{i+1}} \right] \\ &\quad \left. - \left[\left(1 - \frac{G_{k_i}/H_0}{\sqrt{(G_{k_i}/H_{0,A})^2 + (X_i - X_{i-1})^2}} \right) L_{k_i} - \varepsilon_{0_i} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$A_{1,i} = (1 + \bar{L}_{1,i}) \frac{L_{0,i}}{a_i} + (1 + \bar{L}_{1,i}) \frac{\varepsilon_{t,i}}{(\varepsilon_{t,C} - \varepsilon_{t,A})} \quad (4.34)$$

$$A_{2,i} = -(1 + \bar{L}_{1,i})^2 \frac{L_{0,i}}{a_i} + \frac{E_{c,i,A} S_{i,A}}{H_{0,A}} \bar{L}_{1,i} \quad (4.35)$$

$$A_{3,i} = \frac{a_i^2 (m_{c_{2,i,A}} g)^2}{24H_{0,A}} \quad (4.36)$$

$$A_{4,i} = \frac{a_i^4 (m_{c_{2,i,A}} g)^4}{720H_{0,A}^4} - \frac{a_i^2}{L_{0i}^2} \left[\frac{a_i^4 (m_{c_{2,i,A}} g)^4}{1152H_{0,A}^4} \right] \quad (4.37)$$

$$\bar{L}_i = \frac{a_i^2}{L_{0i}^2} \left[\frac{a_i^2 (m_{c_{i,A}} g)^2}{24H_{0,A}^2} + \frac{a_i^4 (m_{c_{i,A}} g)^4}{720H_{0,A}^4} \right] - \frac{a_i^4}{L_{0i}^4} \left[\frac{a_i^4 (m_{c_{i,A}} g)^4}{1152H_{0,A}^4} \right] \quad (4.38)$$

$$L_{0i} = \sqrt{a_i^2 + h_{y_i}^2} \quad (4.39)$$

$$G_{ki} = \frac{J_{ki}}{2} + X_{i-1} H_{0,A} \sinh \left[\frac{m_{c_{i,A}} g (a_{i-1} + x_{A_{i-1}})}{X_{i-1} H_{0,A}} \right] - X_i H_{0,A} \sinh \left[\frac{m_{c_{i,A}} g x_{A_i}}{X_i H_{0,A}} \right] \quad (4.40)$$

O sistema de n equações pode ser solucionado utilizando o método de Newton-Raphson, do mesmo modo que foi solucionada a equação de mudança de estado geral. Com os valores das tensões em cada vão, pode-se determinar as respectivas temperaturas de knee-point.

A partir do modelo apresentado foi desenvolvido um algoritmo em linguagem MATLAB, através do qual é possível determinar a temperatura de knee-point para todos os vãos de qualquer seção de tensionamento.

Para o estudo de caso foi considerada uma seção de tensionamento com as seguintes características:

- condutor: T-CAA Grosbeak 26/7;
- temperatura inicial do condutor: 25°C;
- comprimento das cadeias de suspensão: 1,52m;
- peso da cadeia de suspensão: 54 kgf;
- tração horizontal inicial: 2213 kgf.

A maioria dos modelos matemáticos utilizam o comprimento do vão regulador para determinar o valor da temperatura de *knee point*, o qual é utilizado para todo o tramo. Esta

aproximação é válida para vãos nivelados de comprimentos iguais ou próximos, como pode ser observado na Tabela 8. A segunda e terceira coluna desta tabela registram os dados de um tramo com 10 vãos idênticos de 200 m e as respectivas temperaturas de *knee point*. O comprimento do vão regulador é idêntico aos dos vãos do tramo, e conseqüentemente a temperatura de *knee point* também será. Na quarta e quinta coluna da Tabela 8, estão registrados os dados de um tramo com 10 vãos nivelados de comprimentos diferentes e as respectivas temperaturas de *knee point*. A temperatura de *knee point* calculada para o vão regulador deste tramo é de 110,1 °C, valor bastante próximo aos obtidos para cada vão. Deste modo, realmente é uma boa aproximação considerar para vãos nivelados de comprimentos iguais ou próximos a temperatura de *knee point* do vão regulador para todo o tramo. Já para vãos desnivelados de comprimentos diferentes, como pode ser observado na Tabela 9, os valores calculados podem divergir bastante do valor encontrado para o vão regulador. No tramo analisado, a temperatura de *knee point* para o vão regulador é de 101,2°C enquanto no vão 5 é de 112 °C. Se o projetista optar por utilizar a temperatura de *knee point* considerando o vão regulador encontrará flechas menores que as reais.

Tabela 8 – Temperatura de *knee point* para vãos nivelados para o cabo T-CAA Grosbeak

Vão	Comprimento [m]	$T_{c_{kpt}}$ [°C]	Comprimento [m]	$T_{c_{kpt}}$ [°C]
1	200	96,5	213,36	107,2
2	200	96,5	350,52	108,1
3	200	96,5	228,6	106,8
4	200	96,5	137,16	106,7
5	200	96,5	274,32	107,4
6	200	96,5	228,6	108,6
7	200	96,5	289,56	110,7
8	200	96,5	457,2	113,7
9	200	96,5	259,08	110,2
10	200	96,5	198,12	108,9
Regulador	200	96,5	304,78	110,1

Fonte: O Autor.

Tabela 9 – Temperatura de *knee point* para vãos desnivelados para o cabo T-CAA Grosbeak

Vão	Comprimento [m]	Desnível [m]	$T_{c_{kpt}} [^{\circ}\text{C}]$
1	290	-1,7	110,7
2	310	-3,1	111,3
3	340	-1,6	112
4	340	3,2	112,2
5	330	0,2	112
6	280	1,5	111,2
7	330	-3,3	111,5
8	310	-4,3	111,4
9	320	-2,6	111,5
10	330	0,6	111,5
11	340	2,9	111,2
12	310	2,7	110,1
13	170	3,7	108,9
14	280	-2,7	109,1
15	360	-3,9	109,8
16	290	1,5	108,3
17	250	1,3	107
18	250	-4,2	106,3
19	270	-0,4	106,1
20	260	-0,4	105,9
Regulador	306,7	-	101,2

Fonte: O Autor (2020).

Também foi realizada uma avaliação da temperatura de *knee point* para a mesma seção de tensionamento do caso anterior com cadeias de suspensão de 1,52m e 54 kg, mas utilizando o cabo ACCR 636 inicialmente tracionado a 20% do valor de ruptura sob uma temperatura de 25°C. Na Tabela 10 estão registrados os resultados obtidos através da aplicação do modelo proposto nesse capítulo e do vão regulador. Devido as propriedades do ACCR o valor da temperatura de *knee point* é inferior a do T-CAA. Como é possível observar através da equação (4.15), quanto maior o módulo de elasticidade da alma e a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica da alma e da coroa do condutor menor será a temperatura de *knee point*. Os valores encontrados utilizando os dois modelos são bastantes próximos, sendo a maior diferença inferior a 1%.

Tabela 10 – Temperatura de *knee point* para vãos desnivelados para o cabo ACCR 636

Vão	Comprimento [m]	Desnível [m]	$T_{c_{kpt}}$ [°C]
1	290	-1,7	54,7
2	310	-3,1	54,7
3	340	-1,6	54,7
4	340	3,2	54,7
5	330	0,2	54,7
6	280	1,5	54,7
7	330	-3,3	54,7
8	310	-4,3	54,6
9	320	-2,6	54,6
10	330	0,6	54,6
11	340	2,9	54,6
12	310	2,7	54,5
13	170	3,7	54,4
14	280	-2,7	54,3
15	360	-3,9	54,3
16	290	1,5	54,3
17	250	1,3	54,2
18	250	-4,2	54,1
19	270	-0,4	54,1
20	260	-0,4	54,1
Regulador	306,7	-	54,5

Fonte: O Autor (2020).

4.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As equações tradicionais que descrevem a relação entre a temperatura, o comprimento do vão e a tração mecânica dos condutores são totalmente válidas para vãos isolados. No caso de vãos contínuos de uma seção de tensionamento seu comportamento mecânico pode ser analisado utilizando o vão regulador, procedimento que não fornece resultados precisos para vãos desiguais com condutores operando a altas temperaturas (MOTLIS,1999). Existem vários métodos que procuram contornar esta limitação. Neste capítulo foi proposto um modelo para cálculo das flechas e tensões em uma seção de tensionamento com condutores diferentes em vãos nivelados ou desnivelados a qualquer temperatura. A vantagem do modelo proposto está na possibilidade de utilizar condutores diferentes em vãos com restrições na altura de segurança., mantendo os demais condutores do tramo. Dentro de uma mesma seção de tensionamento passam a existir comportamentos elásticos diferentes, se os condutores tiverem módulos de elasticidade, coeficientes de variação com a temperatura ou seções transversais distintas. Uma ampla gama de combinações para os condutores disponíveis comercialmente

pode ser avaliada de forma a se obter o maior ganho na distância de segurança. Para aplicações com condutores especiais é preciso determinar a temperatura de *knee point* antes de calcular as trações utilizando o modelo proposto. Com base nestas temperaturas é que se definirá quais parâmetros do cabo utilizar na avaliação eletromecânica, como será discutido no próximo capítulo.

Com o aumento gradual da corrente elétrica em uma LT, e conseqüente elevação da temperatura, o alumínio transmite para a alma do condutor as tensões mecânicas até que seja atingida a temperatura de *knee point*. Acima deste valor de temperatura, o comportamento mecânico da LT passa a ser determinado pelo material que constitui sua alma. Para condutores convencionais o cálculo deste parâmetro não é importante, pois geralmente os valores encontrados estão acima da temperatura de recozimento. Já para condutores especiais (HTLS) é um parâmetro fundamental, visto que estes condutores podem operar a temperaturas superiores à de *knee point*. Calcular essa temperatura utilizando o vão regulador fornece valores razoáveis para vãos nivelados de comprimentos iguais ou próximos, mas valores discrepantes para vãos desnivelados de comprimentos diferentes para condutores T-CAA. Para o cabo ACCR os valores encontrados foram semelhantes utilizando os dois modelos. O modelo matemático apresentado neste capítulo permite calcular a temperatura de *knee point* com maior precisão para seções de tensionamento com vãos iguais ou diferentes, nivelados ou desnivelados, admitindo ainda a possibilidade de condutores diferentes (tramos mistos).

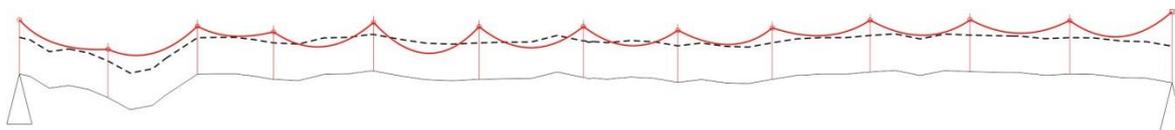
5 MATERIAL E MÉTODOS

A ampliação da capacidade do transporte de energia elétrica tem sido restringida pelo alto custo da construção de novas linhas e as dificuldades de obtenção de novas faixas de servidão com órgãos de licenciamento e a comunidade. Várias soluções têm sido propostas para aumentar a capacidade de condução de corrente das linhas de transmissão (LTs). Entre elas, a utilização de condutores capazes de operar a altas temperaturas com flechas reduzidas, também conhecidos como condutores especiais ou condutores HTLS (*High Temperature Low Sag*).

O surgimento de alturas incorretas dos condutores, devido à imprecisão de projeto e construção ou mudanças nas atividades realizadas sob as LTs, também podem restringir o nível de carregamento elétrico da linha. Neste contexto é proposta uma técnica para correção das alturas aplicando condutores especiais ou de bitolas diferentes apenas nos vãos que apresentem essas incorreções mantendo os demais cabos do tramo. Tais técnicas são bastante úteis também quando se pretende aumentar o limite térmico de uma linha que apresenta restrições em pequenos trechos e folgas no restante da instalação.

