



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GLT/13
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

UMA TECNOLOGIA INOVADORA PARA AUMENTAR O DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Eduardo Blauth(*)
General Cable Brasil

Vijay Mhetar
General Cable Corp

Rogério Tocchetto
General Cable Corp

RESUMO

O presente trabalho detalha uma solução técnica inovadora que usa como base o conhecimento tradicional de cabos nus de alumínio e a associada infra-estrutura, porém com ganho significativo de eficiência e ampacidade no sistema, através da redução da temperatura operacional do condutor, impactando diretamente o custo operacional pela redução de perdas elétricas e melhorando assim a confiabilidade da rede.

PALAVRAS-CHAVE

Perdas, ampacidade, emissividade, temperatura operacional, recapacitação

1.0 - INTRODUÇÃO

O cabo nu de alumínio representa a maneira mais eficaz e econômica de transmitir energia elétrica no mundo moderno, e cálculos dimensionais e estruturais consideram parâmetros tradicionais referentes a propriedades intrínsecas aos materiais em uso no sistema. Ao passar das décadas, o significativo aumento na demanda de energia gera situações onde a rede existente opera próxima ao seu limite máximo de transmissão, no qual a elevada temperatura na linha gera grandes perdas elétricas reduzindo assim a eficiência e confiabilidade do sistema além de impactar negativamente o custo operacional da rede. A solução tradicional aplicada para melhorar a confiabilidade da rede por aumento de demanda de energia é o redimensionamento ou troca do tipo de condutores do sistema para o aumento de ampacidade na linha, o que comumente requer gastos estruturais para acomodar novos cabos.

O projeto mecânico da linha leva em consideração uma série de variáveis que irão orientar a escolha das melhores alternativas de construção dos cabos. Está intrinsecamente ligado ao projeto elétrico, uma vez que a capacidade de transmissão de corrente do cabo está limitada por sua máxima temperatura de operação, a partir da qual inicia-se o processo de recozimento do alumínio, o que causa a perda da resistência mecânica do material e consequentemente o aumento das flechas dos condutores, que não devem ultrapassar os limites mínimos de segurança estabelecidos.

No sistema tradicional de rede elétrica, grande parte da energia gerada é perdida durante as etapas de transmissão e distribuição [1]. Enquanto as perdas publicadas variam de acordo com a fonte de informação e com o período vigente, a Tabela 1 sumariza números mostrando a ordem de magnitude das perdas totais observadas em alguns países. O Departamento de Energia Americano (US DoE) estimou que em 2009 as perdas do sistema dentro dos Estados Unidos foram da ordem de US\$24 bilhões, o que se traduz em um custo anual de cerca de US\$320 por residência naquele país. No Brasil as perdas totais são estimadas em torno de US\$1 bilhão, considerando dados do ONS de consumo em 2014 de 39.673 GWh e custo de geração hidrelétrica na ordem de US\$135/MWh [2]. Segundo a definição da Aneel, perdas elétricas são classificadas como *Perdas Técnicas* e *Perdas Não Técnicas*. As *Perdas Técnicas* são as associadas à eficiência do sistema em si, na qual a maior parte é atribuída às perdas elétricas resistivas (perdas de Joule) [3]. O presente trabalho foca na porção de Perdas Técnicas.

Tabela 1: Total de perdas elétricas em sistemas de alguns países. [4]

País	Perda %	País	Perda %	País	Perda %
Suécia	4,4	China	7,0	Hungria	10
Reino Unido	6,0	Portugal	7,5	Rússia	11
Estados Unidos	6,0	Canadá	8,0	Austrália	11
Finlândia	6,3	México	8,0	África	11
Noruega	6,6	Espanha	8,3	Brasil	19
Comunidade Européia	7,0	Grécia	9,2	Índia	25

O balanço térmico de um cabo nu em operação é regulado por um conjunto de fatores ambientais, por características inerentes aos materiais em uso, detalhes construtivos do condutor em si e pelo calor gerado pelas perdas resistivas do condutor em serviço, como ilustrado na Figura 1.

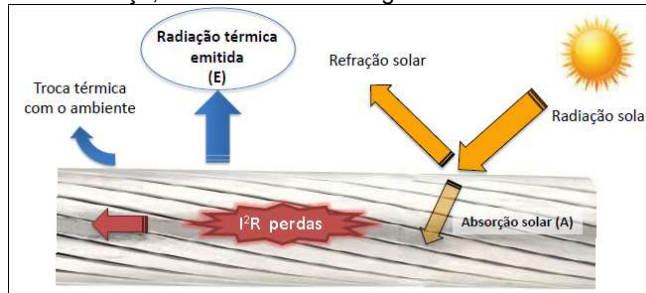


FIGURA 1. Ilustração das variáveis que regulam a temperatura operacional de um cabo elétrico nu.

