



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**A EXPERIÊNCIA DA CEMIG NO USO DE CONDUTORES ESPECIAIS NAS FASES DE VIABILIDADE,
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO.**

**Carlos A. M. Do Nascimento(*), Maurissone F. Guimarães, Igor Luiz de M. Motta e Edino B. Giudice filho
Cemig Distribuição S. A.**

RESUMO

Este artigo apresenta o estágio atual do uso da tecnologia de condutores em liga e geometria especiais para linhas aéreas de energia. O objetivo é apresentar resultados obtidos pela CEMIG por meio de estudos e de aplicação dessa nova geração de condutores como estratégia para otimizar os investimentos na ampliação da capacidade de transmissão. Também constitui outro objetivo deste trabalho apresentar uma modelagem analítica de avaliação técnica e econômica para estudo de alternativas para projetos de recapitação (recondutoramento) e expansão (linhas novas) com o uso desses condutores.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, expansão do sistema elétrico, recapitação, condutores especiais, monitoramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

No projeto de linhas aéreas de energia há duas restrições mais importantes na determinação da capacidade de transmissão: i) altura do condutor ao solo, a qual é definida em norma técnica para operação segura da instalação (1); e ii) limite térmico de operação associado à preservação da vida útil do condutor. Para um dado vão da linha aérea, a altura do condutor ao solo depende diretamente do peso próprio e do perfil térmico do condutor, que, por sua vez, é função do valor da corrente e das condições climatológicas de contorno no condutor. A evolução da tecnologia de materiais permitiu o desenvolvimento de novos condutores para operar em elevadas temperaturas (de 100 a 250 °C) com flechas reduzidas, possibilitando, com isso, manter a mesma altura dos suportes das linhas existentes (2, 3, 4). Embora a capacidade de condução de corrente dos condutores tradicionais ACSR e especiais sejam similares (2), a temperatura máxima em regime de trabalho contínuo dos condutores em liga tradicional Al 1350 não pode superar 90 °C, para não haver deterioração das propriedades mecânicas pelo efeito de recozimento (6). Na família de condutores em liga de alumínio termorresistente e de baixa flecha temos: i) condutores com núcleo de aço carbono tipo Invar; ii) condutores com a camada de alumínio recozido; iii) condutores com núcleo compósito (5); e iv) condutores com núcleo tipo GAP. A aplicação de condutores especiais permite aumentar a capacidade de transporte das linhas aéreas por meio do aumento do perfil térmico do condutor. Entretanto, a elevação de temperatura de operação do condutor irá gerar maiores perdas por efeito Joule. Por outro lado, para a mesma capacidade de transmissão, as dimensões físicas desses condutores são inferiores aos condutores tradicionais, o que permite otimização dos projetos das linhas aéreas novas ou em operação.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DOS CONDUTORES ESPECIAIS

Em geral, todos os condutores especiais utilizam ligas em alumínio termorresistente (TAL) ou ligas especiais tipo Al 6201 (7), que podem operar em temperaturas mais elevadas, na faixa de 150 até 250 °C (6) e com uso de geometria trapezoidal (9).

(*) Endereço Av. Barbacena, n° 1200 – 20° andar – ala A2 – CEP 30.190-131 – Belo Horizonte, MG – Brasil
Tel: (+55 31) 3506-2963 – Fax: (+55 31) 3506-2963 – Email: caxandre@cemig.com.br

2.1 Condutores com Núcleo de Aço Invar

Essa tecnologia utiliza núcleo em liga de aço especial denominada Invar (abreviação de invariável). As ligas Invar possuem Fe e 36% de Ni, o que propicia redução no coeficiente de expansão térmica. Enquanto os condutores ACSR têm o núcleo em aço com coeficiente de expansão da ordem de $20,0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, nos condutores Invar esse parâmetro vale $3,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Dessa forma, o núcleo Invar confere as seguintes características: redução de flechas e *creep* do condutor; maior resistência mecânica a alta temperatura (TAL e ZTAL); aumento da confiabilidade das linhas e redução das perdas elétricas a uma mesma temperatura.