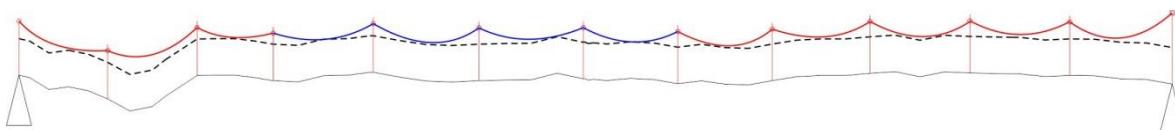
A Figura 15 ilustra um tramo de uma LT onde ocorrem violações em quatro vãos consecutivos. A linha tracejada representa as distâncias de segurança do condutor ao solo. Se o condutor estiver abaixo desta linha há violação dos limites normativos, caso contrário as restrições estão sendo respeitadas. Com a substituição dos condutores apenas nos vãos onde ocorre violação por condutores diferentes, Figura 16, evita-se a montagem de estruturas adicionais em grande escala e o descarte de todo o condutor já instalado, pois corrige a violação de alturas de segurança, que comprometem os limites operacionais dessas linhas de transmissão a um custo significativamente inferior.

Figura 15 – Tramo de uma linha de transmissão com violação das distâncias de segurança em vãos consecutivos



Fonte: O Autor (2020).

Figura 16 – Tramo de uma linha de transmissão onde foram instalados condutores especiais ou de bitolas diferentes (em azul) para correção das violações das distâncias de segurança



Fonte: O Autor (2020).

Para aplicar a técnica supracitada foi desenvolvido um modelo para cálculo das tensões e flechas em uma seção de tensionamento com condutores diferentes em vãos nivelados ou desnivelados a qualquer temperatura (SILVA, 2011). Incluindo situações onde a temperatura do condutor varia ao longo do tramo. Os métodos tradicionais trabalham apenas com uma temperatura para todos os vãos, o que não seria consistente para condutores diferentes, já que para uma mesma corrente existiriam temperaturas desiguais. Há métodos que consideram essa diferença, porém o condutor no tramo é o mesmo. Também foi necessário desenvolver um modelo para cálculo das temperaturas de Knee considerando as mesmas aplicações da equação geral de mudança de estado global. Neste capítulo são apresentados os casos analisados, as restrições identificadas e, finalmente, uma análise dos resultados.

5.1 ESTUDO DE CASOS

A Técnica dos Tramos mistos foi aplicada no sistema de transmissão da Eletrobrás Distribuidora Alagoas através do projeto de pesquisa e desenvolvimento “*Pesquisa de Novas Tecnologias para Repotencialização de Linhas de Sub-transmissão*”. Como citado anteriormente, a técnica pode ser utilizada para aumentar a capacidade de condução de uma LT ou apenas corrigir violações nas distâncias de segurança. No primeiro caso, o maior ganho na capacidade de condução é obtido aplicando condutores HTLS em série com condutores convencionais. Enquanto no segundo caso podem ser empregados condutores convencionais de bitolas diferentes.

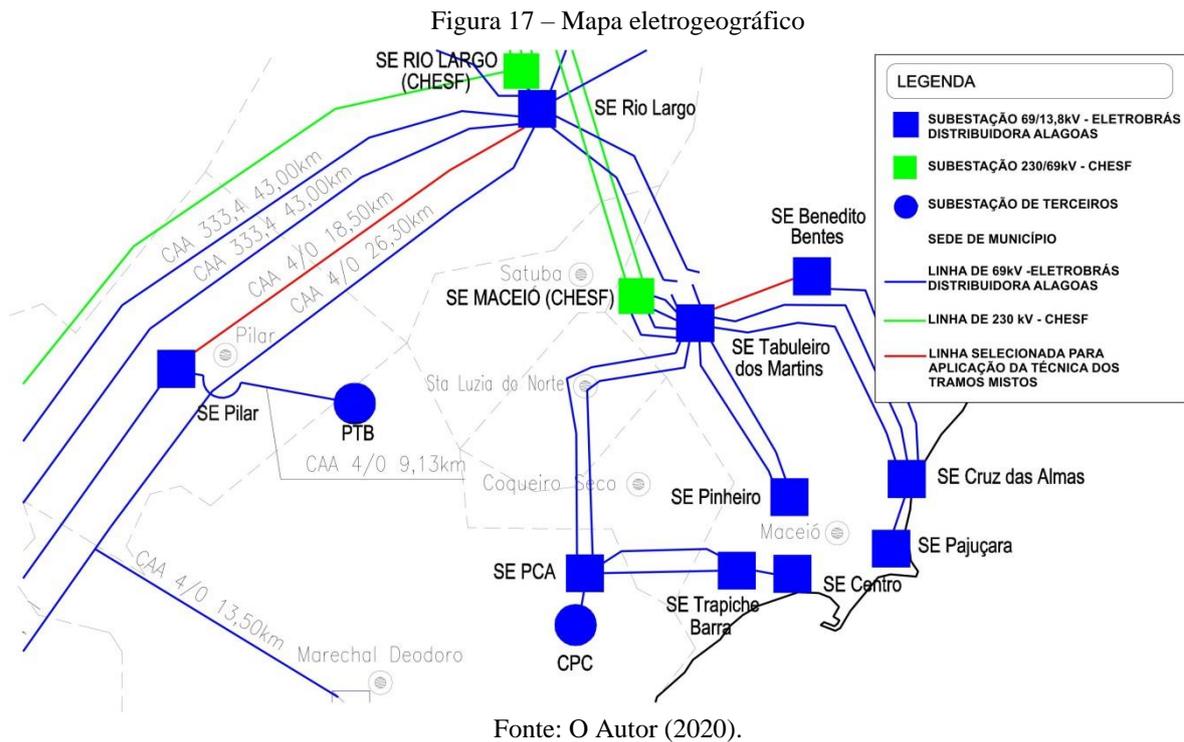
Após diversas análises em conjunto com a equipe técnica da Eletrobrás Distribuidora Alagoas, foram realizados estudos nas linhas de transmissão Tabuleiro dos Martins – Benedito Bentes e Rio Largo – Pilar, representadas por linhas vermelhas na

Figura 17. As características dessas linhas estão descritas na Tabela 11. Esses estudos serão descritos detalhadamente nos próximos subtópicos.

Tabela 11 – Características das LTs Tabuleiro dos Martins – Benedito Bentes e Rio Largo - Pilar

Linha de Transmissão	Tabuleiro dos Martins – Benedito Bentes	Rio Largo – Pilar
Tensão [kV]	69	69
Extensão [km]	6,31	18,5
Condutor	CA Tulip	CAA 4/0 AWG
Data de entrada em operação	11/02/1979	–

Fonte: O Autor (2020).



Para aplicação da Técnica dos Tramos mistos é necessário realizar um levantamento topográfico detalhado da LD, simulação do comportamento eletromecânico com o condutor original, identificação dos vãos críticos, determinação do condutor mais adequado. Quando não for possível executar um levantamento topográfico detalhado, pode-se optar pelo simplificado e após determinar os vãos críticos realizar o levantamento detalhado do tramo do qual esses vãos fazem parte. O novo condutor é definido através da utilização do modelo de ampacidade do IEEE (IEEE Std 738-2012, 2012), e do modelo matemático proposto nesta tese além, além da avaliação econômica.

5.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO SIMPLIFICADO

Os limites de carregamento em linhas aéreas de transmissão devem ser estabelecidos em função do levantamento do estado real da linha de distribuição em estudo, realizado no campo.

Para tanto, foram levantados por vão e por fase os seguintes pontos:

- 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, foram medidas também as distâncias horizontais do ponto à estrutura mais próxima e o comprimento do vão. Também foram registradas a data e hora em que cada ponto foi medido e a temperatura ambiente durante a medição de cada ponto.

Na realização do levantamento de campo simplificado foram utilizados os seguintes equipamentos:

- vara de manobra telescópica de medição, Figura 18, e medidor de altura do condutor, Figura 19;
- medidor de temperatura ambiente;
- trena;
- relógio.

Figura 18 – Vara de manobra telescópica de medição



Fonte: O Autor (2020).

Os dados coletados em campo associados aos valores de corrente elétrica da linha no instante de cada medição possibilitaram a análise do carregamento da linha através do software SICALT, tendo sido tirados importantes indicativos sobre o comportamento eletromecânico da linha. Dentre os resultados obtidos foi direcionado o tramo crítico a ser detalhado, o qual foi objeto de levantamento topográfico minucioso.

Figura 19 – Medidor de altura do condutor por ultrassom



Fonte: O Autor (2020).

5.3 MONITORAÇÃO DOS DADOS APÓS APLICAÇÃO DA TÉCNICA DOS TRAMOS MISTOS

Uma das validações do modelo proposto nesta tese foi realizada através das medições dos dados meteorológicos, obtidos com a estação meteorológica (Figura 20 e 21), e dos dados de corrente e temperatura, adquiridos com o Sensor de Monitoração de Temperatura, SMT (Figura 23). Enquanto o desempenho da estação meteorológica foi satisfatório desde sua montagem, o SMT apresentou uma série de problemas relacionados à cobertura de internet. Como o condutor instalado poderia ficar submetido a trações superiores aos valores estabelecidos em norma foi utilizado um vibrográfo para avaliação da condição do condutor, Figura 22.

Figura 20 – Estação meteorológica



Fonte: O Autor (2020).

Figura 21 – Anemômetro da estação meteorológica



Fonte: O Autor (2020).

Figura 22 – Vibrográfo instalado na linha Rio Largo - Pilar



Fonte: O Autor (2020).

Figura 23 – Sensor de Monitoração de Altura (SMT) instalado na LT Rio Largo - Pilar



Fonte: O Autor (2020).

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 CASO 1: PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DA LT TABULEIRO DOS MARTINS- BENEDITO BENTES

O principal critério para seleção da linha onde seria aplicada a técnica foi sua importância para o sistema de subtransmissão da empresa. Buscou-se uma linha que representasse ou viesse a representar em curto prazo um “gargalo” e que estivesse em área urbana. A primeira condição visava o melhor aproveitamento da tecnologia para a empresa enquanto a segunda procurava garantir que haveria cobertura GPRS para utilização dos equipamentos necessários à aferição da técnica. Diante deste cenário, foi selecionada a LT Tabuleiro dos Martins –Benedito Bentes.

Quando a LT Tabuleiro dos Martins – Cruz das Almas opera em paralelo com outras duas linhas absorve potência em excesso, ocasionando a superação da capacidade térmica da LT Tabuleiro – Benedito Bentes. Para evitar estas restrições operacionais o trecho Benedito Bentes / Cruz das Almas opera em aberto. A linha escolhida também estava próxima a regiões urbanas, o que facilitava a mobilização de infraestrutura para levantamentos e adequações, além de maior acessibilidade aos sistemas de comunicação. Estudos realizados pela Eletrobrás Distribuidora Alagoas indicaram que a elevação do limite térmico da linha de 45°C para 75°C solucionaria o problema.

A plotagem dos dados do levantamento topográfico no PLSCADD® e posteriores análises indicaram os tramos onde ocorriam violações nas distâncias de segurança. A Tabela 12 resume as características destes tramos e respectivas violações encontradas. Na terceira coluna desta tabela estão relacionados os códigos das estruturas da LT no formato X/Y. O primeiro dígito se refere a distância da estrutura ao início da linha em quilômetros e o segundo dígito o número de ordem da estrutura. Por exemplo, a estrutura 2/7 corresponde a sétima estrutura do segundo quilômetro da LT. Estruturas instaladas após o início de operação da linha possuem códigos diferentes.

