



**XV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT/16

**17 à 22 de outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil**

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)

AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE LINHAS AÉREAS, UTILIZANDO CABO CAA DE LIGA DE ALUMÍNIO TERMORRESISTENTE (TAL)

Carlos Alexandre M. do Nascimento* Edino B. Giudice Miguel A. Mourão José M. C. Brito

José M. Assunção Beline Q. A. Fonseca Valério O. Albuquerque Helder Lara Ferreira
COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG

Alexandre Queiroz Bracarense
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG

Sidnei Ueda
FURUKAWA

RESUMO

Neste trabalho técnico apresentará os resultados da pesquisa desenvolvida na CEMIG em parceria com a Furukawa e UFMG para avaliação da aplicação do cabo CAA 4/0 de Liga de Alumínio Termorresistente-TAL e do mesmo cabo de liga Tradicional Al 1350, os quais foram submetidos à alta temperatura de operação durante um(1) ano.

A metodologia adotada para análise dos testes nos cabos serão relatadas nesse trabalho para apresentar os resultados encontrados no experimento, bem como apresentar as vantagens e desvantagens na aplicação dessa nova tecnologia de cabos no sistema elétrico da CEMIG.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, Cabos Condutores Aéreos, Liga de Alumínio.

1 - INTRODUÇÃO

Mudanças notáveis aconteceram nas concessionárias desde que Thomas Edison começou a comercialização da energia elétrica há mais de 100 anos atrás. Uma das áreas que sofreram grandes inovações tecnológicas é a dos tipos de cabos disponíveis para transmitir e distribuir energia elétrica.

Anteriormente à grande utilização do alumínio, o cobre foi o primeiro material utilizado para transmitir eletricidade, durante o desenvolvimento da indústria elétrica na década de 1880. As dimensões dos cabos de cobre eram dimensionadas principalmente em função das considerações mecânicas, por causa da desproporcional relação entre a alta condutividade e a

resistência mecânica, surgindo, então, a necessidade de revisão dos critérios de utilização de cabos aéreos.

A dimensão dos condutores utilizados eram geralmente maiores que o necessário do ponto de vista da eficiência da condutividade elétrica. Por causa do peso, os comprimentos dos vãos eram pequenos e aumentavam o custo global das linhas de transmissão[1].

Os critérios de seleção do tipo de cabo para uso em linhas de transmissão e de distribuição se tornaram uma ciência. A seleção do tipo e do tamanho de cabo ótimos para uma determinada linha requer uma compreensão completa das características físicas de todos os cabos disponíveis.

Essa compreensão tem que englobar não apenas os conhecimentos físicos, elétricos, mecânicos e térmicos do cabo, mas também as relações entre essas variáveis, para encontrar a melhor relação custo/benefício na seleção do cabo a se utilizar exemplificadas abaixo.

- estabilidade da linha x corrente que transporta;
- operação econômica x carregamento térmico;
- carregamento mecânico x altas temperaturas;
- vida útil x fadiga do material.

Mais recentemente, novos projetos de cabos foram desenvolvidos para as concessionárias de energia elétrica, novas ligas estão sendo desenvolvidas, buscando avanço nas propriedades mencionadas acima.

*Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão – ER/LT
Av. Barbacena, 1200 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil - CEP 30.970-123
Fone: 55 031 349-3382 Fax: 55 031 349-3791 - e-mail: caxandre@cemig.com.br

Buscando sempre estar presente no desenvolvimento tecnológico de novos materiais e equipamentos para LTs, a CEMIG desenvolveu, em parceria com a FURUKAWA, a avaliação de cabos CAA com liga de alumínio termorresistente (TAL) submetido ao clima tropical. A temperatura normal de operação desse cabo pode atingir 150 °C, valor mais elevado que 90°C, o qual é utilizado no tradicional cabo CAA de liga de alumínio (Al 1350).

A LT Experimental da CEMIG foi utilizada para instalação dos cabos CAA de Liga Termorresistente-TAL e de Liga Tradicional Al 1350, objetivando uma comparação de funcionalidade entre os mesmos.