Perda elétrica (de Joule) depende diretamente da resistência elétrica do condutor, que por si muda com a temperatura de operação, seguindo a “Função A” da Figura 2, onde R_{T2} representa a resistência do condutor em uma nova temperatura, R_{T1} a resistência do condutor a uma temperatura padrão, T representa temperatura e α representa o coeficiente de variação de temperatura da resistência. Outros fatores que regulam a temperatura operacional do condutor além da corrente e resistência são as variáveis ambientais (ganho solar e troca térmica por convecção), além de características de emissividade do cabo em si. A “Função B” da Figura 2 ilustra o impacto da capacidade de troca térmica do condutor na ampacidade do cabo, onde I e R representam a ampacidade e a resistência do condutor respectivamente, e Q_c , Q_r e Q_s representam calor dissipado por convecção, radiação e ganho solar, respectivamente. Já a “Função C” da Figura 2 mostra a importância da emissividade ϵ na capacidade do condutor trocar calor com o ambiente, onde D e T_c são diâmetro e temperatura do condutor respectivamente, e T_A é a temperatura ambiente.

Função A	Função B	Função C
$R_{T2} = R_{T1} (1 + \alpha \{T_2 - T_1\})$	$I = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R}}$	$Q_r = 0,138 \cdot D \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_A}{100} \right)^4 \right]$

FIGURA 2. Ilustração do impacto da (A) temperatura na resistência elétrica, (B) condições ambientais na ampacidade e (C) impacto da emissividade na troca térmica com o ambiente. [5] [6] [7]

Considerando o impacto da emissividade na temperatura e indiretamente na resistência elétrica do condutor, um cabo com emissividade otimizada pode ser usado em projetos tendo em vista diferentes propósitos técnicos, incluindo aumento de ampacidade mantendo as características dimensionais e de peso da linha, ou para redução de perdas elétricas resistivas reduzindo também a flecha por conta da temperatura operacional mais baixa. A Figura 3 ilustra possíveis resultados comparando um cabo com emissividade padrão com um cabo idêntico porém com emissividade otimizada.

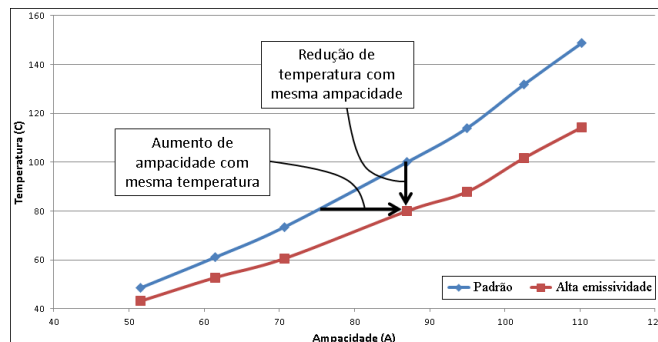


FIGURA 3: Possíveis estratégias de projeto com otimização da emissividade em condutores elétricos.

A emissividade de um cabo de transmissão depende de dois fatores importantes, que são área superficial e emissividade intrínseca do material que constitui a superfície do cabo [8] [9]. Alumínio é um material com condutividade térmica e elétrica relativamente alta, porém com baixo coeficiente de emissividade, motivo inclusive que torna esse material perigoso em ambiente de manufatura pelo fato que promove baixa radiação térmica mesmo quando em alta temperatura, causando assim que passantes sejam propensos a queimaduras por toque.

O presente trabalho demonstra o enorme impacto de um revestimento superficial em cabos nus tradicionais, na temperatura operacional do circuito ou no aumento de ampacidade do mesmo. Este trabalho também compartilha um breve sumário de um extenso protocolo de abuso mecânico no revestimento superficial de amostras para avaliar a durabilidade mecânica e ambiental da solução técnica proposta.

2.0 - EXPERIMENTAL

O protocolo experimental aqui descrito considera resultados de pequena escala, resultados de testes em campo e finalmente um breve sumário de resultados de abuso mecânico e de envelhecimento ambiental acelerado. Os experimentos aqui descritos foram executados em laboratório de alta tensão da General Cable nos Estados Unidos, no laboratório nacional de Oak Ridge (ORNL) e finalmente com auxílio de clientes e de laboratórios externos à General Cable.