Para aplicação da técnica é necessário um tramo com no mínimo três vãos, o que possibilitaria o melhor aproveitamento das características dos condutores especiais. Deste modo os tramos entre as estruturas 1*-0/0, 0/0-0/1, 2/1-2/4, 2/7-2/9, 74*-76* e 81*-6/2E foram desconsiderados no estudo.

Tabela 12 – Dados dos tramos com violação das distâncias de segurança

Tramo (Estrutura inicial – estrutura final)	Número de vãos	Estrutura	Violação (m)	Tipo do Obstáculo
1*-0/0	1	1*	-0,71	LD 13,8 kV
0/0-0/1	1	0/0	-0,04	LD 13,8 kV
0/1-0/9	8	0/4	-0,45	LD 13,8 kV
0/9-1/5	9	1/1	-0,02	LD 13,8 kV
		½	-1,04	LD 13,8 kV
1/10-2/1	5	1/12	-1,58	LD 13,8 kV
2/1-2/4	3	2/2	-0,66	LD 13,8 kV
2/7-2/9	2	2/7	-0,90	Ponto no solo
2/10-51*	12	2/10	-3,05	Ponto no solo
		3/6	-1,63	Poste de baixa tensão.
3/11-4/3	5	3/11	-3,73	Árvore
		3/12	-2,48	Árvore
		3/13	-2,70	Árvore
4/4-74*	15	4/8	-0,29	LD 13,8 kV
		5/2	-1,70	Árvore
74*-76*	2	75*	-2,23	LD 13,8 kV
76*-6/2E	5	6/1D	-1,42	Rede de BT
6/2E-82	1	6/2E	-0,89	LD 13,8 kV

Fonte: O Autor (2020).

As maiores violações ocorrem nos tramos entre as estruturas 2/10-51* e 3/11-4/3. O tramo entre as estruturas 3/11-4/3 se mostrou mais atrativo por possuir três vãos consecutivos com violação, porém a correção das alturas a montante da estrutura 3/11 não pode ser realizada com a utilização dos condutores especiais, pois a violação é bem maior que a flecha do condutor no respectivo vão. O mesmo problema foi identificado no vão à montante da estrutura 2/10. Nestes casos, seria mais apropriado analisar a possibilidade de empregar estruturas maiores.

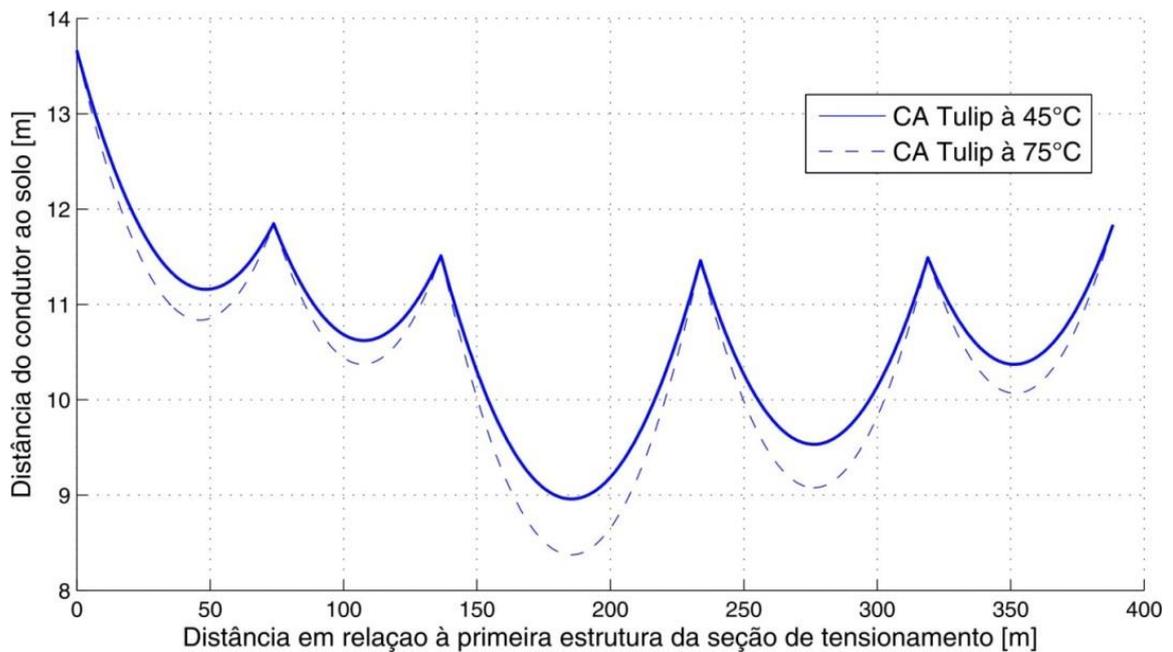
O tramo 1/10-2/1 possui violação da distância de segurança no vão central, permitindo o melhor aproveitamento das características do condutor especial, motivo pelo qual foi escolhido para estudo. Quando submetido às características meteorológicas da região, as quais estão especificadas na Tabela 13 e considerando o limite térmico de 45°C a corrente que percorre o cabo CA Tulip será de 200 A. A Figura 24 mostra a variação das distâncias do condutor ao solo no tramo 1/10-2/1 para as temperaturas de 45°C e 75°C.

Tabela 13 – Condições para cálculo de ampacidade

Latitude	-9,6°
Longitude	-35,7°
Altitude	4 m
Emissividade	0,9
Coefficiente de absorção	0,9
Velocidade do vento	1 m/s
Direção do vento	90°
Temperatura ambiente	30 °C

Fonte: O Autor (2020).

Figura 24 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido à mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CA Tulip

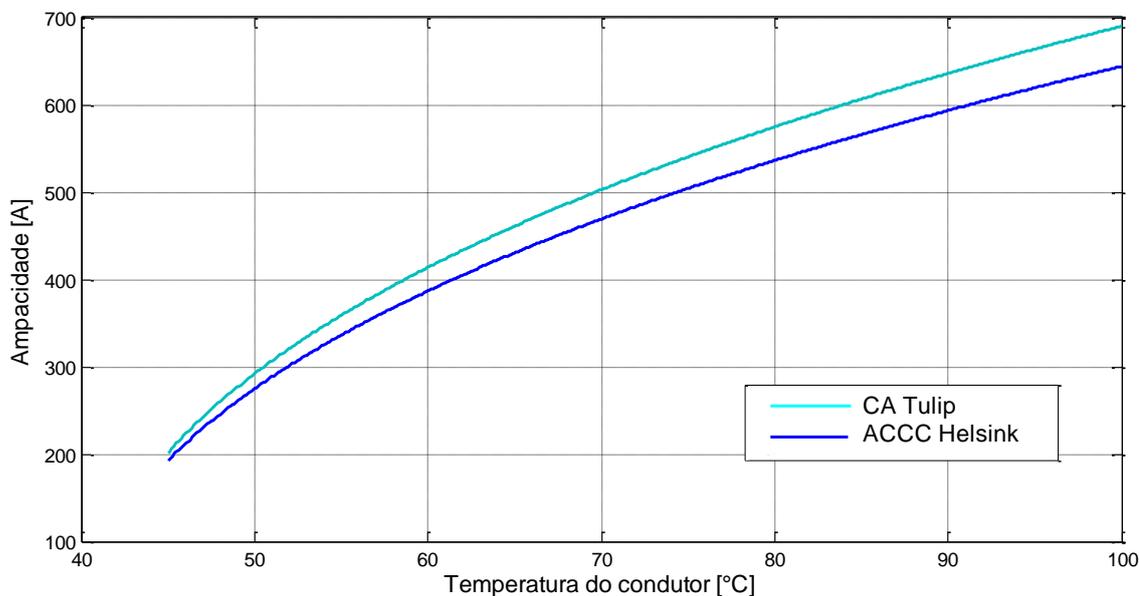


Fonte: O Autor (2020).

A corrente no condutor especial será a mesma que percorre o cabo CA Tulip, porém sua temperatura será diferente. O cálculo destas temperaturas foi realizado utilizando o modelo do IEEE (IEEE Std 738-2006,2007) (SILVA, 2012). Entre os condutores especiais que podem fornecer o maior ganho na capacidade de condução de corrente, quando utilizados na TTM, se destacam como mais promissores os cabos de alumínio com alma de compósito (ACCC) e os cabos de alumínio com alma de óxido de zinco (ACCR) (SILVA, 2009). Porém, os cabos disponíveis comercialmente não possuíam as características necessárias para se obter o ganho desejado. A Figura 25 ilustra a variação da ampacidade com a temperatura para os cabos CA

Tulip e ACCC Helsink. O mesmo procedimento foi aplicado para determinar a corrente que circula no CA Tulip a 75°C e a temperatura dos condutores especiais sob esta corrente.

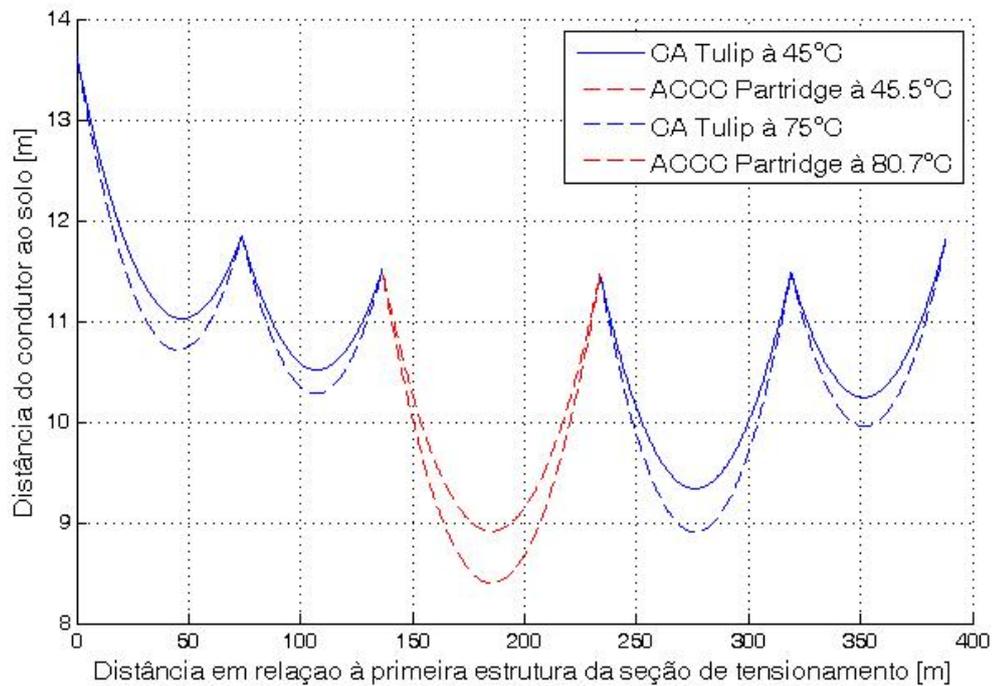
Figura 25 – Variação da ampacidade com a temperatura do condutor



Fonte: O Autor (2020).

Mesmo com o cabo ACCC Partridge, condutor com menor bitola produzido pela CTC, a redução na distância do condutor ao solo não seria suficiente para corrigir a violação do vão. Pode-se verificar através da Figura 26 que o valor da violação permaneceu praticamente inalterado. Técnicas convencionais como remanejamento de estruturas e podas de árvores se mostraram eficazes para solucionar grande parte das violações encontradas. Nos demais casos a substituição das estruturas por outras de altura superior ou elevação das cruzetas eliminariam as restrições. Na Tabela 14 estão registradas as correções necessárias para aumentar a temperatura de projeto para 75°C.