A Figura 1 mostra a configuração de instalação dos cabos CAA 4/0 (Penguin), que foram submetidos a alta temperatura por um (1) ano.

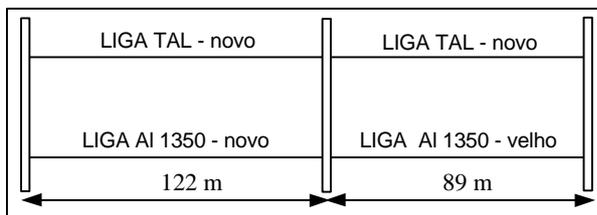


FIGURA 1 - DIAGRAMA DE CONFIGURAÇÃO DOS CABOS CAA 4/0 (PENGUIN) NA LT EXPERIMENTAL

A Furukawa Electric Co. desenvolveu a liga de alumínio termorresistente-TAL. Devido às características físicas da liga TAL, um cabo com liga termorresistente pode transportar energia em regime contínuo normal de operação, com a temperatura do cabo alcançando até 150 °C, observando-se que a sua vida útil deve ser preservada nas mesmas proporções da liga Al 1350.

2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A avaliação das propriedades mecânicas dos cabos instalados na LT Experimental, submetidos a altas temperaturas, foram analisados na CEMIG e UFMG, adotando a seguinte metodologia de procedimentos descritos abaixo.

2.1 Linha Experimental

A LT Experimental Nova Lima-Bonsucesso foi adaptada para receber os novos cabos condutores tipo CAA 4/0 Penguin de liga de alumínio termorresistente e com liga tradicional Al 1350 com as mesmas características construtivas e geométricas. Para isso a

LT Experimental foi readaptada para a execução do procedimento experimental proposto.

2.2 Sistema de Energia

A corrente na LT Experimental é regulada através dos reguladores de tensão que mantêm um nível de tensão na linha praticamente constante, dessa forma é controlado o valor máximo de corrente na linha ($I_{max}=680$ A). A Figura 2 mostra o transformador e os reguladores de tensão utilizados.



FIGURA 2 - SISTEMA DE ENERGIA DA LT EXPERIMENTAL.

2.3 Sistema de Monitoramento em Tempo Real

Para monitorar a temperatura superficial e corrente dos cabos instalados na LT Experimental foram instalados 6 (seis) sensores Power Donut, equipamento mostrado na Figura 3, os quais trabalham em contato com o cabo e transmitem as informações via onda de rádio para uma estação terrestre de aquisição de dados.

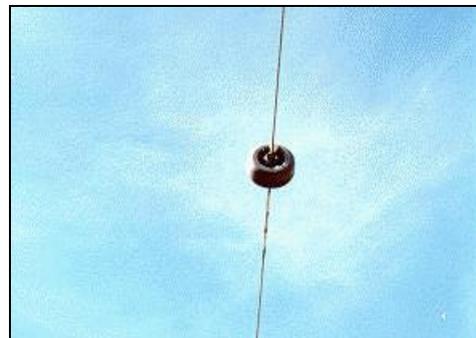


FIGURA 3 - POWER DONUT - SENSOR DE TEMPERATURA E CORRENTE DO CABO

2.4 Estação Meteorológica

Para monitorar as informações meteorológicas locais na LT Experimental foi utilizado uma estação terrestre composta de sensores de velocidade e direção do vento, temperatura ambiente e radiação solar.



FIGURA 4 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA INSTALADA NA LT EXPERIMENTAL

3 - DADOS DE CAMPO

Os cabos foram mantidos em alta temperatura para comparação de desempenho entre o cabo de liga TAL e o cabo de liga tradicional Al 1350. A Figura 5 mostram os perfis das variações da temperatura e corrente média do cabo e da velocidade média horária do vento para o local.