2.1 Testes em Escala de Laboratório

O processo de validação inicial em escala de laboratório foi executado de maneira que amostras padrão foram intercaladas com amostras com construção idêntica porém revestidas (com alta emissividade térmica), conectadas com equalizadores e equipadas com termopares no ponto médio de cada amostra, como detalhado na Figura 4. A corrente induzida no circuito foi suficiente para atingir temperaturas de 100°C e 150°C acima da temperatura ambiente, como prescrito na ANSI C119.4-2004, sem exposição à radiação solar e com mínima troca térmica por convecção, em ambiente de laboratório.

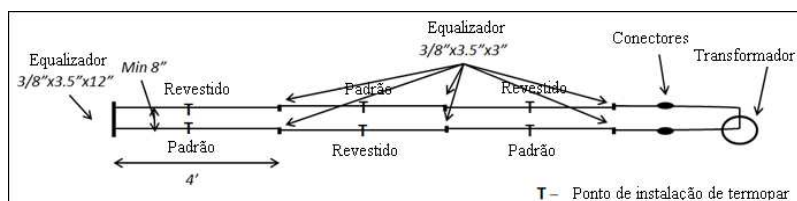


FIGURA 4: Detalhes de teste em laboratório para validação em pequena escala.

Os resultados observados estão sumarizados na Figura 5, onde as reduções de temperatura observadas variam de 19% para amostras testadas em temperatura mais baixa a 24% para as amostras testadas em temperatura mais elevada. Testes adicionais neste mesmo sistema sugerem que as amostras tratadas exibem ampacidade em torno de 20% superior à padrão para atingir a temperatura de teste de 100°C acima da ambiente, validando a suposição detalhada na Figura 3. Testes com radiação solar artificial (lâmpadas de metal hálido) indicam que a diferença percentual de temperatura não muda significativamente entre amostras padrão e revestida nesta condição.

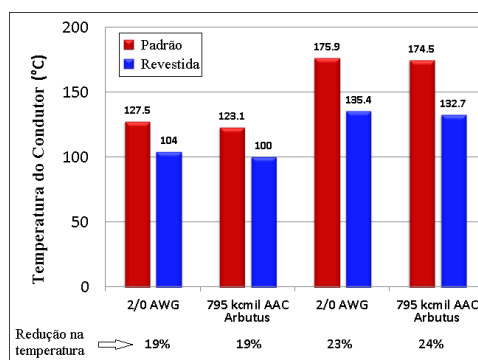


FIGURA 5: Sumário dos resultados observados em escala de laboratório.

Testes similares ao descrito pelo esquema da Figura 4 foram feitos em diferentes temperaturas, para medição do impacto da alta emissividade de acordo com a temperatura de serviço da rede. Os resultados observados mais uma vez reiteram a suposição da Figura 3, onde o impacto da emissividade na melhora de eficiência do sistema aumenta com o aumento da temperatura operacional. Traduzindo esse ganho de eficiência em temperatura operacional média, e convertendo as reduções de temperaturas medidas em laboratório em reduções de perdas elétricas, a redução de custo operacional estimado assim fica detalhada na Tabela 2.

Tabela 2: Percentual de redução de temperatura (experimental) com a respectiva projeção de economia operacional por fase, para cabo Drake ASCR.

Temperatura de serviço, °C	Redução em temperatura, %	Ampacidade (A)	Perdas (padrão) R\$/km-ano*	Perdas (revestido) R\$/km-ano*	Economia R\$/km-ano*
50	11.1	590	R\$ 34.808	R\$ 34.074	R\$ 734
60	13.6	740	R\$ 55.416	R\$ 53.697	R\$ 1.719
75	17.6	910	R\$ 87.010	R\$ 82.645	R\$ 4.365
100	20.0	1122	R\$ 141.668	R\$ 130.901	R\$ 10.767
115	22.8	1225	R\$ 176.200	R\$ 158.644	R\$ 17.556

*Baseado em custo de geração de R\$135/MWh

2.2 Testes em Escala Comercial

O impacto de emissividade otimizada está em teste em escala comercial com um cabo Drake ACSS (795kcmil), com o auxílio do laboratório nacional de Oak Ridge (ORNL) nos Estados Unidos, na divisão PCAT (Powerline Conductor Accelerated Test Facility). Neste projeto, termopares foram instalados no meio de cada vão de 150 pés (45,7m) ao longo dos 1.200 pés (365,8m) de comprimento total, além de equipamento para medição de flecha. Dados ambientais como direção e velocidade do vento e radiação solar também estão sendo coletados ao longo do teste. Para o propósito de avaliação do desempenho em campo do cabo com alta emissividade, o mesmo está sendo carregado com condições variadas cíclicas, comparando com um cabo padrão instalado no mesmo circuito com construção idêntica. Resultados parciais deste estudo estão sumarizados na Figura 6 e na Tabela 3, resultados que superam os experimentos conduzidos em laboratório e se aproximam aos resultados de simulação.