Figura 26 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido à mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CA Tulip e ACCC Partridge



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 14 – Correções necessárias para viabilizar a operação da linha a 75°C

Vão de Frente das Estruturas	Tipo do Obstáculo	Correção Indicada
Não identificada	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
0/0	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
0/4	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
1/1	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
1/2	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
1/12	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
2/2	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
2/7	Ponto no Solo	Elevar a cruzeta em 20 cm das estruturas 2/5 e 2/6
2/10	Ponto no Solo	Substituição da Estrutura 2/8 por outra de altura útil 2,00 m superior.
3/6	Poste de Baixa Tensão	Remanejamento
4/8	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
5/2	Árvore	Cortar ou podar ou elevar a estrutura 5/3
Y-AR Não identificada	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento
6/1D	Cabo Rede de BT	Remanejamento
6/1D	Cabo Rede de BT	Remanejamento
6/2E	Cabo LD 13,8kV	Remanejamento

6.2 CASO 2: PROJETO DE RECAPACITAÇÃO DA LT RIO LARGO – PILAR

Com a experiência adquirida no caso da LT Tabuleiro dos Martins – Benedito Bentes foi selecionada a linha Rio Largo – Pilar, a qual se encontra em área predominantemente rural e possui condutor com alma de aço, o que implica em vãos maiores e condutor com maior peso respectivamente.

Essa linha pode ser dividida basicamente em três trechos com características típicas. Os primeiros oito quilômetros da linha se encontram em uma região formada por várias grotas. Como a intenção do estudo é corrigir violações nas distâncias entre o condutor e o solo, não foi necessário coletar os dados topográficos neste trecho da linha. Conforme ilustrado na Figura 27 não há violação dos limites normativos nestas circunstâncias.

Entre as estruturas 10/1 e 16/3 a linha atravessa um denso canavial, registrado na

Figura 28. No trecho final da linha há uma invasão, representada na Figura 29, violando claramente os valores estabelecidos na NBR 5422 (ABNT, 1985). Essas invasões merecem tratamentos especiais da empresa os quais fogem ao escopo da análise.

Figura 27 – Estrutura 8/3 da linha de distribuição Rio Largo-Pilar



Fonte: O Autor (2020).

Figura 28 – Trecho da linha de distribuição Rio Largo-Pilar (à esquerda)



Fonte: O Autor (2020).

Figura 29 – Invasão sob a linha de distribuição Rio Largo-Pilar



Fonte: O Autor (2020).

Restrições orçamentárias impossibilitaram o levantamento topográfico detalhado completo da linha. Como alternativa foi realizado um levantamento simplificado, o qual fornece uma forte indicação dos vãos críticos e permite a validação do modelo proposto através da instalação dos cabos especiais ou de bitolas diferentes em vãos específicos. Os dados coletados em campo, associados aos valores de corrente elétrica da linha no instante de cada medição, possibilitaram a análise do carregamento da linha através do software Simulação de Carregamento de Linhas de Transmissão (SICALT) (BEZERRA, 1998b). Os resultados encontrados indicaram o tramo onde seria realizado o levantamento topográfico detalhado reduzindo deste modo os custos envolvidos. Embora sirva para validar o modelo proposto, não é possível recomendar a repotencialização da LT. Para isso seria necessário realizar um levantamento topográfico detalhado. As simulações no SICALT foram realizadas considerando os seguintes parâmetros:

- condutor CAA 4/0 (Penguin);
- tensão: 69 kV;
- velocidade do vento: 1 m/s;
- temperatura ambiente: 30 °C;
- transparência atmosférica: 0,9;
- tensão de esticamento inicial: 20% da tração de ruptura;
- limite térmico: 50 °C;
- tempo de operação da linha: 25 anos;
- vão básico: 200 m.

Na Tabela 15 está contido um resumo dos dados medidos durante o levantamento topográfico simplificado e na Tabela 16 está registrado o resultado das simulações obtido a partir do SICALT. As estruturas utilizadas nos tramos possuem duas fases na cruzeta inferior e uma fase na cruzeta superior. A fase B não é representada na tabela, pois foi considerada como sendo a fase superior e com o aumento da temperatura do condutor ocorre primeiramente a violação nos condutores das fases inferiores.

Tabela 15 – Dados do levantamento simplificado

Estrutura	Vão (m)	Hora	Temp. Amb. (°C)	Alturas (m)			Distância a estrutura mais próxima (m)			Corrente (A)
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
010/1	151,7	14	28,5	6,6	9,1	7,2	75,5	75,5	75,5	79,8
010/2	146,0	12	30,1	6,6	8,7	6,6	73,0	73,0	73,0	84,3
010/3	192,7	12	30,1	6,2	7,6	5,5	96,3	96,3	96,3	75,1
010/4	201,4	12	29,5	7,7	7,1	7,0	100,7	100,7	100,7	75,1
010/5	191,2	12	29,6	6,3	8,3	6,2	95,6	95,6	95,6	97,4
011/1	191,7	11	29,7	6,4	8,5	6,4	95,8	95,8	95,8	97,4
011/2	180,7	11	29,0	7,9	10,0	7,8	90,3	90,3	90,3	98,2
011/3	186,7	11	28,8	5,7	8,6	6,3	93,3	93,3	93,3	98,2
011/4	189,0	11	29,9	5,9	8,6	6,3	94,5	94,5	94,5	98,2
011/5	190,0	11	29,5	5,2	7,5	5,2	85,0	85,0	85,0	103,8
012/1	192,0	11	28,4	7,1	8,5	8,4	96,0	96,0	96,0	103,8
012/2	196,0	11	27,9	8,0	7,8	7,9	98,0	98,0	98,0	101,7
012/3	92,0	11	27,4	9,3	10,2	9,2	46,0	46,0	46,0	101,7
012/4	208,7	10	27,6	7,2	9,0	7,4	104,3	104,3	104,3	104,3
013/1	182,7	10	28,5	5,1	7,3	5,3	91,3	91,3	91,3	101,7
013/2	153,7	10	28,5	6,6	8,6	6,6	76,8	76,8	76,8	101,7
013/3	184,0	10	29,3	6,1	7,0	6,0	92,0	92,0	92,0	101,7
013/4	160,7	10	28,8	6,9	8,8	6,9	80,0	80,0	80,0	100,6
013/5	179,7	10	29,3	6,1	8,1	6,0	89,8	89,8	89,8	100,6
014/1	177,7	17	25,9	6,9	9,0	6,9	88,8	88,8	88,8	80,7
014/2	182,0	17	26,1	6,4	8,5	6,2	91,0	91,0	91,0	97,7
014/3	170,7	16	26,4	6,2	8,1	5,9	85,0	85,0	85,0	102,8
014/4	155,7	16	27,8	6,4	8,4	6,1	77,8	77,8	77,8	105,2
014/5	206,4	15	29,1	6,5	8,7	6,6	103,2	103,2	103,2	112,2
014/6	205,7	15	30,4	5,8	8,1	5,9	102,8	102,8	102,8	109,8
015/1	170,0	15	31,6	6,1	8,4	6,2	85,0	85,0	85,0	109,7
015/2	190,0	15	34,1	8,0	8,8	7,6	95,0	95,0	95,0	109,7
015/3	172,7	13	32,9	6,1	8,0	5,9	86,0	86,0	86,0	112,8
015/4	200,0	13	33,5	7,1	9,3	7,2	100,0	100,0	100,0	115,5
015/5	204,7	13	34,0	5,4	7,6	5,4	102,3	102,3	102,3	115,5
016/1	197,0	13	33,6	5,8	8,0	5,9	98,5	98,5	98,5	115,2
016/2	175,0	13	36,1	6,3	8,3	6,2	87,5	87,5	87,5	114,9
016/3	216,0	13	34,8	7,6	9,2	7,9	108,0	108,0	108,0	111,1
016/3	216,0	13	38,2	2,3	4,0	2,1	23,5	23,5	23,5	111,1
016/4	236,7	11	33,0	5,3	6,6	5,0	1,1	1,1	1,1	131,7

Fonte: O Autor (2020).

Com os dados medidos em campo e posterior análise no programa Sicalt foi escolhido o tramo entre as estruturas 10/2 e 12/3 para aplicação da técnica. O critério de escolha foi o

maior número de violações consecutivas superiores a 1 m. Os vãos das estruturas 11/3, 11/4 e 11/5, sombreados na Tabela 16 satisfazem esta condição. Para uma análise mais precisa foi realizado o levantamento topográfico completo do tramo supracitado.

Tabela 16 – Dados dos tramos com violação das distâncias de segurança

Tramo (Estrutura inicial – estrutura final)	Número de vãos	Estrutura	Violação a 50°C (m)	
			Fase A	Fase C
10/2 - 12/3	11	010/3	-0,5	-1,2
		010/5	-0,4	-0,5
		011/1	-0,3	-0,3
		011/3	-1,0	-0,4
		011/4	-0,8	-0,4
		011/5	-1,5	-1,5
12/4 - 16/4	21	013/1	-1,7	-1,5
		013/3	-0,6	-0,7
		013/5	-0,6	-0,7
		014/2	-0,5	-0,7
		014/3	-0,6	-0,9
		014/4	-0,3	-0,6
		014/5	-0,3	-0,2
		014/6	-1,0	-0,9
		015/1	-0,6	-0,5
		015/3	-0,5	-0,7
		015/5	-1,2	-1,2
		016/1	-0,8	-0,7
016/2	-0,2	-0,3		
16/5 - 17/2	4	016/6	-1,2	-1,2

Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 17 registra os dados das estruturas do trecho escolhido. Além da topografia do terreno e das alturas das estruturas também foram medidas três distâncias do condutor ao solo de todos os vãos. Deste modo foi possível determinar a tração a qual a linha está submetida, aproximadamente 515 kgf a 50 °C. Como o trecho escolhido se encontra em área de canalial foi utilizado o valor de 7,0 m como distância de segurança. Estes dados associados à topografia do terreno serviram de base para as simulações realizadas no PLS-CADD®, a partir das quais foram obtidos os valores das violações em cada vão, conforme ilustrado na Tabela 18. A técnica para correção das distâncias de segurança proposta está direcionada para situações em que ocorrem violações em vãos consecutivos. Diante disto, foram escolhidos os vãos com maior violação para aplicação do condutor especial, os quais se encontram entre as estruturas 10/4 e

11/2 (valores em vermelho na Tabela 18). A Figura 30 ilustra o tramo escolhido para aplicação da técnica a uma temperatura de 50°C e a Figura 31 mostra os vãos onde será aplicação da técnica. Um exame da Tabela 18 permite verificar a ocorrência de violações em quase todos os vãos do tramo. Vale ressaltar que a proposta do estudo é validar a metodologia para correção das distâncias de segurança utilizando tramos mistos. Deste modo e diante da escassez de recursos financeiros três vãos é um número suficiente.