2.2 Condutores com Camada de Alumínio Recozido

Os condutores com camada de alumínio recozido ACSS (*Aluminium Conductor Steel Suported*) (12) são construídos com núcleo de aço galvanizado e fios condutores em liga de alumínio 1350, assim como os condutores ACSR. Entretanto, a liga dos condutores ACSS passa por um processo especial de tratamento térmico durante sua fabricação. Quando em operação, esse recozimento prévio permite temperaturas de operação de até 200 °C, sem perda de propriedade mecânica. Outra diferença básica em relação aos condutores ACSR é a transferência de quase todo esforço mecânico para o núcleo, o que permite operação em alta temperatura com flecha reduzida.

2.3 Condutores com Núcleo de Compósito

Núcleo de compósito pode ser definido como um material obtido a partir da aglutinação de dois ou mais elementos, exercendo funções de matriz e reforço. A matriz confere estrutura ao compósito, enquanto os materiais de reforço realçam propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas. Na categoria de condutores com núcleo compósito encontram-se os condutor ACCR (*Aluminium Conductor Composite Reinforced*) e o ACCC (*Aluminium Conductor Composite Core*). A alma dos condutores ACCR é constituída a partir de fibras de um compósito de óxido de alumínio (Al_2O_3) sobre uma matriz de alumínio (Al). Nos condutores ACCC, o núcleo é composto por fibras de carbono revestidas por uma camada isolante em resina epóxi, cuja função é impedir processo de oxidação (10). Os núcleos compósitos apresentam coeficiente de expansão térmica até três vezes menor, o que reduz consideravelmente a flecha desses condutores. As camadas condutoras do ACCR são compostas de uma liga de alumínio-zircônio que permite operação a temperaturas em regime contínuo de 210 °C.

2.4 Condutores com Núcleo tipo GAP

Os condutores tipo GAP têm uma camada em material sintético entre o núcleo de aço e a camada condutora em alumínio, que reduz consideravelmente as flechas desses condutores (11). Esse material sintético permite uma movimentação independente entre o núcleo de aço e as camadas condutoras em alumínio termorresistente, resultando em um coeficiente de expansão térmica quase duas vezes menor que no condutor tradicional ACSR.

2.5 Condutores com Liga Al 6201

Os condutores AAAC "All Aluminum Alloy Conductor" em liga Al 6201 (7) não possuem alma de aço e são construídos em liga alumínio, magnésio e silício, que proporciona uma redução na relação entre o peso e a sua resistência mecânica de esticamento, quando comparados aos condutores tradicionais ACSR. Outra característica é uma melhoria na superfície para proteção contra corrosão.

3.0 - CRITÉRIOS PARA USO DE CONDUTORES ESPECIAIS

3.1 Características Gerais

Apesar dos condutores especiais terem diferenças construtivas em relação aos condutores tradicionais, as implicações nas fases de projeto e construção de linhas aéreas são perfeitamente adaptáveis. Na fase de projeto, a principal alteração está na redução do coeficiente de dilatação térmica percebida por meio da redução das flechas. Na construção, as alterações mais significativas estão na etapa de lançamento e grampeamento do condutor, que tem um processo mais trabalhoso, porém perfeitamente adaptável pelas equipes de construção. A Tabela 1 apresenta as principais variáveis que devem ser consideradas para a seleção dos condutores quando aplicados em projeto de linhas aéreas. Apesar dos condutores especiais terem diferenças construtivas em relação aos condutores tradicionais, na forma ou no tipo de material utilizado, as implicações nas fases de projeto e construção de linhas aéreas são adaptáveis. Como exemplo de aplicação do condutor tipo GAP na Cemig em um projeto de recondução no 138 kV, a Figura 1 mostra o processo de grampeamento realizado com o condutor já lançado e regulado no vão da linha, sendo essa a principal e mais impactante diferença no processo de construção do condutor tipo Gap.



FIGURA 1 – Processo de grampeamento realizado com o condutor já lançado e regulado no vão da linha.

