

Desenvolvimento de Condutores Compactos Aplicados a Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão

E. B. Giudice,* – C. A. M. Nascimento – G. E. Guimarães – G. E. Braga – O.C. Filho – CEMIG
J. O. S. Paulino – G. C. Miranda – A. Q. Bracarense – L. A. Costa - UFMG
S. Ueda – Furukawa

RESUMO

Este trabalho representa os esforços para o desenvolvimento de um cabo condutor compacto, que foi desenvolvido a custos reduzidos e com tecnologia alternativa, contando com a parceria entre CEMIG, FURUKAWA E UFMG. O objetivo principal foi reduzir as perdas elétricas e aumentar a eficiência dos cabos aéreos para os sistemas de transmissão e subtransmissão da CEMIG. A preocupação inicial foi com a geometria dos fios, de forma a conceber um protótipo que correspondesse com os anseios técnicos/econômicos e que viesse a trazer benefícios e manter a confiabilidade. O projeto contou com uma série de verificações de campo e simulações mecânicas e elétricas em laboratório, através de ensaios especiais em temperaturas elevadas de operação. Os resultados obtidos neste projeto de P&D serão apresentados, para demonstrar os ganhos advindos do desenvolvimento do primeiro cabo compacto brasileiro, destacando os principais pontos relevantes do projeto.

PALAVRAS CHAVE

Ampacidade, Condutor Compacto, Redução de Perdas.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de carregamento elétrico das Linhas Aéreas de Transmissão e Subtransmissão, associado a necessidade de aproveitamento otimizado das faixas de servidão, motivou o estudo de um condutor de performance elevada e custos otimizados. Diante de um mercado com um amplo desenvolvimento de novas ligas e

Este trabalho faz parte do programa de pesquisa e desenvolvimento ANEEL, ciclo 2000-2001, conduzido pela CEMIG, UFMG e FURUKAWA.

Este desenvolvimento contou com a participação de uma grande equipe, dedicação e empenho dos professores da UFMG (Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino e-mail: josvaldo@eee.ufmg.br, Glássio Costa de Miranda – e-mail: glassio@cpdee.ufmg.br, Alexandre Queiroz Bracarense – e-mail: Queiroz@vesper.demec.ufmg.br.

Este trabalho contou ainda com a colaboração da Superintendência de Expansão das Rede de Transmissão e Subtransmissão - ER., e com o total apoio da Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão – ERLT- CEMIG

Este artigo foi elaborado pelos engenheiros: Edino Barbosa Giudice Filho (e-mail: edino@cemig.com.br) - (031) 3299 4256 e Carlos Alexandre Meireles Nascimento – e-mail: caxandre@cemig.com.br - (031) 3349 3382.

Belo Horizonte, 30/07/2002.

geometrias diversas, o emprego de condutores compactos [1] de alta performance, no sistema elétrico nacional, ainda são restritos. Sendo assim em um mercado cada vez mais exigente, torna-se necessário um melhor aproveitamento dos corredores das Linhas Aéreas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Neste sentido, o projeto concentrou esforços em desenvolver um modelo de condutor compacto tradicional e em Liga de Alumínio Termorresistente [2], com características bem próximas do desejado ou seja um cabo condutor capaz de inserir um ganho quando comparado com os tradicionais, permitindo a sua operação em altas temperaturas com ganhos de carregamento e redução de perdas, preservando as suas características mecânicas e elétricas.

II. OBJETIVO

Desenvolver, com base no estado da arte, em parceria entre a CEMIG, Nexans (Ex-FURUKAWA do Brasil) e UFMG, um cabo condutor compacto, tradicional e em liga de alumínio termorresistente, a custos otimizados, que atendessem aos requisitos de um condutor compacto com desempenho elétrico e mecânico normalizado.

III. DESENVOLVIMENTO

Após as visitas técnicas realizadas no início do projeto a vários institutos de pesquisa e fabricantes, foram verificadas técnicas e processos de fabricação destes condutores compactos, que diante dos elevados custos do processo de fabricação observado, tornou-se um desafio produzir um condutor compacto nacional com as características e performance que procurávamos.