Tabela 17 – Dados das estruturas do trecho da LT 69 kV Rio Largo – Pilar escolhido para correção das distâncias de segurança

Número da estrutura	Vão (m)	Cota (m)	Progressiva (m)	Nome da Estrutura	Tipo	Tração (kgf)	Temperatura do condutor (°C)
9/3	270	200	0,000	HAL - 9/3	A	515	50
10/1	150	217,85	271,104	TAR - 10/1	S		
10/2	170	213,78	420,182	TAR - 10/2	S		
10/3	146	218,24	590,892	TAR - 10/3	S		
10/4	191	217,26	736,336	TAR - 10/4	S		
10/5	201	218,87	927,352	C-600/15 - 10/5	S		
11/1	200	217,25	1128,970	TAR - 11/1	S		
11/2	180	217,63	1328,294	TAR - 11/2	S		
11/3	181	216,68	1508,649	TAR - 11/3	S		
11/4	186	217,27	1689,044	TAR - 11/4	S		
11/5	191	218,67	1875,862	TAR - 11/5	S		
12/1	191	218,74	2066,500	TAR - 12/1	S		
12/2	195	218,26	2257,243	TAR - 12/2	S		
12/3	–	216,61	2452,745	HAL - 12/3 - 1000/15	A		

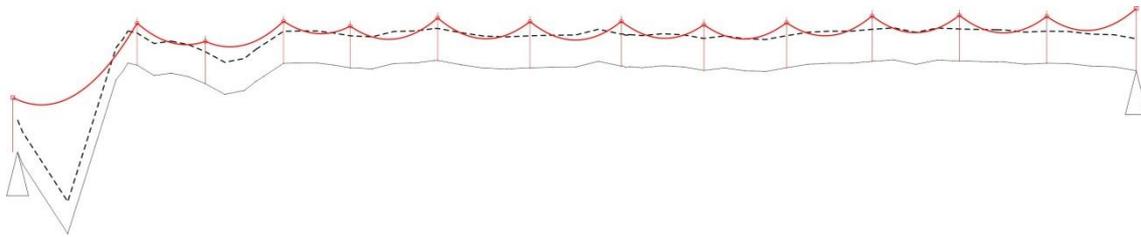
Fonte: O Autor (2020).

Tabela 18 – Dados das estruturas do trecho da LT 69 kV Rio Largo – Pilar escolhido para correção das distâncias de segurança

Estrutura	Violação (m)	Condição da plotação	Ponto Crítico	Natureza da região	Progressiva do Ponto Crítico (m)
9/3	-1.64	Flecha na condição operacional de 50°C	P-4	Canavial	225.08
10/1	-0.33		P-7		345.65
10/3	-0.56		P-14		663.73
10/4	-1.66		P-17		831.82
10/5	-0.57		P-21		1028.00
11/1	-1.33		P-25		1278.30
11/2	-0.99		P-30		1418.60
11/3	-0.03		P-33		1598.70
11/4	-0.97		P-36		1782.20
11/5	-0.13		P-38		1923.50
12/1	-0.65		P-43		2162.20

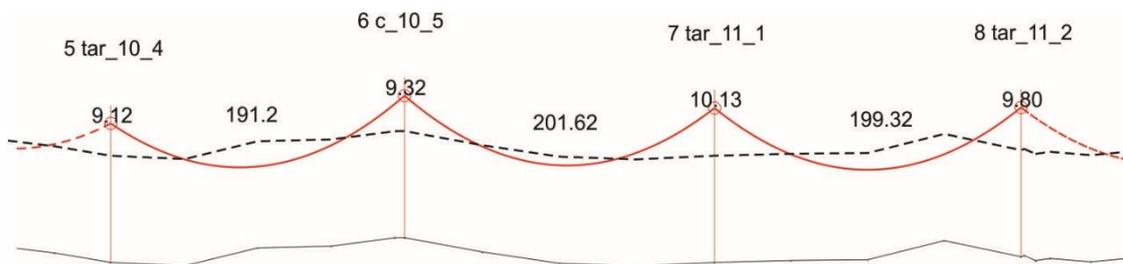
Fonte: O Autor (2020).

Figura 30 – Tramo da linha Rio Largo Pilar escolhido para aplicação da técnica de correção das distâncias de segurança



Fonte: O Autor (2020).

Figura 31 – Vãos escolhido para aplicação da técnica de correção das distâncias de segurança



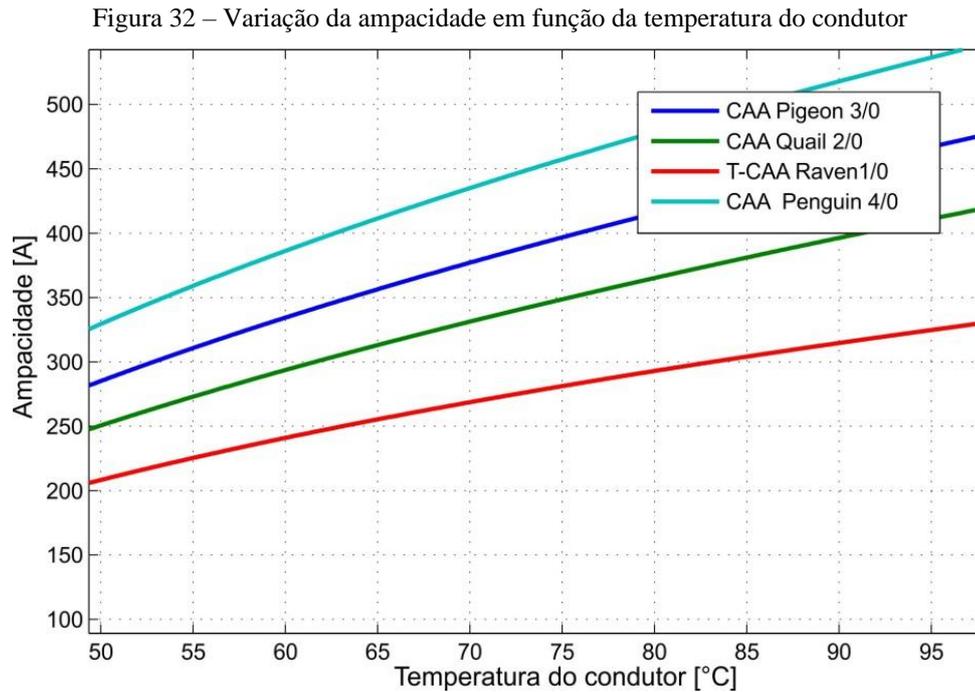
Fonte: O Autor (2020).

Os vãos escolhidos a partir das simulações no PLS-CADD diferem da solução proposta quando foram analisados os resultados do SICALT. Dois fatores contribuíram para a ocorrência de tal discrepância: a tração empregada no SICALT foi considerada igual a 20% do valor de ruptura, valor diferente da atual tração na linha para a mesma temperatura, e a numeração das estruturas de amarração utilizadas no Sicalt não correspondem à numeração encontrada no levantamento detalhado. A função do levantamento simplificado foi fornecer uma estimativa das violações das distâncias de segurança. Objetivo que foi alcançado mesmo sem o conhecimento correto da tração atual da linha e divergências entre os dados das estruturas fornecidos pela Eletrobrás Distribuidora Alagoas e dados de campo.

Semelhantemente ao primeiro caso, os cabos ACCC e ACCR disponíveis comercialmente não forneceram os ganhos necessários para aplicação da técnica. Deste modo, não foi necessário calcular os valores das temperaturas de *knee point*. A solução encontrada foi utilizar condutores termorresistentes ou de bitolas diferentes, disponíveis comercialmente nas mais diversas bitolas. Fato que facilitou a escolha do condutor mais apropriado para aplicação da técnica proposta.

Para avaliação da técnica foram analisados os cabos CAA Quail, CAA Pigeon e T-CAA Raven. Esses condutores serão percorridos pela mesma corrente, aproximadamente 330 A, porém suas temperaturas serão desiguais devido à diferença de diâmetro. Quanto menor o

diâmetro do cabo maior será a temperatura do condutor. A Figura 32 mostra a variação da corrente elétrica em função da temperatura do condutor. Para uma corrente de 330 A, valor correspondente ao limite térmico da linha de 50°C sob as condições típicas da região, a temperatura do CAA Quail será de 69 °C, do CAA Pigeon de 59 °C enquanto a do cabo T-CAA será de 97 °C.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 33, a Figura 34 e a Figura 35 ilustram a utilização dos cabos CAA Pigeon 3/0, CAA Quail 2/0 e T-CAA Raven 1/0, respectivamente, associados aos cabos CAA Penguin 4/0. O ganho na distância do cabo ao solo em cada vão foi avaliado utilizando como referência as cotas dos pontos críticos, obtidas através do PLS-CADD e registradas na primeira coluna da Tabela 19, mais sete metros devido à distância de segurança. Um valor acima da cota de referência significa que os valores de segurança normativos estão sendo respeitados.

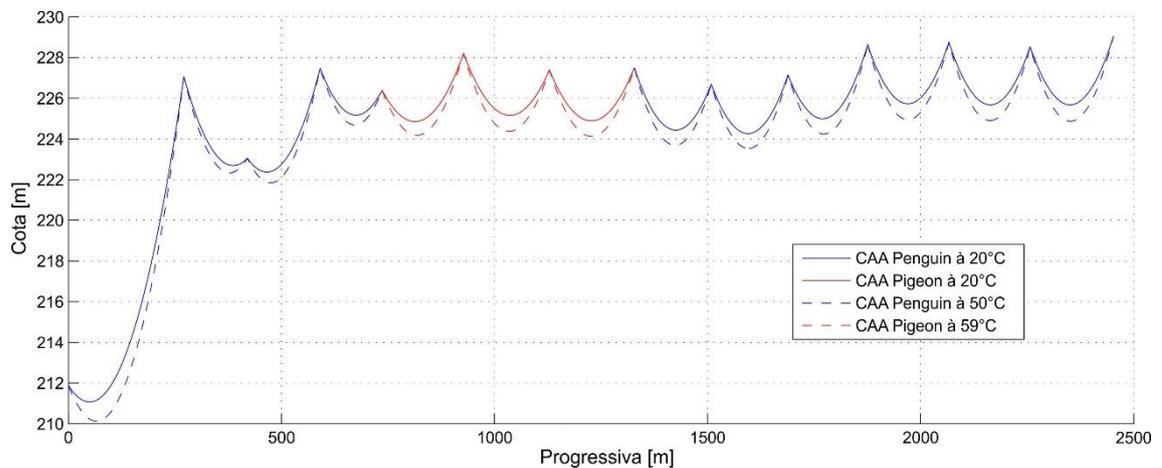
Dos três casos estudados, o que apresentou melhor resultado foi a associação entre os cabos CAA Penguin e T-CAA Raven. Enquanto o primeiro opera a 50 °C, o segundo estaria a 97 °C. Como o cabo termorresistente pode operar em regime contínuo a 150 °C sem que haja deterioração de suas propriedades mecânicas, a solução pode ser empregada.

Tabela 19 – Dados das estruturas do trecho da LT 69 kV Rio Largo – Pilar escolhido para correção das distâncias de segurança

Referência	PENGUIN T-RAVEN	PENGUIN QUAIL	PENGUIN PIGEON
221,6	220,1	220,2	220,3
223,1	222,5	222,7	222,8
222,4	223,8	224	224,1
225,3	224,4	224,6	224,7
225,2	225	224,7	224,1
224,2	225,2	224,8	224,2
225,6	225,6	225,3	224,9
224,7	223,2	223,4	223,7
223,6	223,1	223,3	223,5
225,2	223,9	224,1	224,3
225,9	225,6	225,7	225,9
225,5	224,6	224,7	224,9
224,6	224,6	224,7	224,9

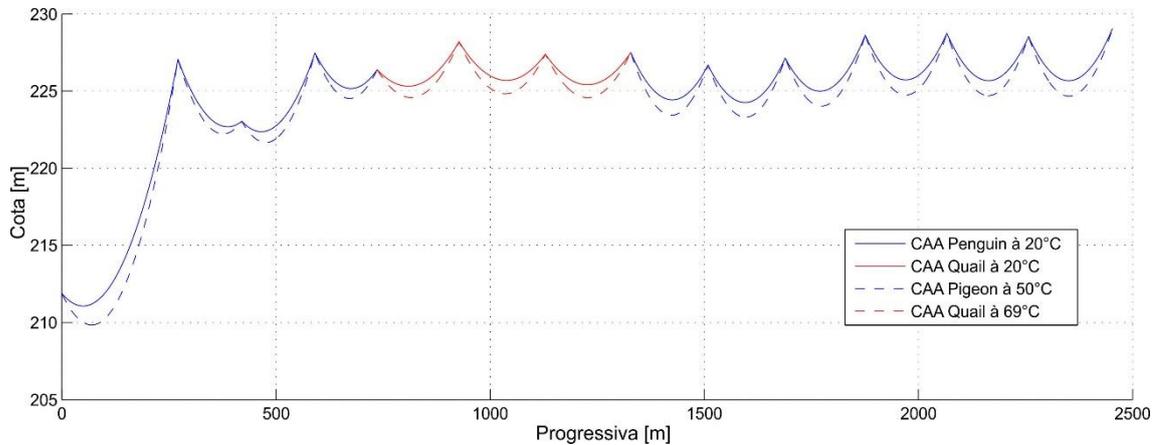
Fonte: O Autor (2020).