Tabela 1 – Características para Aplicação em Projeto dos Condutores

Componente	Solução 1	Solução 2	Solução 3
[Tipo] Condutor	[ACSR] Linnnet 336 MCM	[TACSR] Linnnet-TW 386 MCM	[GZTACSR] Lynx-TW 185 mm ²
Diâmetro Total	18,29 mm	18,14 mm	17,80 mm
Área de Alumínio	170,3 mm ²	205,22 mm ²	184,5 mm ²
Coefficiente de Dilatação	0,000020 °C ⁻¹	0,000016 °C ⁻¹	0,0000115 °C ⁻¹
Tensão de Ruptura	6393 kgf	6393 kgf	6240 kgf
Peso	688 kg/km	772 kg/km	700,3 kg/km
Resistência 25 °C	0,1594 Ω/km	0,1386 Ω/km	0,1400 Ω/km
Resistência 75 °C	0,2032 Ω/km	0,1744 Ω/km	0,1800 Ω/km
Temperatura operação	90 °C	150 °C	250 °C
Autoamortecimento	Normal	Alto	Alto
EDS (%)	18,5	20	20

4.0 - MODELO ANALÍTICO DE ANÁLISE TÉCNICO E ECONÔMICO

No modelo analítico de análise técnica e econômica para aplicação dos condutores especiais, os custos devem ser considerados de forma distinta, isto é, custos associados ao investimento (condutor, estruturas, acessórios, mão-de-obra e outros) e o custo das perdas elétricas. O custo de operação e manutenção foi considerado equivalente tanto para os condutores convencionais quanto para os especiais (não são esperadas diferenças significativas). Dessa forma, por meio dos custos de investimentos e custos das perdas é possível calcular o custo global aproximado de cada alternativa com o uso dos condutores especiais em relação ao condutor tradicional como referência. Essa análise econômica permite escolher a opção com melhor retorno para a empresa e a sociedade na medida que se otimiza o gasto de capital para obter um resultado equivalente por meio do Valor Presente Líquido, avaliando um período de 30 anos. A aplicação ou não dos condutores especiais em projeto de linhas aéreas esbarra basicamente em dois fatores: i) custo mais elevado dos condutores especiais e ii) custo das perdas elétricas. Para uma análise correta, deve haver diferenciação entre estudos de expansão (novas linhas) e de recapacitação (recondutoramento) conforme explanação a seguir.

4.1 Novas Linhas (Expansão)

No caso de estudos na expansão de linhas novas, quando é mantido constante o diâmetro externo dos condutores, ainda não são bem conhecidas às vantagens do uso dos condutores especiais. O fato é que, em função do custo maior dessa tecnologia frente à convencional, ainda é pouco explorado os estudos de planejamento e de viabilidade técnica com foco na expansão das linhas aéreas utilizando os condutores especiais. De qualquer forma, na análise de planejamento deveriam ser mensurados os ganhos com: i) aumento de capacidade e confiabilidade para o sistema interligado; ii) aumento da potência de emergência, e iii) redução das perdas ôhmicas, uma vez que, quando se empregam os condutores com o mesmo diâmetro externo, a resistência elétrica é menor nos condutores especiais, em função da seção maior de alumínio na formação trapezoidal. Neste contexto, os condutores especiais irão fornecer uma solução técnica mais eficiente pelo lado das perdas elétricas no longo prazo, mas o investimento inicial poder ser maior, uma vez que o custo dos condutores especiais ainda é maior que o custo do condutor tradicional.

4.2 Recapacitação

No caso da recapacitação, por meio do recondutoramento, há uma série de vantagens em relação à construção de uma linha nova, tais como: i) evita-se a constituição de nova faixa de servidão; ii) evitam-se custos com licenciamento ambiental; iii) reutilização das torres existentes; e iv) redução dos prazos na realização das obras.

Por outro lado, quando há aumento da potência transmitida substituindo condutores convencionais por especiais, as perdas elétricas são maiores e devem ser avaliadas, devido ao aumento da corrente e, conseqüentemente, da temperatura do condutor. De forma global, o modelo analítico de viabilidade técnica e econômica é dividido em: i) quantificação do custo do investimento em materiais, serviços, mão-de-obra e outros custos; e ii) quantificação do custo estimado das perdas elétricas.