Os processos de fabricação observados no exterior, são complexos e compostos de várias etapas e máquinas especiais dedicadas, o que confere uma alta eficiência dos modelos disponíveis no mercado a um altíssimo custo.

Desta forma houve a necessidade de realizar estudos e adaptações nos processos de fabricação, confecções de ferramentas especiais e matrizes (fieiras) com formas trapezoidais dos fios da coroa interna como é mostrado na Figura 1. Sendo assim foi incorporado ao processo



FIGURA 1- Ferramentas incorporadas ao processo

produtivo tradicional juntamente com ajustes na trançadeira e técnicas alternativas desenvolvidas para a concepção dos protótipos testados.

Após uma série estudos [3,4], tentativas, adaptações de processo e ensaios, foram concebidos os condutores compactos de baixo custo onde a preocupação inicial foi com a geometria dos fios, de forma a conceber um protótipo de condutor, que correspondesse com as premissas técnicas e financeiras de otimização. Bem como trazer benefícios e confiabilidade ao setor elétrico. O projeto contou com uma série de verificações e análises mecânicas, elétricas e de campo, com o desenvolvimento de metodologia alternativa para realização de ensaios especiais em altas temperaturas.

Foram realizadas análises química, metalográfica, microdureza; ensaios de tração à ruptura dos fios; ensaios de tensão deformação do condutor, vibração eólica e outros. Os ensaios especiais para a análise de Corona Visual, sob chuva e temperaturas até 150 C, foram realizados com equipamentos detectores de ruído direcionais e de visão noturna, caracterizando uma nova metodologia de testes. Os ensaios de ruído irradiado, conduzido e de campos eletromagnéticos foram realizados em espectros amplos de frequências.

Utilizando alguns dos dados construtivos do novo condutor desenvolvido, e trabalhando a temperaturas de projeto próximas de 150 °C, observa-se que estes cabos apresentam resistência elétrica igual aos cabos tradicionais, de mesmo diâmetro a 75 °C, o que lhes conferem uma melhor performance quanto a perdas e regulação. Estes resultados são apresentados no item seguinte através de tabelas, gráficos e alguns comentários.

IV. RESULTADOS

Mostraremos, de forma sintética, o resultado dos estudos e ensaios realizados, apresentando os pontos mais importantes observados.

A. Ensaios Mecânicos

Após a confecção dos primeiros de fios trapezoidais e a concepção dos primeiros protótipos de condutores

compactos, uma série de estudos e ensaios foram realizados. A análise metalográfica por microscopia ótica e eletrônica da seção dos fios, a análise química, a microdureza e tração mecânica foram aprovados em todos os testes realizados.

B. Ensaio de Tensão-Deformação do Cabo Conductor

O ensaio de tensão-deformação foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento do cabo condutor em diferentes solicitações.

As figuras 2 e 3 mostram respectivamente, uma bancada de 12 m, um sistema hidráulico digital de carregamento de medição das cargas e a região do rompimento do condutor. A medição dos alongamentos foram feitos por relógio comparador.



FIGURA 2- máquina de ensaio de Tensão-deformação



FIGURA 3- Rompimento do Cabo

O ensaio foi realizado conforme norma ABNT NBR 7302, apresentando resistência mecânica calculada (RMC) do condutor completo de 6.397 Kgf e da alma da aço de 3.940 Kgf, de acordo com norma ASTM para condutor tradicional [5]. O ensaio mostrou que cabo condutor compacto tem desempenho, sob o ponto de vista de resistência mecânica superior ao condutor tradicional.