Figura 33 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CAA Penguin e CAA Pigeon



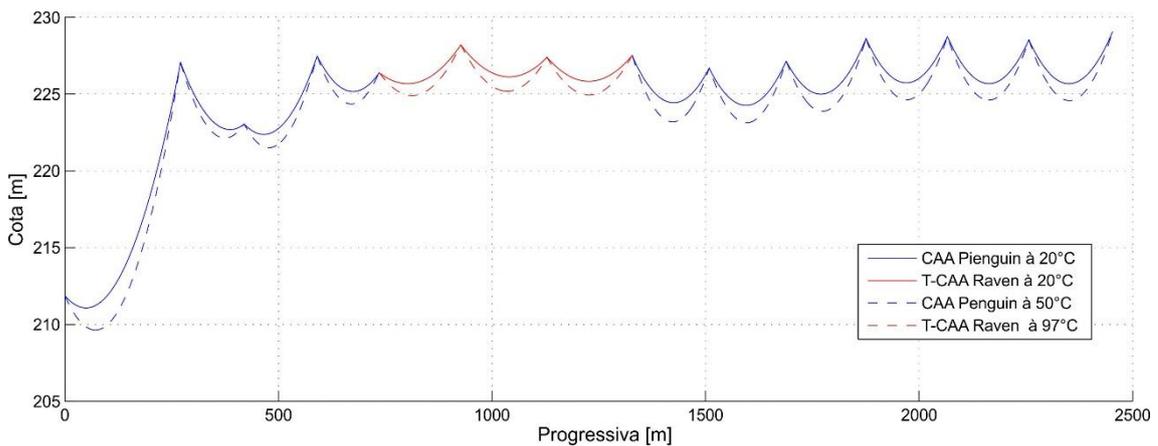
Fonte: O Autor (2020).

Figura 34 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CAA Penguin e CAA Quail



Fonte: O Autor (2020).

Figura 35 – Variação das distâncias do condutor ao solo devido a mudança de estado em uma seção de tensionamento constituída por cabos CAA Penguin e T-CAA Raven



Fonte: O Autor (2020).

A associação entre os cabos CAA Penguin e CAA Quail produz ganhos menores, mais relativamente próximos dos valores obtidos quando foi aplicado o cabo T-CAA Raven. Como o cabo CAA Quail opera a uma temperatura inferior a do cabo termorresistente, torna-se desnecessário o uso de ferragens especiais. A tração de ruptura deste cabo também é superior a do T-CAA Raven, logo as taxas de trabalho são menores. Diante do que exposto, foi escolhido o cabo CAA Quail para instalação nos vãos entre as estruturas 10/4 e 11/2 da linha de distribuição Rio Largo-Pilar. O ganho na altura do condutor ao solo poderia ainda ser ampliado utilizando uma falsa amarração com comprimento vertical reduzido, conforme ilustrado na Figura 12.

. Ressalta-se a robustez da metodologia uma vez que foi possível escolher um condutor CAA tradicional de menor bitola para compor o tramo misto desejado.

O tramo misto projetado foi montado em maio de 2012 por uma equipe própria da Eletrobras Distribuidora Alagoas (atualmente pertencente ao grupo Equatorial), caracterizando a facilidade e flexibilidade da solução concebida, a qual dispensou consultorias especializadas e ferragens específicas na sua implementação, caso os condutores especiais tivessem sido escolhidos. Nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38 encontram-se registradas as montagens realizadas.

Visualmente o comportamento da solução ficou dentro das expectativas. A fim de consolidar ainda mais a solução concebida, o trecho experimental está sendo monitorado em tempo real, quanto às condições meteorológicas reinantes na região, temperatura do condutor, corrente elétrica e vibrações eólicas eventualmente existentes.

Figura 36 – Montagem das cadeias de isoladores



Fonte: O Autor (2020).

Figura 37 – Lançamento do condutor para posterior fixação



Fonte: O Autor (2020).

Figura 38 – Cadeia do final do tramo já montada



Fonte: O Autor (2020).

A solução encontrada para o estudo de caso caracteriza a robustez da tecnologia desenvolvida, pois levou ao uso de um condutor convencional de bitola menor, que, mesmo

operando a uma temperatura mais alta que o condutor original, não ultrapassa suas restrições físicas. Outros casos podem levar à aplicação de condutores de HTLS, que também são considerados no modelo proposto. Não foi necessário calcular os valores de campo eletromagnético, ruído audível e radiointerferência para o caso da LT Rio Largo – Pilar por se tratar de aplicação para correção das distâncias do condutor ao solo, mas devem ser calculados no caso de aumento da capacidade de condução.

6.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Além da Técnica dos Tramos mistos foi analisada a possibilidade de corrigir as violações das distâncias do condutor ao solo da LD 69 kV Rio Largo – Pilar através do retracionamento e recondutoramento. Na Tabela 20 estão registrados os valores das cotas do tramo avaliado para diversos aumentos de tração. Conforme mencionado nos tópicos anteriores, os valores em vermelho representam violações. Na primeira coluna estão os valores das cotas de referência, posição na qual os condutores não apresentam violações na distância de segurança. Na segunda coluna encontram-se as cotas do condutor original da linha antes da aplicação da Técnica dos Tramos mistos; é possível observar que ocorre violação em praticamente todos os vãos do tramo. A terceira e quarta coluna registram os valores das cotas associados a um aumento da tração equivalente a 20 e 30% da tração de ruptura do condutor, respectivamente. Outra alternativa analisada foi a substituição do condutor do tramo por um CAA Quail acompanhada de um retracionamento. Mesmo com o aumento de tração ainda ocorre superação dos limites normativos nos quatro cenários. Além de não obter o ganho desejado, o retracionamento ainda possuía como restrição a condição do condutor que já se encontrava em final de vida útil.

Também foi proposta a substituição do condutor CAA Penguin pelo CAL Alliance, o qual possui características elétricas e mecânicas semelhantes ao primeiro, mas peso inferior. A Tabela 21 registra a variação da altura do condutor CAL Alliance submetido a 20%, 25% e 30% de sua tração de ruptura. Os valores positivos indicam que houve uma elevação na altura do condutor e os valores negativos uma violação. Como pode ser observado, só não há violação nas distâncias de segurança quando o condutor está submetido a tração de 30% do seu valor de ruptura. Vale ressaltar que a NBR 5422 recomenda a adoção de medidas de proteção contra os efeitos das vibrações eólicas caso as trações nos cabos CAL sejam superiores a 18% do valor de ruptura.

Tabela 20 – Dados do tramos analisado considerando o retracionamento e recondutoramento

Cotas [m]					
Referência	Penguin 50°C (cond inicial 27°C 625 kgf)	Penguin 50°C (cond inicial 27°C 20%TR)	Penguin 50°C (cond inicial 27°C 30%TR)	Quail 69°C (cond inicial 27°C 25%TR)	Quail 69°C (cond inicial 27°C 30%TR)
221,66	220,2	220,8	211,9	220,6	220,9
223,1	222,8	223,1	223,7	222,9	223,1
222,42	224,1	224,4	225	224,2	224,4
225,32	224,7	225	225,6	224,8	225,1
225,21	223,5	224	225	223,7	224,1
224,2	223,6	224,2	225,2	223,8	224,2
225,69	224,3	224,8	225,6	224,5	224,9
224,72	223,7	224,2	225	223,8	224,2
223,61	223,5	224	224,9	223,7	224
225,27	224,2	224,7	225,7	224,4	224,8
225,99	225,8	226,2	226,9	226	226,3
225,56	224,8	225,4	226,3	225	225,4
224,63	224,8	225,4	226,4	225	225,4

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 21 – Variação na altura do condutor CAL Alliance

Variação na altura do condutor [m]		
20% Tr	25% Tr	30% Tr
-0,5	0	0,5
0,2	0,4	0,7
2,2	2,4	2,7
-0,1	0,2	0,4
-0,9	-0,4	0
0,3	0,8	1,3
-0,6	-0,3	0,1
-0,9	0,1	0,5
0,1	1,1	1,4
-0,8	0,2	0,6
0	0,8	1,1
-0,5	0,6	1
0,4	1,5	2

Fonte: O Autor (2020).

A Técnica dos Tramos mistos permite corrigir violações substituindo o condutor apenas em trechos específicos, enquanto no recondutoramento ocorre a substituição do condutor de todo o tramo. Este fato torna a técnica mais atrativa economicamente. Por exemplo, suponha que seja possível corrigir as restrições do tramo analisado no tópico anterior com aplicação da TTM em apenas três vãos. Nesse caso, o custo médio por vão seria de R\$ 9.844,00, enquanto o recondutoramento teria um custo médio por vão de R\$ 16.004,00 conforme detalhamento apresentado na Tabela 22. Com a aplicação da técnica seria obtida uma redução de 85% no valor total para corrigir as violações nas distâncias de segurança.

Tabela 22 – Avaliação econômica da Técnica dos Tramos mistos e recondutoramento

Técnica dos Tramos mistos		Recondutoramento - CAL Alliance	
Condutor CAA 2/0	R\$6.233,00	Condutor CAL Alliance	3 x R\$ 42.141,00
Dois conjuntos de falsa amarração	2 x R\$ 399,91	Estruturas	4 x R\$ 3.898,32
Instalação	40% dos custos com material	Conjunto de amortecimento	3 x R\$ 1.200,00
Custo da solução por fase	R\$9.844,00	Conjunto de amarração	6 x R\$ 499,37
-	-	Instalação	40% dos custos com material
Custo da solução das três fases	R\$29.532,00	Custo total da solução	R\$208.057,00
Custo médio por vão	R\$9.844,00	Custo médio por vão	R\$16.044,00

Fonte: O Autor (2020).

Admitindo que fosse necessário a aplicação de quatro conjuntos de falsa amarração na TTM para eliminar as restrições, o custo médio por vão seria de R\$ 8.907,76 e expandindo a técnica para os 11 vãos com a utilização de 2 conjuntos de falsa amarração o custo médio por vão seria de R\$ 7.642,44, como registrado na Tabela 23. Comparando com o recondutoramento utilizando o cabo CAA Alliance a redução nos custos seria de 44% e 52% respectivamente. Com o recondutoramento utilizando o condutor CAA 2/0 o custo total seria de R\$ 124.192,00, conforme Tabela 24. Neste caso há uma redução de 40% nos custos totais.