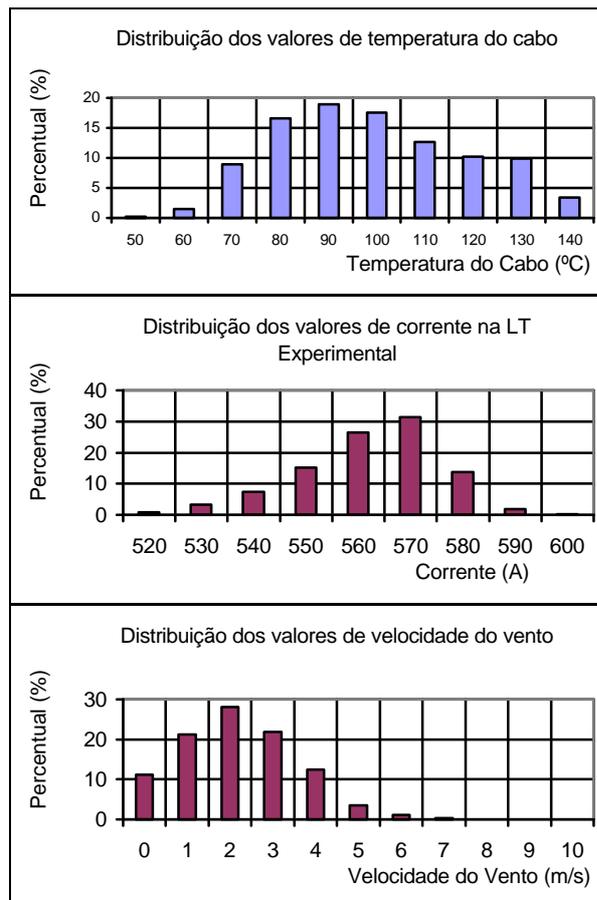


FIGURA 5 - DADOS OBTIDOS PELO SENSOR DONUT-10. E ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.

4 - ANÁLISE DOS TESTES NOS CABOS

Para comprovar as características mecânicas dos cabos fornecidos pela Furukawa, foram desenvolvidas várias séries de testes de laboratório, os quais foram desenvolvidos em instalações da CEMIG e UFMG. Os ensaios foram realizados em três etapas distintas de acordo com o tempo de utilização dos cabos na LT Experimental, ensaios antes da instalação, com um terço (4 meses) e no final da experiência (12 meses).

3.1 Ensaio de Análise Química

As análises químicas foram realizadas em amostras retiradas dos cabos antes de suas instalações na LT Experimental. Pequenas amostras foram preparadas em forma de limalha para saber quais os principais elementos químicos presentes nas ligas de alumínio termorresistente, liga tradicional Al 1350 e do aço.

A Tabela 1 mostra os principais elementos químicos encontrados nos materiais analisados, observando que há pouca diferença no teor dos elementos químicos, que formam os cabos termorresistente-TAL e o tradicional Al 1350.

TABELA 1 – RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS NO ALUMÍNIO E AÇO.

Amostra de Alumínio		
teor (%)	Liga TAL	Liga Al 1350
Mg	0.003	0.001
Si	0.823	0.898
Cu	0.002	0.001
Amostra de Aço		
teor (%)	Liga TAL	Liga Al 1350
C	0.777	0.762
S	0.018	0.012
P	0.013	0.010
Mn	0.458	0.387
Si	0.267	0.211

A Tabela 2 mostra o teor de Zircônio (Zr) presente nas ligas de alumínio em análises, permitindo avaliar a diferença principal na composição química entre as ligas TAL e Al 1350.

TABELA 2 – RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS POR ESPECTROMETRIA.

Liga	Teor de Zr
TAL	169 µg/g
Al 1350	< 70 µg/g

A adição de Zircônio(Zr) nas faixas entre 0.1 e 0.3% é utilizado para formar uma fina camada entre os contornos dos grãos da liga de alumínio inibindo o recozimento e a recristalização do material,

aumentando conseqüentemente a temperatura de recozimento, podendo assim aumentar a temperatura de operação dos cabos que utilizam esse tipo de liga[2].

3.2 Ensaio de Tração nos Cabos

Os ensaios de tração foram realizados para medir a tensão de ruptura dos cabos. Nesses ensaios foram observados os valores de alongamento e tensão de ruptura. A vida útil de um cabo pode ser medida através desse ensaio, uma vez que, a perda de resistência mecânica é um fator de envelhecimento do mesmo, sendo mais crítico que as perdas de outras características do cabo. As amostras foram retiradas dos cabos para todas as etapas da experiência. Os ensaios de ruptura foram realizados no conjunto liga de alumínio e aço, na máquina de tração horizontal de 40 toneladas, onde 8 metros de cabo foi tracionado até sua ruptura, como mostra a Figura 6.