C. Ensaios Elétricos - Análise do Efeito Corona e RIV nos protótipos

A Figura 4 mostra os resultados obtidos em laboratório. Os valores obtidos nesta medição foram bem abaixo do esperado para este tipo de condutor, esperava-se o início de corona entorno de 120kV, mas as medições apresentaram o Joelho de RIV em torno de 90kV, devido à característica física do condutor utilizado. Devido ao processo de

fabricação otimizado, algumas ranhuras foram observadas em sua superfície, o que levou a valores de início de corona a valores inferiores aos normalmente encontrados em medições de laboratório, sendo que, apesar disso, o condutor foi considerado em condições normais de uso.[6,7,8,9 e 10]

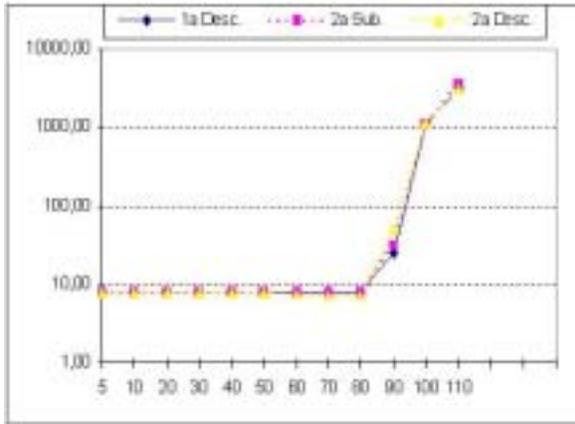


FIGURA 4 – variação $i_v(dbxkv)$

D. Obtenção do Corona Visual Especial – Temperaturas elevadas

As Figuras 5 e 6 mostram os ensaios especiais realizados em laboratório.



FIGURA 5- Condutor no Centro da Gaiola -Cabana



FIGURA 6 – Equipamento Visão Noturna

A Tabela I apresenta os valores de tensão de início de corona (kV) para o circuito de corona especial

TABELA 1

Tensão de Início de Corona (kV)			
	24°C	35°C	100°C
Esfera	35		
Normal	43	44	39
Gota D'água	29	23	23

Na configuração *normal*, ou seja, o condutor centrado na gaiola, em uma configuração coaxial, foram feitas medições em três valores de corrente tais como: corrente zero, 200A (correspondente a 30-35 °C) e 600 A (correspondente a 80-100 °C). A Tabela II apresenta a variação de temperatura na superfície do condutor para alguns valores de corrente, e o tempo no qual a corrente foi aplicada ao condutor.

Com a aplicação de água no condutor, em forma de gotejamento controlado, mostrado nas Figuras 7 e 8, nota-se que as tensões de início de corona são bem menores, variando sensivelmente com a temperatura do condutor. As gotas de água são maiores que a esfera utilizada anteriormente, levando a tensões de início de corona menores que as anteriormente medidas. Com o condutor quente, ocorre a evaporação da água, o que leva a tensões abaixo de 23kV.

TABELA 2

Relação Corrente x Temperatura

Corrente (A)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
0	23	
8	23	15
50	24	20
100	26	20
200	30-35	20
400	50-65	20
600	88-100	20
800	135-150	20

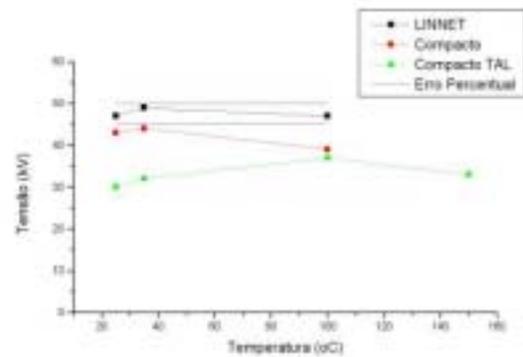


FIGURA 7- Comparação do Início de Corona Comum

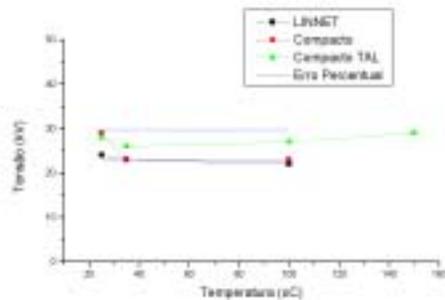


FIGURA 8- Comparação do Início de Corona com Gota

As diferenças nos valores da tensão de início de corona para os condutores a quente foram mínimas com campo não-uniforme, mesmo para temperaturas muito elevadas.