Tabela 23 – Avaliação econômica da Técnica dos Tramos mistos

Técnica dos Tramos mistos			
Condutor CAA 2/0	R\$ 77.916,00	Condutor CAA 2/0	R\$ 68.566,00
Quatro conjuntos de falsa amarração	12 x R\$ 399,91	Dois conjuntos de falsa amarração	6 x R\$ 399,91
Instalação	40% dos custos com material	Instalação	40% dos custos com material
Custo da solução das três fases	R\$ 115.800,90	Custo da solução das três fases	R\$ 99.351,00
Custo médio por vão	R\$ 8.907,76	Custo médio por vão	R\$ 7.642,44

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 24 – Avaliação econômica da Técnica dos Tramos mistos e recondutoramento

Recondutoramento - CAL Alliance	
Condutor CAA 2/0	R\$ 77.916,00
Estruturas	2 x R\$ 3.898,32
Conjunto de amarração	6 x R\$ 499,37
Instalação	40% dos custos com material
Custo total da solução	R\$ 124.192,00
Custo médio por vão	R\$ 9.553,26

Fonte: O Autor (2020).

A Técnica dos Tramos mistos apresentou um custo médio por vão inferior ao recondutoramento nos três cenários avaliados, consolidando-se como uma excelente opção na

correção de violações de distâncias de segurança. Para cada linha é necessário realizar o estudo comparativo das técnicas de correção. No tramo analisado, o retracionamento era inaplicável em função da vida útil da linha, mas pode ser uma opção caso não haja comprometimento mecânico.

7 CONCLUSÃO

As pesquisas desenvolvidas permitiram a incorporação de um novo modelo para cálculo das flechas e trações em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, considerando o uso de diferentes cabos condutores em um mesmo tramo. Ao considerar o deslocamento das cadeias de isoladores e sua resistência, o modelo possibilita a aplicação a vãos nivelados ou desnivelados, com comprimentos iguais ou diferentes, a quaisquer temperaturas. A principal vantagem do modelo proposto está na possibilidade de utilizar condutores diferentes em vãos com restrições na altura de segurança, mantendo os demais condutores do tramo. Dentro de uma mesma seção de tensionamento passam a existir comportamentos elásticos diferentes, se os condutores tiverem módulos de elasticidade, coeficientes de variação com a temperatura ou seções transversais distintas. Uma ampla gama de combinações para os condutores disponíveis comercialmente pode ser avaliada de forma a se obter o maior ganho na distância de segurança. Devido a possibilidade de utilizar condutores especiais foi desenvolvido um modelo para determinar a temperatura de *knee point* antes de calcular as trações utilizando o modelo proposto.

A aplicação da técnica denominada “Tramos Mistos” permite resolver diversos problemas de alturas de condutores, representando uma alternativa bastante promissora para solucionar demandas crescentes de recapitação de linhas aéreas de transmissão. Porém possui algumas limitações. Por exemplo, para conseguir um ganho nas alturas dos condutores é necessário que os novos que serão aplicados tenham um peso inferior ao existente na linha. Quando os atuais condutores possuem um peso reduzido, pode não haver condutor com bitola disponível comercialmente que proporcione os ganhos necessários. Outra limitação é o número de vãos do tramo, este precisa possuir mais de três vãos.

A metodologia foi testada na linha de 69 kV, operando no sistema de distribuição da Eletrobrás Alagoas Energia, entre os municípios de Rio Largo e Pilar, no estado de Alagoas, Brasil. Os estudos de caso demonstraram significativa competitividade econômica, quando comparado com soluções convencionais.

A aplicação desta tecnologia, nestes estudos de casos, levou a diferentes soluções. Economicamente, para a solução proposta, seria possível replicar a seção especificamente analisada para mais situações semelhantes, e certamente existentes na linha. Para esta consideração, o custo total seria consideravelmente menor do que substituir o condutor por um novo de maior bitola, o que resultaria nas mesmas restrições operacionais existentes. Foi obtida uma redução de até 85% nos custos totais em um dos cenários analisados.

A solução encontrada para o estudo de caso caracteriza a robustez da tecnologia desenvolvida, pois levou ao uso de um condutor convencional de bitola menor, que, mesmo operando a uma temperatura mais alta que o condutor original, não ultrapassa suas restrições físicas. Outros casos podem levar à aplicação de condutores de HTLS, que também são contemplados no modelo proposto.

Situações similares às estudadas são rotineiramente encontradas no sistema elétrico, demonstrando assim que a solução proposta representa uma grande contribuição para corrigir a capacidade de inúmeras linhas de transmissão. A solução também pode ser adaptada para expandir a capacidade de transmissão quando se pretende projetar a solução final de maneira a permitir que os condutores operem a uma temperatura mais elevada do que a do projeto original.

Verifica-se, portanto, que o trabalho está intrinsecamente voltado para a concepção de um novo modelo que, em sua aplicabilidade final, se destaca a expansão da capacidade de transmissão do sistema elétrico nacional, incorporando ganhos sociais e ambientais de grande envergadura

7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalho futuro pode ser realizado o aprofundando dos estudos e coleta de dados para aplicação de processos probabilísticos e refinar avaliações econômicas entre os modelos de recapacitação para escolha da melhor técnica.

REFERÊNCIAS

3M. 3M™ Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR) Technical Summary. Disponível em: https://www.3m.com/3M/en_US/power-transmission-us/resources/accr-technical/. Acesso em: 10 abr 2020.

ABEBE, Yoseph Mekonnen; RAO, P. Mallikarjuna. Overhead transmission line sag, tension and length calculation using affine arithmetic. In: **2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)**. IEEE, 2015. p. 211-216.

ABNT. NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - Procedimento. 1985.

ALBIZU, I. et al. Aspects to take into account in the application of mechanical calculation to high-temperature low-sag conductors. **IET generation, transmission & distribution**, v. 4, n. 5, p. 631-640, 2010.

ALBIZU, I.; MAZON, A. J.; FERNANDEZ, E. A method for the sag-tension calculation in electrical overhead lines. **International Review of Electrical Engineering**, v. 6, n. 3, p. 1380-1389, 2011.

ALBIZU, I., MAZÓN, J., ZAMORA, I. Methods for Increasing the Rating of Overhead Lines. **IEEE Russia Power Tech**. p.1-6, jun. 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4524481&isnumber=4524335>. Acessado em: 01 fev 2019.

ANEEL. Editais de Transmissão da ANEEL. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/transmissao4>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BASSI, Fabio et al. A novel HTLS thermo-mechanical model: applications to Italian OHTL. In: **International Council on Large Electric Systems (CIGRE Session 2016)**. CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques), 2016

BARTHOLD, Lionel O.; DOUGLASS, Dale E.; WOODFORD, Dennis A. Maximizing the capability of existing AC transmission lines. **CIGRE**, 2008.

BHATTARAI, R. et al. Voltage uprating of overhead transmission lines. In: IEEE. *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*. [S.l.], 2010. p.1–6.

BEZERRA, J. M. B, JUNIOR, O. R, CABRAL, L., MESQUITA, E. Recapacitação de Linhas de Transmissão. Análise Técnico-econômica. Cotejamento entre Custos e Benefícios. In: SIMPÓSIO DE PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS, 1998.

BEZERRA, J. M. B., AMARAL, W. L. S., JUNIOR, O. R. Limites de Carregamento de Linhas de Transmissão. Definição e Expansão. Curso de Extensão Universitária. UFPE, 1998.

BEZERRA, J. M. B.; PESSOA, A.; JUNIOR, O. R. et al. Aplicação de Técnicas de LPNE em Linhas de Distribuição. *Eletricidade Moderna*. v. 11, n. 400, p. 186-195, Jul. 2007.

BRAGA. G. E. A Experiência da Cemig na Instalação de Cabos Condutores Aéreos para Altas Temperatura de Operação - Aspectos Construtivos, de Segurança e Confiabilidade das Linhas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 25, 2019, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, MG, 2019.

BRAGA, E.; VEIGA, D.; MOREIRA, S. Upgrading and refurbishment of an energized transmission line. p. 459–465, 1993.

COMPANHIA de Transmissão de Energia Elétrica Paulista utiliza o ACCR para recapacitação de linha de transmissão na travessia do Rio Paraná. *Fator Brasil*, 24 Mar. 2004. Disponível em: http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=71731. Acesso em: 15 set. 2020.

CTC. Disponível em: <<https://www.ctcglobal.com/project-map/>>. Acesso em: 30 de out. de 2020.

DWIGHT, H. B. Sag calculations for transmission lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 45, p. 796-805, 1926.

ESMERALDO, P. C. V., ALEKSANDROV, G. N. *A Proposed Design for the New Furnas 500 kV Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 1, p. 278-286, jan. 1999.

FARMAIN, G. Alumínio Liga 1120 – CAL 1120 para linhas de transmissão e de distribuição. *O Setor Elétrico*. n. 133, p. 82-83, 2017.

GALIANO, D. B. et al. Aplicação de um Circuito Duplo em 230 kV Transformável em um Circuito Simples de 550 kV. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Anais... 1979.

HATASHITA, L. S. et al. Repotenciação da LT 69 Kv Rio Branco do Sul – Tunas Para 138 kV com Retracionamento dos Cabos Singelos CAA 397.5 MCM(Ibis) para 23% da EDS. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Anais... Foz do Iguaçu, PR, 2015.

HOFFMANN J. N., MOLLHOFF F. R. M., JOLANDEK M. A. et al. Condutores de Alumínio liga 1120 e Alternativas de Feixes para 500 kV. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2015. Anais... Foz do Iguaçu, PR, 2015.

IEC Std 60826 – 20003 *Design Criteria of Overhead Transmission Lines*. 2003.

IEEE Std 738M-2012. *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*. (Revision of IEEE Std 738 -2006/ Incorporates IEEE Std 738-2012/Cor1-2013),2012.

INMR. Transmission Utility Re-Designed Insulator Strings to Uprate Thermal Rating of Lines. *INMR*, 17 nov. 2018. Disponível em: <https://www.inmr.com/transmission-utility-re-designed-insulator-strings-to-upgrade-thermal-rating-of-lines/>. Acesso em: 28 set. 2020.

JUNIOR, O. R.; CAVALCANTI, S. J. G.; WAVRIK, J. F. A. G. Recapacitação de Circuitos 230 kV com o conceito de Feixe Expandido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (13.: Out. 1995: Camboriú, Santa Catarina).

JUNIOR, O. R.; BEZERRA, J. M. B.; DOMINGUES, L. A. M. C. et al. A Utilização de Condutores de Liga de Al Termo-resistente na Repotencialização de LT de Transmissão e Sub-transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (15.: Out. 1999: Foz do Iguaçu, Paraná).

KESHAVARZIAN, Mehran; PRIEBE, Charles H. Sag and tension calculations for overhead transmission lines at high temperatures-modified ruling span method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 777-783, 2000

KIESSLING, Friedrich et al. **Overhead power lines: planning, design, construction**. Springer, 2014.

LABEGALINI, Paulo Roberto et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. Editora Blucher, 1992.

LINDSY, K. *et al.* WG B2.13 Guidelines for increased utilization of existing overhead transmission lines. CIGRE, Paris, 2008.

MAMALA, Andrzej et al. An analytical model for the high temperature low sag conductor knee point determination. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 173-180

MOTLIS, Y. et al. Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high operating temperatures. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 549-560, 1999.

NEXANS. Alumínio: Condutores Nus. 2008.

ONS. *Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão. Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão*. 2013.

ORAWSKI, G. Overhead lines – loading and strength the probabilistic approach viewed internationally. **Power Engineering Journal**, v.5, n.5, p. 221-232, set 1991.

PESSOA, L. *Proposta de Tecnologia para Recapacitação de Linhas de Transmissão baseado na Relocação de Estruturas de Concreto*. Dissertação (Mestrado) — UFPE, 2017.

POLEVOY, Alex. Impact of data errors on sag calculation accuracy for overhead transmission line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 5, p. 2040-2045, 2014.