FIGURA 6 – MÁQUINA HORIZONTAL DE MEDIÇÃO DE TENSÃO DE RUPTURA.

Os valores de ruptura dos cabos foram superiores aos valores normativos, dessa forma tanto os cabos novos quanto os usados passaram no ensaio de ruptura. Mas, pode-se observar uma perda de resistência mecânica no cabo CAA de liga Tradicional Al 1350, devido a operação em altas temperaturas.

A Tabela 3 mostra a evolução das perdas de resistência mecânica observadas durante a energização de um (1) ano da LT Experimental, nos cabos fornecidos pela Furukawa. Observa-se que as perdas no cabo tradicional de liga Al 1350 são significativas (8.9%) e que no cabo de Liga Termorresistente-TAL não apresentou perdas mecânicas, isto é, não houve variação média na tensão de ruptura, as diferenças registradas estão relacionadas com a precisão do processo de medição da tensão de ruptura.

Aproveitando a experiência, um cabo de Liga Al 1350 de mais de 15 anos também foi testado e ficou parte energizado e outra parte desenergizado. A Tabela 4 mostra as análises de perda de resistência mecânica para esse cabo.

TABELA 3 – PERCENTUAL MÉDIO DE PERDAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Cabo		Novo	4 meses	12 meses
Al 1350	kgf	3990	3778	3636
	%	0	5.3	8.9
TAL	kgf	3810	3825	3913
	%	0	0	0

TABELA 4 – PERCENTUAL MÉDIO DE PERDAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CABO USADO

Cabo		15 anos energizado	15 anos desenergizado
Al 1350	kgf	3786	4118
	%	8	0

Comparando os resultados mostrados nas Tabelas 3 e 4, concluiu-se que depois de um(1) ano de uso do cabo Al 1350 novo, apresentou praticamente o mesmo nível de perdas mecânicas que um cabo Al 1350 de 15 anos de uso, sendo assim o cabo usado apresentou uma performance muito boa no experimento.

3.3 Ensaio de Tração nos Fios de Alumínio e Aço

Os fios de alumínio e aço dos cabos também foram ensaiados em máquina de tração vertical de 10 toneladas, mostrada na Figura 7.

Os resultados dos ensaios de tração de rupturas foram realizados no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, em Belo Horizonte, MG.

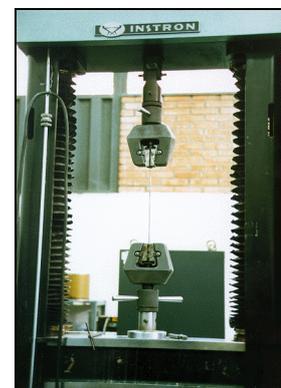


FIGURA 7 – MÁQUINA VERTICAL DE MEDIÇÃO DE TENSÃO DE RUPTURA.

A Tabela 5 mostra a evolução das perdas de resistência mecânica nos fios de alumínio. Observa-se

que a perda média de resistência mecânica na liga tradicional Al 1350 foi significativa (53%) e que na Liga Termorresistente-TAL apresentou perdas mecânicas de (37%), isto é, a perda de resistência na liga TAL foi 16% menor que na liga tradicional Al 1350.

A Tabela 6 mostra a evolução das perdas de resistência mecânica observadas durante a energização de um (1) ano da LT Experimental, para o cabo usado, com mais de 15 anos. Observa-se que a perda de resistência mecânica (47%) nesse cabo foi proporcional em relação a um cabo novo com a mesma liga após um ano de uso(53%).

TABELA 5 – PERCENTUAL MÉDIO DE PERDAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA NA LIGA.