As tensões de início de corona sob chuva, neste caso de gotejamento controlado, mostraram-se menores, como já era esperado, tanto para os campos uniforme quanto não-uniforme. As tensões de início de corona sob chuva a quente, mostraram diferenças mínimas, dentro do erro de medição do sistema utilizado, tanto para campos uniformes quanto não-uniformes.

As tensões de início de corona para o condutor compacto, foram menores que aquelas obtidas para o condutor LINNET tradicional. Já as tensões de início de corona para o condutor compacto liga TAL foram muito menores que as tensões obtidas para os outros condutores, valores estes, a princípio, creditados a ranhuras apresentadas pelo mesmo.

E. Medições de Campo eletromagnético 5Hz – 3GHz medições de ruído e campo eletromagnético.

As Figuras de 9 a 11 mostram as medições de ruído conduzido, ruído irradiado e campo elétrico, na configuração de cabo monofásico próximo das condições encontradas em uma linha real serão obtidas somente com aplicação de tensão, devido aos resultados encontrados com os condutores a quente na tensão de início de corona – o comportamento dos mesmos é previsível, podendo ser analisado somente os valores de medição obtidos com a aplicação de tensões variando de zero a 200kV.

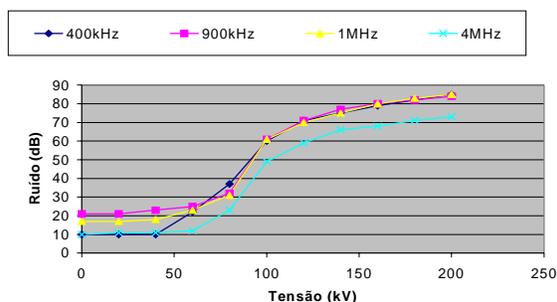


FIGURA 9 – Ruído conduzido (dB) - 9kHz – 30MHz

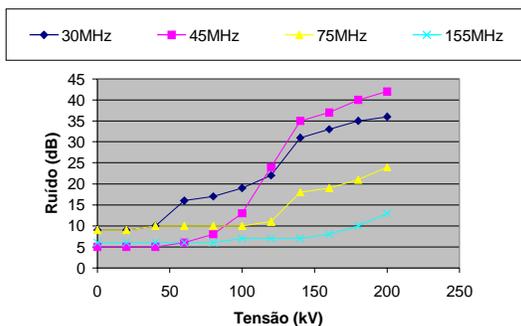


FIGURA 10 – Ruído Irradiado (dB) 30MHz – 3GHz

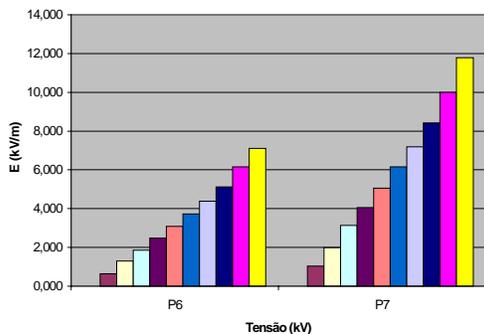


FIGURA 11 – Campo Elétrico 5Hz-30kHz

F. LT Experimental e Medição de Vibração

Na Figura 12 é apresentado os resultados das medições de vibração eólicas comparando o novo modelo de condutor compacto desenvolvido com cabos tradicionais de mesma bitola instaladas em LT Experimental. O nível de vibração eólica medido nos equipamentos, apresentou valores muito baixos, em termos de amplitude de vibração, nos condutores da LT. A vida útil estimada dos condutores é muito elevada devido ao nível de vibração medido nos equipamentos Pavica.

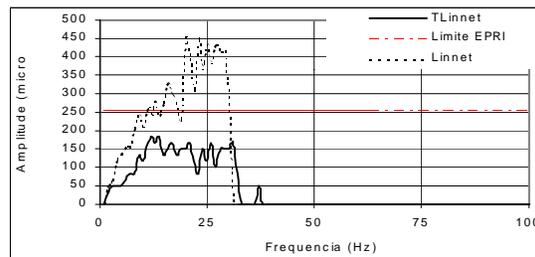


FIGURA 12 – Amplitude máxima por classe de frequência

G. Propriedades dos Novos Condutores Compactos

Na Tabela III são apresentados algumas das propriedades elétricas dos condutores compactos desenvolvidos, Cabo Compacto em Alumínio 1350 (CC) e o Cabo Compacto em Liga de Alumínio Termorresistente (C TAL).