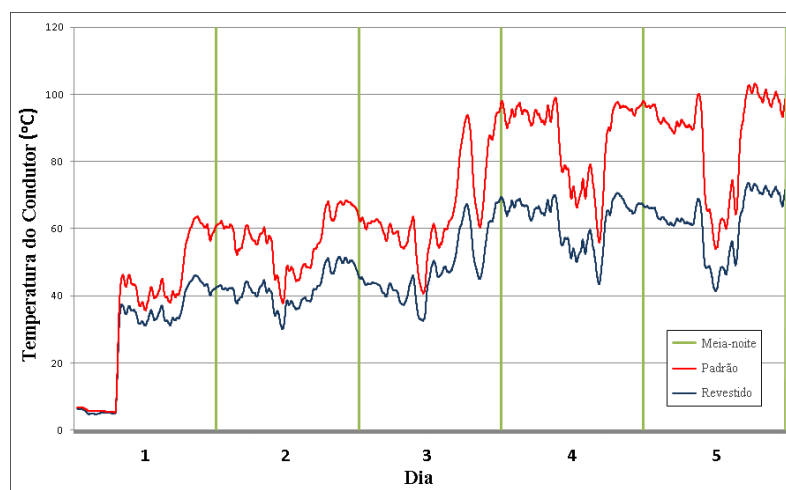


Figura 6: Exemplo de resultados de cabo Drake ACSS em serviço no campo, em ORNL / PCAT.

Tabela 3. Cabo Drake ACSS em serviço no campo, em ORNL / PCAT. Flecha para vãos de 45,7m (150 pés).

Temperatura ambiente (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Condutor padrão (°C)	Condutor revestido (°C)	Redução na temperatura de serviço	Redução da flecha (m)
9	0,33 – 1,10	90	72	20%	0,15
8	0 – 1,43	119	90	24%	0,21
8	1,34 – 1,74	125	94	25%	0,27
6	0,06 – 0,98	166	125	25%	0,46
6	0,12 – 1,46	200	150	25%	0,49
4	ND	240	174	28%	0,69
2	0,64 – 0,67	275	190	31%	0,87

2.3 Abuso Mecânico e Ambiental e Teste de Corona

Na indústria de cabos nus a expectativa do mercado e a própria justificativa econômica dos projetos estão tradicionalmente associadas a produtos com alta durabilidade e robustez. Por esse motivo, os cabos associados com o presente estudo fizeram parte de uma bateria de testes de durabilidade em laboratórios internos e externos à General Cable (Kinectrics), para estimar a confiabilidade do revestimento inorgânico de alta emissividade em questão, ao longo de décadas de serviço em campo. Um breve sumário dos testes de abuso mecânico e ambiental encontra-se na Tabela 4, porém em resumo o revestimento superficial com alta emissividade demonstrou excelentes características de durabilidade, resultado que se alinha com a expectativa para a aplicação em questão, incluindo os testes mecânicos sequenciais da concessionária norte-americana AEP (American Electric Power), que incluem puxamento por polia, esforço galopante, vibração eólica e ciclo de tração (esforço mecânico repetitivo).

Tabela 4. Sumário de alguns testes mecânicos e ambientais e seus respectivos resultados.

Teste	Detalhes	Métrica	Resultado
Adesão	ASTM D3359 com fita PA-280630	Observar o revestimento	Inalterado
Estabilidade térmica	325°C x7 dias; 250°C x2 dias; 150°C x26 dias	Massa; flexibilidade	Inalteradas
Puxamento (polia)*	Cabo puxado 27 ciclos a 20° e 3 ciclos a 30°	Observar o revestimento	Inalterado
Esforço galopante*	Cabo sob galloping por 3 ciclos de 8 horas	Observar o revestimento	Inalterado
Vibração eólica*	Cabo sob vibração por 40 dias	Observar o revestimento	Inalterado
Ciclo de tração*	Tração de 20 a 85% do máximo do cabo, 5x	Observar o revestimento	Inalterado
Xenônio	ASTM G155 ciclo 1 por 10.000 horas	Emissividade, espessura	Inalteradas
Calor & umidade	Teste 85/85: 85°C e 85% umidade, 90 dias	Flexibilidade, espessura	Inalteradas
Imersão em água	Imersão, pH neutro, 90°C por 7 dias	Mudança de massa	<0,02%
Ambiente ácido	Imersão, pH 3-4 por 7 dias	Mudança de massa	<0,2%
Ambiente básico	Imersão, pH 8-9 por 7 dias	Mudança de massa	<0,1%
Ambiente salino	Imersão em solução 3% salina, por 7 dias	Mudança de massa	<0,1%

*Testes que constituem o protocolo de testes mecânicos sequenciais da concessionária AEP.