Liga		Novo	4 meses	12 meses
Al 1350	σ_{rup} (kgf)	322.5	127.5	151
	Perdas (%)	0	60	53
	Along.(cm)	0.45	1.62	1.15
	Along.(%)	2	8	6
TAL	σ_{rup} (kgf)	323.6	275.4	203.4
	Perdas (%)	0	15	37
	Along.(cm)	0.52	0.50	0.89
	Along.(%)	3	2	4

TABELA 6 – PERCENTUAL MÉDIO DE PERDAS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CABO USADO

Cabo		15 anos energizado	15 anos desenergizado
Al 1350	σ_{rup} (kgf)	164	307
	Perdas (%)	47	0
	Along.(cm)	0.99	0.44
	Along.(%)	5	2

As Figura 8 e 9 mostram os diagramas tensão x deformação para as ligas de Al 1350 e TAL. Observou-se que depois dos 4 meses de operação o cabo foi submetido a um tratamento térmico, devido a variação de temperatura na linha.

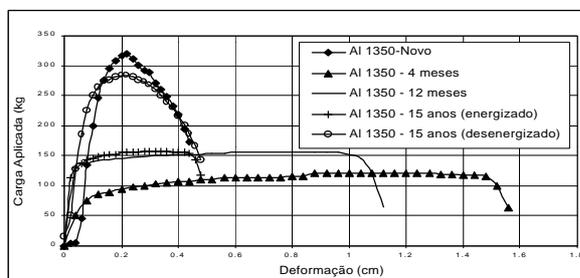


FIGURA 8 – RESULTADO DAS ANÁLISES DE TRAÇÃO NOS FIOS DA LIGA Al 1350.

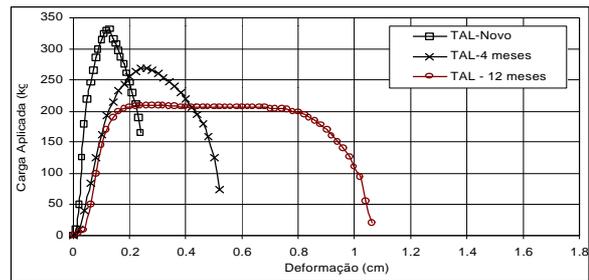


FIGURA 9 – RESULTADO DAS ANÁLISES DE TRAÇÃO NOS FIOS DA LIGA TAL.

Para os fios de aço foi executado o mesmo procedimento descrito para os fios de alumínio, e foi concluído que o aço não alterou suas propriedades mecânicas durante o experimento.

3.4 Ensaios de Metalografia

As metalografias foram realizadas nas amostras dos fios de alumínio e do aço. A formação dos contornos dos grãos dos materiais analisados foram observadas e as diferenças entre as estruturas das ligas de alumínio termorresistente e liga tradicional Al 1350 foram registradas. Como o fio de aço possui a mesma formação química nos cabos instalados na LT Experimental, observou-se apenas a diferença entre a formação dos grãos em relação ao processo de laminação durante a fabricação.

3.5 Outros testes em execução

Os ensaios de fadiga forçada acelerada estão programados para realização na Ontario Hydro Technologies verificando o comportamento dos cabos em vão de laboratório, simulando o comportamento de vibração eólica de uma linha em operação. A fadiga mecânica dos fios de alumínio do cabo é determinante na sua vida útil de operação. Sendo assim os ensaios serão realizados para verificar se a alteração da composição química na liga pode afetar em sua vida útil.

5 - ANÁLISES ELÉTRICAS DOS CABOS

Para o cálculo de perdas e regulação de tensão foi utilizado programa de computador considerando os acréscimos da resistência elétrica do condutor devido ao conseqüente aumento da temperatura, objetivando o aumento do carregamento.

A Tabela 7 mostra os resultados encontrados para a simulação de vários comprimentos de linhas e para a condição radial, isto é, a pior condição para perdas e regulação de tensão em uma linha.

TABELA 7 – SIMULAÇÃO DE PERDAS ELÉTRICAS PARA CIRCUITO RADIAL, POTÊNCIA CALCULADA COM VENTO (1 m/s).