TABELA 3
Relação Correntex Temperatura

Cód.	RESISTÊNCIA C.A. (Ohm/km) REATINDUT. (Ohm/km)			
	75 °C	90 °C	125 °C	150 °C
C.C	0,1702	0,1786	0,1983	0,2113
C.TAL	0,1724	0,1810	0,2010	0,2141

H. Perdas e Regulação

Com os condutores compactos TAL trabalhando a uma temperatura de Projeto de 150 °C obteve uma Resistência Elétrica CA igual ao Linnet Tradicional a 75 °C. Alguns valores comparativos são apresentados para uma rápida avaliação de Perdas e Regulação:

- Linnet Tradicional a 75 °C: 0.20773 Û/km
- Linnet TAL a 75 °C: 0.21154 Û/km
- Linnet TAL a 150 °C: 0.2700 Û/km
- Linnet TAL Compacto a 150 °C: 0.21419 Û/km

Com base nestes valores fizemos uma breve simulação das possíveis perdas e regulação, conforme o exemplo a seguir:

LT com 100MVA – 75 °C e 50 km utilizando :

- Linnet Tradicional:
Perdas: 6.50 % // Regulação: 12.15 %
- Linnet TAL :
Perdas: 6.85 % // Regulação: 12.54 %
- Linnet TAL compacto :
Perdas: 5.47 % // Regulação: 11.01 %

V. ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLIFICADA

Observa-se que para distâncias maiores do que 50 Km e dependendo do carregamento requerido, deve-se atuar na compensação/regulação de tensão. Os ganhos computados comparando o condutor tradicional Al 1350 a 75°C Linnet e a liga TAL, Liga de Alumínio Termorresistente - Linnet, trabalhando à temperaturas acima de 120°C, já subtraídas as perdas, é em torno de aproximadamente 40 MW. Com o desenvolvimento da geometria compacta aplicada aos condutores tradicionais e à liga TAL, conseguiu-se através da redução da resistência elétrica, mostrada na Tabela III, é possível alcançar distâncias maiores e/ou a redução das perdas elétricas, melhorando também a regulação.

Fazendo uma estimativa para cada MWh transmitido por mês, computada uma tarifa média entre compra e venda na faixa aproximada de R\$ 5.256,00, verifica-se que um ponto ótimo de aplicação do novo modelo de condutor compacto desenvolvido. Desta forma fizemos uma breve avaliação econômica, comparando a evolução alcançada com o desenvolvimento da geometria compacta, aplicado a uma Linha de Transmissão com carregamento de 100 MVA, temperatura de projeto de 75 °C e comprimento de 50 km obtendo os valores quantificados para as perdas conforme é mostrado abaixo:

- *Linnet Tradicional:*
 $100 \text{ MVA} \times \text{R\$ } 5.256,00 = \text{R\$ } 525.600,00$ – (Perdas de R\$ 34.164,00)
- *Linnet TAL:*
 $100 \text{ MVA} \times \text{R\$ } 5.256,00 = \text{R\$ } 525.600,00$ – (Perdas de R\$ 36.003,60)
- *Linnet TAL compacto :*
 $100 \text{ MVA} \times \text{R\$ } 5.256,00 = \text{R\$ } 525.600,00$ – (Perdas de R\$ 28.750,32)

VI. CONCLUSÕES

No desenvolvimento construtivo da superfície externa foi observado uma melhora no perfil de troca de calor e espera-se uma diminuição do arrasto do condutor compacto em relação ao tradicional. Como isso, conseguiu-se a redução das perdas elétricas desejadas, que viabilizaram o protótipo.