4.3 Custo Global

O custo global de uma linha aérea com condutor tradicional considerando o custo de investimento e o custo de perdas elétricas trazidas para um valor presente líquido – VPL pode ser definido por [1], onde o custo está dividido entre o custo do investimento inicial “ C_i ” e o custo das perdas elétricas por efeito Joule “ C_p ”. Para encontrar o custo global estimado dessa mesma linha aérea com uso dos condutores especiais basta aplicar o Fator de Investimento Variável “ F_i ” e o Fator de Perda Elétrica “ F_p ” em [1], que resulta [2] e permite explicitar os custos envolvidos no dimensionamento do condutor.

$$C_g = C_i + C_p \quad [1]$$

$$C_{ga} = (C_{Fixo} + F_i \cdot C_{Var}) + F_p \cdot C_p \quad [2]$$

onde,

- C_g : custo global do investimento da linha aérea com uso de condutor tradicional (R\$);
- C_i : custo do investimento com materiais e serviços agregados (R\$);
- C_p : valor presente para o custo das perdas acumuladas no período (R\$);
- C_{ga} : custo global ajustado do investimento da linha aérea com uso de condutor especial (R\$);
- C_{fixo} : custo do investimento não afetado pelo dimensionamento do condutor;
- C_{var} : custo do investimento afetado pelo dimensionamento do condutor;
- F_i : fator de investimento variável apurado em função do dimensionamento do condutor;
- F_p : fator de perda obtido pela performance elétrica entre os condutores especial e o tradicional (ex: condutor tradicional ACSR Linnet $F_p=1$ e TACSR-TW Linnet $F_p=0,87$).

4.4 Custo do Investimento

O cálculo do custo do investimento em materiais, serviços, mão-de-obra e outros custos no estudo de viabilidade técnica e econômica de uma nova linha pode ser dividido em parcelas de custo fixo e custo variável, conforme mostra [3], possibilitando apurar as diferenças percentuais entre os custos nas soluções com o uso dos condutores especiais em comparação aos condutores tradicionais. Dessa forma, o custo fixo do investimento não depende do tipo de tecnologia do condutor, mas por outro lado, o custo variável tem dependência direta com o tipo de tecnologia do condutor especial.

$$C_i = C_{Fixo} + C_{Var} \quad [3]$$

4.4.1 Modelo de Cálculo do Custo Variável

O modelo proposto de cálculo do custo variável de investimento explora a relação entre os principais itens que são afetados pelo dimensionamento do condutor. Para isso, o custo variável do investimento para a expansão de novas linhas aéreas é dividido em quatro insumos principais: i) condutores; ii) estruturas e fundações; iii) acessórios; e iv) mão-de-obra de montagem (lançamento do condutor e montagem estruturas e fundações). Os demais insumos (projeto, aterramento, isoladores, cabo pára-raios, aquisição de faixa de passagem, custos associados ao licenciamento ambiental, etc.) são custos fixos em relação à linha aérea. Dessa forma, a modelagem proposta identifica somente os insumos afetados diretamente pelo dimensionamento do condutor.

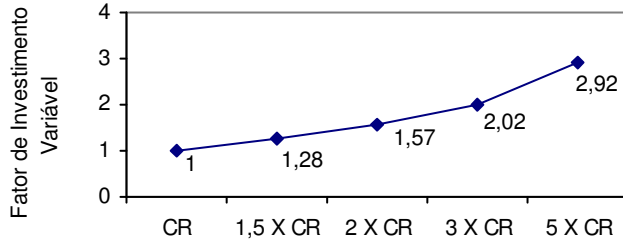
4.4.2 Aplicação do Modelo de Cálculo do Custo Variável

Para verificar a real influência do custo do investimento variável do condutor especial na análise de viabilidade técnica e econômica do investimento deve-se calcular o Fator de Investimento Variável em PU de uma nova linha (expansão), que é o aumento de custo da solução com condutor especial comparado a uma solução de referência com condutor tradicional. Basicamente, o Fator do Investimento Variável captura a relação entre os custos do condutor especial e o condutor referencial tradicional para o mesmo diâmetro externo. Dessa forma, a evolução do custo de investimento variável na expansão pode ser resumida pelo Fator de Investimento mostrado na Figura 2, levando em conta o custo adicional estimado de investimento variável para os condutores especiais quando comparados ao custo do condutor tradicional em mesmo diâmetro externo.