	D (km)	TP (°C/MVA)	PE (%)	RT (%)	RS (Ω/km)
ACSR	6	75 / 94	0.85	1.33	0.267
TAL		140 / 154	2.12	2.91	0.399
ACSR	12	75 / 94	1.72	2.75	0.267
TAL		140 / 154	4.41	6.2	0.399
ACSR	18	75 / 94	2.64	4.29	0.267
TAL		140 / 154	6.92	10.17	0.399
ACSR	24	75 / 94	3.60	5.95	0.267
TAL		140 / 154	9.74	14.89	0.399
ACSR	30	75 / 94	4.60	7.75	0.267
TAL		140 / 154	12.97	20.80	0.399

NOTA: D – Extensão da linha

TP – Temperatura de Projeto e Potência

PE – Perdas Elétricas

RT – Regulação de Tensão

RS – Resistência Ôhmica

6 - SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO

A simulação de aplicação será realizada na hipótese de construção de uma nova LT de 138 kV utilizando o cabo 4/0 (Penguin) em um perfil real de uma linha existente de 6 km de extensão. Para efeito de comparação da funcionalidade entre os cabos de liga TAL e liga Al 1350 serão mostradas as principais características térmicas e mecânicas tais como: temperatura de operação; capacidade de transmissão, flechas, perdas elétricas e regulação de tensão.

A Figura 10 mostra o resultado do programa de tensões e flechas aplicado no projeto da linha, esse programa contempla o comportamento dinâmico do cabo e o desnível do relevo.

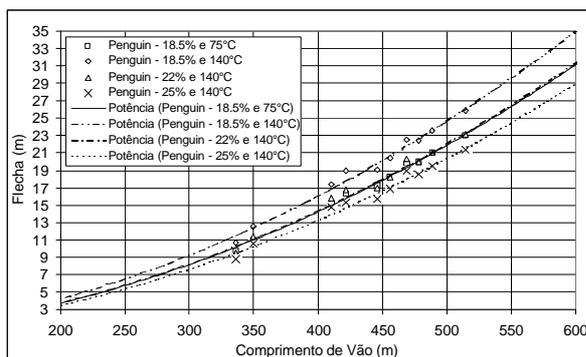


FIGURA 10 – COMPARAÇÃO DAS FLECHAS x COMPRIMENTO DE VÃO - CAA 4/0 – PENGUIN.

A Tabela 4 mostra os carregamentos máximos admissíveis da linha considerando a utilização do cabo de liga TAL e de liga tradicional Al 1350

TABELA 4 – COMPARAÇÃO DA CAPACIDADE ADMISSÍVEL DE TRANSMISSÃO.

Cabo Penguin	TP °C/MVA	EDS (%)	I (A)	PE	RT	% de Aumento
Liga Al 1350	75 / 94	18.5	394	0.85	1.33	-
Liga TAL	140 / 154	22	646	2.12	2.91	61%

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação da liga TAL em climas tropicais é perfeitamente adaptável, uma vez que, os valores de esticamento do cabo podem ser ampliados para compensar o aumento da flecha em alta temperatura de projeto, sem perda de confiabilidade da linha. Em países tropicais a ocorrência de neve é praticamente desprezível.

O aumento da capacidade de transmissão, proporcionada pela utilização da liga TAL, é viável economicamente, uma vez que, as condições e restrições de projeto são atendidas, isto é, utiliza-se as mesmas estruturas e flechas do cabo de liga Al 1350[3]. O custo final do cabo de liga TAL é 10% maior, mas o aumento no carregamento em 60% já justifica sua aplicação.

As linhas em fase de estudos de recapitação, recondução, poderão ter cabo de liga TAL, objetivando a redução do diâmetro dos mesmos para uma mesma potência a ser transmitida ou o aumento de potência para o mesmo diâmetro de cabo.

Apesar das ligas TAL e Al 1350 terem perdido resistência mecânica, no conjunto cabo, essa influência foi praticamente nula, observando que a perda de resistência mecânica da liga compromete a vida útil da liga. Mecanicamente os cabos passaram pelos ensaios de tração de ruptura normativos. As perdas elétricas e regulação de tensão mais que duplicam com o aumento da temperatura, mas o aumento na potência é expressivo, buscando otimizar os investimentos na expansão do sistema elétrico.