POWER LINE SYSTEMS. *PLS-CADD User Manual*. v. 16. Power Line Systems, 2019, 615 p.

SILVA, A. A. P. *Modelagem para Repotencialização de Linhas de Transmissão através da Aplicação de Condutores Especiais*. Recife, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, A. A. P.; BEZERRA, J. M. B. A model for uprating transmission lines by using HTLS conductors. **IEEE transactions on power delivery**, v. 26, n. 4, p. 2180-2188, 2011.

SILVA, A. A. P.; BEZERRA, J. M. B. Applicability and limitations of ampacity models for HTLS conductors. **Electric Power Systems Research**, v. 93, p. 61-66, 2012.

SILVA, J. B. et al. Aplicação de Critérios Probabilísticos no Reaproveitamento ou Recapacitação de Linhas de Transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 1989.

SILVA FILHO, J. I.; LISBOA, E. F. A.; ESTRELLA JUNIOR L. F. Influência da Variação das Flechas dos Condutores de Vãos Contínuos na Avaliação da Ampacidade Estatística e no

Monitoramento de LTs. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2003, Uberlândia. Anais... Uberlândia, MG, 2003.

STEPHEN, R. et al. AC to DC conversion and Other Techniques to Uprate Transmission Lines Based on Input from Planners In: **CIGRE Session 2008**. CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques), 2008

TB175, CIGRÉ. Management of Existing Overhead Transmission Lines. **CIGRE, Paris**, 2000.

TB178, CIGRÉ. Probabilistic Design of Overhead Transmission Lines. **CIGRE, Paris**, 2001.

TB273, CIGRE. Overhead Conductor Safe Design Tension with Respect to Aeolian Vibrations. **CIGRE, Paris**, 2005.

TB353, CIGRE. Guide for Increased utilization of Existing Overhead Transmission Lines. **CIGRE, Paris**, 2008.

TB324, CIGRE. Sag-Tension Calculation Methods for Overhead Lines. **CIGRE, Paris**, 2016.

WIEDMER, R. S.; JUNIOR, O. H. S.; SILVA, V. P. et al. Recapacitação de Linhas de Transmissão 138 kV Utilizando Cabo de Alumínio Liga 6201. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2007, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, RJ, 2007.

ANEXO A – CABOS UTILIZADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os cabos utilizados nas linhas aéreas de transmissão e subtransmissão são encordoados concêntricos compostos de uma ou mais camadas helicoidais enroladas em sentidos opostos. Com exceção dos cabos de liga de alumínio, eles podem ser divididos em duas seções: uma interna - também conhecida como alma, constituída por um material de elevada resistência mecânica - e outra externa - também denominada coroa, constituída por uma liga de alumínio de alta resistência térmica. Nas Tabelas A1 e A2 são apresentados os principais materiais utilizados nas almas e coroas dos condutores, respectivamente. Cada combinação entre os materiais fornecerá um cabo com comportamento mecânico e elétrico diferente.

Os cabos mais utilizados em linhas de transmissão são os Cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA), compostos por uma alma de aço de alta ou extra alta resistência e coroa de liga de alumínio de têmpera dura. Como a alma do condutor é responsável pelo reforço mecânico, buscou-se desenvolver materiais com maior módulo de elasticidade, menor coeficiente de dilatação térmica e menor peso.

Nesse enfoque, o material mais promissor é a fibra de carbono, no entanto a liga de óxido de alumínio e a liga de invar galvanizado apresentam boas características, como pode ser observado a partir dos dados apresentados na Tabela A1 (NEXANS, 2008) (3M, 2020) (CTC, 2020). Já a inovação em relação aos materiais empregados na coroa está na utilização de ligas de alumínio termorresistentes, as quais permitiu elevar o limite térmico dos cabos de 90°C para até 230°C em regime permanente.

A condutividade desses novos cabos é um pouco inferior, conforme registrado na Tabela A2 (NEXANS, 2008) (3M, 2020) (CTC, 2020), mas essa redução pode ser melhorada pela aplicação de fios compactos. A combinação das excelentes características desses materiais deu origem aos denominados cabos especiais ou cabos HTLS (High temperature Low Sag) capazes de operar a altas temperaturas com flechas reduzidas.

Descrição	Módulo de Elasticidade (GPa)	TS(MPa)	Coefficiente de dilatação linear ($\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}$)	Massa específica (mg/mm^3)
Aço HS	200	1379-1448	11.5	7,778
Aço EHS	200	1517	11.5	7,778
Liga de Invar galvanizada	162	1034-1069	1.5-3.0	7,778
Matriz de óxido de alumínio	215	1310	6.0	3,322
Fibra de carbono	214	4295	1,61	1,938

Fonte: NEXANS (2008), 3M (2020) e CTC (2020).

Tabela A2 – Dados Materiais empregados nas coroas dos cabos das Linhas de Transmissão

Descrição	Nome	%IACS	TS(MPa)	Limite térmico($^{\circ}\text{C}$)	
				Contínuo	<10h
Têmpera dura	1350-H19	61,3	162-172	90	120
Têmpera mole	1350-0	63	55-96	250	250
Termorresistente	TAL	60	165-186	150	180
Ultra termorresistente	ZTAL ou UTAL	60	165-186	200	240
Extra termorresistente	XTAL	58	165-186	230	260

Fonte: NEXANS (2008), 3M (2020) e CTC (2020).

A seguir, serão descritos os principais cabos utilizados nas linhas de transmissão tanto para novos empreendimentos como recapacitações.

Cabos de Alumínio (CA): É constituído pelo encordoamento concêntrico de um ou mais fios de alumínio liga 1350. Como possui baixa relação resistência mecânica é geralmente utilizado em áreas urbanas, onde os vãos são pequenos, e em regiões costeiras, devido a sua maior resistência a corrosão. São designados internacionalmente por nomes de flores no idioma inglês, por exemplo: CA Rose, CA Tulip, CA Violet. Também é conhecido como ASC (Aluminum Stranded Conductor) (NEXANS, 2008).

Cabos de Alumínio com alma de Aço (CAA): É formado por uma alma de aço, sólida ou composta por vários fios do aço galvanizado, envolvida por uma ou mais camadas de fios alumínio liga 1350. A coroa de alumínio fornece uma excelente condutividade enquanto a alma de aço aumenta a resistência mecânica do cabo. Os fios da alma de aço do cabo CAA devem ser revestidos com zinco, disponível em três classes de revestimento, para ser mais resistente a

corrosão. Os revestimentos das classes B e C são, respectivamente, duas e três vezes mais espessos que os da classe A. São designados internacionalmente por nomes de aves e pela classe de revestimento. Por exemplo: CAA Grosbeak Classe B, CAA Ibis Classe A, CAA Linnet Classe C etc. O tipo de classe é fundamental para determinar a tração de ruptura do cabo. Os condutores da alma também podem ser revestidos com alumínio (CAA/AW) ou serem de aço aluminizado. Estes condutores têm uma propriedade anticorrosiva melhorada em relação ao cabo CAA (NEXANS, 2008).

Cabos de Liga de Alumínio (CAL): Pode ser encontrado em dois tipos de liga: 6201 e 1120. A primeira possui uma resistência mecânica duas vezes superior a da liga Al 1350. Sua condutividade é de 52,5% IACS contra uma condutividade de no mínimo 61,3 % IACS para a liga Al 1350. É uma excelente opção para aplicações em ambientes altamente poluídos e/ou de salinidade marítima severa. O cabo CAL também apresenta menores perdas elétricas. O diâmetro externo equivalente do cabo CAL tem aproximadamente a mesma ampacidade e resistência mecânica que os seus equivalentes CAA, com uma relação resistência mecânica peso muito melhorada (NEXANS, 2008). A liga de alumínio 1120 é uma opção com características intermediárias entre a liga 1350, utilizada no CAA, e a 6201 (FARMAIN, 2017). Sua condutividade é de 59% IACS, sua resistência mecânica é cerca de 15% inferior à da liga 6201 e fluência até 60% inferior à das outras ligas de alumínio. Os dois cabos de alumínio liga possuem coeficiente de dilatação térmica maior do que o do cabo CAA. Outras combinações de tentos da liga de alumínio 6201 ou 1120 com tentos da liga de alumínio 1350 ou de aço fornecem cabos de maior resistência mecânica. O cabo de alumínio reforçado com liga de alumínio (CALA) é constituído por uma alma de fios de liga de alumínio 6201 envolvidos por tentos de liga de alumínio 1350. Outra opção é o cabo de liga de alumínio 6201 reforçado com aço (AACSR - All Aluminum Conductor Steel Reinforced). Este é composto por uma alma de aço envolvida por um coroa de tentos de liga 6201 proporcionando uma resistência mecânica até 60% superior ao do cabo CAA, mas há uma redução na condutividade de cerca de 10%.

Cabos de Alumínio Termorresistente com Alma de aço (T-CAA): O maior teor de zircônio na liga termorresistente permite sua operação em regime contínuo a 150°C e em regime de emergência de 180°C sem que haja deterioração das propriedades mecânicas do cabo. Quanto maior o teor de zircônio maiores serão as temperaturas permitidas de operação.

A liga de alumínio termorresistente, utilizada no cabo T-CAA, possui características elétricas e mecânicas semelhantes a da liga de alumínio tradicional 1350. A desvantagem do cabo T-CAA

é o preço, cerca de 10% superior ao cabo CAA. Aumento que ser compensado pelo ganho na capacidade de transmissão da linha (NEXANS, 2008).

Cabos de Alumínio Reforçado por Compósito (ACCR): É composto por uma alma de compósito metalo-cerâmico e uma coroa com tentos de liga de alumínio-zircônio, a qual possibilita a operação do cabo a 210°C em regime permanente e 240°C em regime de emergência. Cada tento da alma de compósito possui milhares de fibras de óxido de alumínio de altíssima pureza e elevada resistência mecânica, embebidas em uma matriz de fios de alumínio puro proporcionando aos cabos menor peso e menor coeficiente de dilatação térmica (metade do aço), maior resistência mecânica e elevada resistência a corrosão. É possível obter um ganho na capacidade de até 300% apenas com a troca do condutor por outro de mesmo diâmetro e peso sem que haja reforços ou modificações nas estruturas. As propriedades mecânicas e elétricas do ACCR permitem sua operação a temperatura elevadas com flechas reduzidas (3M, 2020).

Cabos de Alumínio com Alma de Compósito (ACCC): A alma deste condutor é formada por um compósito de fibras de vidro e carbono embebidas em uma matriz de resina termoendurecível. O baixo coeficiente de dilatação linear da alma de compósito (cerca de sete vezes inferior ao do aço) e sua elevada relação resistência mecânica peso produzem flechas muito menores que as geradas por um cabo CAA de mesma bitola. Os tentos da coroa são de alumínio liga 1350-0 no formato trapezoidal, permitindo um ganho de capacidade de 100% quando comparado a um cabo CAA de mesma bitola. A liga 1350-0 possui dureza inferior a da liga 1351, necessitando de cuidados especiais durante a instalação. O formato trapezoidal dos tentos da coroa elimina os vazios anteriormente criados pelos tentos circulares e proporciona uma seção transversal mais uniforme com 28% a mais de alumínio para o mesmo diâmetro do cabo CAA. Essa maior quantidade de alumínio associada à maior condutividade da liga 1350-0 é que torna possível o aumento da capacidade. Quando comparado ao cabo CAA de mesma bitola, possui o mesmo peso, redução de 18% das perdas elétricas e resistência mecânica 25% superior. O cabo também oferece ótimas características de auto-amortecimento, alta resistência à corrosão e só ocorre *creep* a partir de 235°C e se a tração no condutor exceder 70% da tração de ruptura (CTC, 2020).