Nesse projeto de P&D, embora a redução das perdas elétricas com o novo modelo foi significativa, 16% de redução em comparação ao condutor tradicional de mesma bitola, não conseguindo-se uma superfície externa homogênea que fornecesse um desempenho ótimo nos aspectos, gradiente superficial [11], RIV e Corona.[12]

Desta forma é importante a continuidade dos trabalhos, na busca da melhoria destes pontos observados. Outro aspecto importante que deve ser dada atenção às ferragens, emendas à compressão e grampos de ancoragem.

VII. PERSPECTIVAS FUTURAS

Alternativas poderão ser utilizadas para melhorar alguns aspectos do cabo condutor, que até o momento não foi conseguido, tais como: superfícies mais polidas e homogêneas. Com a redução das perdas elétricas do novo modelo de condutor compacto, será possível melhorar a sua superfície, podendo trabalhar também com faixas e estruturas mais reduzidas.

Os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de condutores aéreos nus, utilizando ligas de altas temperaturas e geometrias mais adequadas é vasto e pouco aplicado. Apesar do largo campo de pesquisa e desenvolvimento disponíveis.

Tecnologias novas estão em pleno desenvolvimento, como exemplo citamos a utilização de tecnologias para aliar alta condutividade em altas temperaturas, para utilizar e explorar mais as ligas disponíveis, resultando em condutores de menor peso e mais eficientes.

De um modo geral os resultados mostram-se promissores, com indicativos de se poder trabalhar mais alguns aspectos observados, que podem permitir além da maior eficiência dos condutores compactos desenvolvidos no Brasil.

VIII. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado do esforço e dedicação, compartilhado entre vários colegas de trabalho, professores, com os quais continuamos a aprender e desenvolver.

Um agradecimento em especial a Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão da ER/LT – CEMIG e UFMG, que nos deram o suporte necessário para que este trabalho se realizasse.

Em especial, agradecemos as parcerias desse P&D.

- FURUKAWA
Eng. Sidnei Massami Ueda
- Professores (UFMG):
Depto. Elétrica:
José Osvaldo Saldanha Paulino
Gláscio Costa de Miranda
Eng. José Luiz Cerqueira Lima
Wallace do Couto Boaventura
Depto. Mecânica:
Alexandre Queiroz Bracarense
- PARTICIPANTES DOS ÓRGÃOS –CEMIG:
Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão –ER/LT
José Milton da Costa Brito
Gernan Edson Gimarães
Giovani Eduardo Braga
Osvaldo Campos Filho
Toda a equipe técnica e administrativa que trabalhou no projeto

Aos demais companheiros CEMIG que participaram indiretamente deste trabalho, os nossos agradecimentos.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] EDF – ELECTRICITÉ DE FRANCE - Project Conjoint de de Recherche et D'Essais sur les conducteurs Compacts . Hydro Québec - Joint Research and Testing Project on Compact Conductors
- [2] Nascimento, Carlos Alexandre M. – Metodologia Experimental para a Utilização de Cabos Termorresistentes (TAL) em Linhas e Redes de Distribuição – Dissertação de Mestrado – UFMG – Dpto. de Eng. Mecânica – Out/1999
- [3] Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above 2nd ed. Electric Power Research Institute
- [4] Rubens Dario Fuchs “Transmissão de Energia Elétrica : Teoria das Linhas em Regime Permanente – vol. 2”.
- [5] ABNT NBR 7302 – Condutores Elétricos de Alumínio tensão –deformação em condutores de alumínio – Método de ensaio
- [6] NBR 7876 – Linhas e Equipamentos de alta tensão – Medição de Radiointerferência na faixa de 0.15 a 30 mhz
- [7] ABNT NBR 7302 – Condutores Elétricos de Alumínio tensão –deformação em condutores de alumínio – Método de ensaio
- [9] NEMA 107 – Methods of Measurement of Radio Influence Voltage (riv) of high –voltage apparatus
- [10] NBR 6936 – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta tensão
- [11] Safe Engineering Services & Technologies ltd. “ CDEGS – Current Distribution Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure Analysis” .
- [12] NBR 7875 – Instrumentos de Medição de Rádiointerferência na faixa de 0.15 a 30 mhz Belo Horizonte, 30/07/2002.