Figura 7. Ilustração da amostra em teste de puxamento por polia.

O revestimento de alta emissividade estudado foi submetido a testes de indução de corona, e ambas tensões de indução positiva e negativa apresentaram valores sensivelmente superiores aos cabos padrão de mesma construção. Os resultados observados e ilustração de corona positivo estão sumarizados na Figura 8.

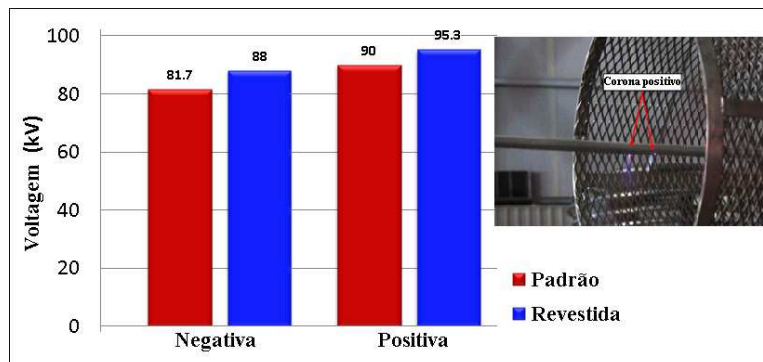


Figura 8: Sumário de resultados de testes de tensão de indução de corona.

3.0 - CONCLUSÃO

De acordo com os resultados observados e descritos no presente trabalho, a emissividade térmica em condutores nus é um fator que deveria ser considerado como crítico durante o projeto de linhas de energia, pelo potencial econômico consequente da otimização dos cálculos estruturais e também pelo impacto econômico pelo potencial de redução do custo operacional da rede, consequência da redução da temperatura de serviço, que diretamente reduz as perdas elétricas resistivas e impactando também a flecha observada nos vãos.

O material estudado reduziu em testes de campo a temperatura de serviço dos condutores de 20 a 31% comparando com os condutores padrão, dependendo da temperatura de serviço imposta no sistema. Com durabilidade ambiental e mecânica estimada a ser compatível à durabilidade do sistema como um todo, além de

um sensível aumento na tensão de indução de corona, o revestimento de alta emissividade desse estudo desponta como uma solução técnica de alto potencial, aplicável a todos os desenhos e projetos de cabos nus em uso no mercado atual.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Thue, William A., Electrical Power Cable Engineering, second edition, Marcel Dekker, Inc, 2003
- [2] Relatório anual de resultados da Energisa, 2013
- [3] Aneel PRODIST Módulo 7: Procedimentos de distribuição de energia elétrica nacional, Rev 3, 5/4/2013
- [4] Queiroz, Leonardo M. O., Estimação e Análise das Perdas Técnicas na Distribuição de Energia Elétrica, Unicamp, 2010
- [5] ANSI / IEEE – ANSI/IEEE Std 738: IEEE Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperature and Ampacity Under Steady-State Conditions, 1986
- [6] House, H.E. and Tuttle, P.D. Current-Carrying Capacity of ACSR. AIEE Winter General Meeting, February, 1958
- [7] ALCOA. Current-Temperature Characteristics of Aluminum Conductors, Alcoa Conductor Engineering Handbook, Section 6
- [8] Lewis, W.A. and Tuttle, P.D. The Resistance and Reactance of Aluminum Conductors, Steel Reinforced. AIEE Pacific General Meeting, August, 1958
- [9] Neher, J. H. e McGrath, M. H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems. AIEE Transactions, part III – Power Apparatus and Systems, Vol. 76, outubro de 1957

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Eduardo Augusto Blauth

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 1960

Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS) em 1984, com especialização em Projetos de Subestações de Alta Tensão pela Universidade de São Paulo (USP) e Instalações Elétricas pela Faculdade de Engenharia Industrial.

Atua na indústria de condutores elétricos para baixa, média e alta tensão, tendo adquirido conhecimentos no Brasil e no exterior ao longo de mais de 20 anos de vivência em empresas fabricantes de cabos condutores. Atualmente gerencia o Departamento de Engenharia de Produto e Desenvolvidimentos da General Cable no Brasil.