4.5 Custo das Perdas Elétricas

O cálculo das perdas ôhmicas em linhas em operação deve possuir uma modelagem matemática robusta que explore a variação real de corrente e da resistência elétrica em função da temperatura do condutor integrada na

base horária e durante todo o período de operação da instalação. Atualmente, por simplificação, considera-se a resistência elétrica do condutor a uma dada corrente nominal no período de operação da instalação (20 ou 30 anos). Dessa forma, o modelo simplificado ou determinístico de cálculo de perdas ôhmicas pode apresentar resultados diferentes da realidade de campo. A Figura 3 mostra o sensor Power Donut usado para o monitoramento das variáveis de cálculo das perdas por efeito Joule (corrente e temperatura do condutor).



CR = Custo do Condutor de Referência

FIGURA 2 – Fator de Investimento Variável na expansão em relação ao condutor tipo ACSR Linnet, por km de linha aérea (125 MVA no 138 kV)

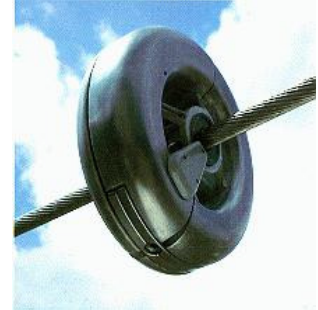


FIGURA 3 – Sensor de temperatura e corrente

4.5.1 Modelo Determinístico – MD

Em [4] é mostrado a formulação das perdas ôhmicas em função de valores determinísticos para a temperatura do condutor e a corrente definida no projeto eletromecânico da linha.

$$P_{MD} = N_F \cdot R_{Tcond} \cdot (F_C \cdot I_{N,Tcond})^2 \quad [4]$$

onde:

P_{MD} : perdas determinísticas por efeito Joule (potência de perdas em W/km);

N_F : número de fases (ex.: sistema trifásico com 1 condutor/fase, $N_F = 3$);

F_C : fator de carga, valor entre 0 e 1;

R_{Tcond} : resistência elétrica do condutor AC (Ω/km) a uma determinada temperatura de referência do condutor;

$I_{N,Tcond}$: corrente elétrica nominal (A), tomada a uma determinada temperatura de referência do condutor.

4.5.2 Modelo Real - MR

Em [5] e [6] é mostrado de forma sintética o cálculo das perdas ôhmicas e custo de perdas (R\$) em função de valores medidos diretamente no condutor, em um sistema trifásico com um condutor por fase, na base média horária por meio do uso da tecnologia de monitoramento em tempo real de linhas aéreas (8):

$$P_{MR} = \sum_{n=1}^{8.760} (3 \cdot L \cdot R_{Tm,n} \cdot I_n^2) \cdot \Delta t \cdot 10^{-6} \quad [5]$$

$$C_{P_{Linha,Período}} = \sum_{m=1}^{Período} P_{MR,m} \cdot C_{MWh} \cdot (1-i)^m \quad [6]$$

onde:

P_{MR} : perdas médias por efeito Joule anuais (MWh), baseado em dados monitorados no condutor;

L : comprimento da linha aérea em (km);

R_{Tm} : resistência elétrica do condutor AC (Ω/km), corrigida em função da temperatura do condutor monitorada;

I_n : corrente elétrica média horária monitorada diretamente no condutor (A);

Δt : intervalo de integração (1 hora);

n : identificação do período de acumulação (1 ano = 8.760 horas);

C_P : valor presente das perdas da linha no período (R\$);

m : identificação do ano (Período = 30 anos);

C_{MWh} : custo das perdas por efeito Joule (R\$/MWh), baseado no Custo Marginal de Expansão (CME);

i : taxa de desconto (12% a.a.).

4.5.3 Medição Real das Perdas por Efeito Joule

Para demonstrar um caso real de cálculo das perdas ôhmicas por meio da tecnologia de monitoramento de linhas aéreas, foi realizada medição em uma linha aérea com condutor tipo Linnet na potência de 125 MVA (525A) no

138 kV. Com isso, foi possível definir um Fator de Perdas Ôhmicas em PU conforme mostra a Figura 4, como sendo a razão entre os valores medidos diretamente no condutor e os valores calculados pelas fórmulas tradicionais, com as seguintes características: i) Perda Real: valores medidos de corrente e temperatura do condutor; ii) Perda Quase-Real: valor calculado usando a corrente média horária medida na temperatura de projeto do condutor; iii) Perda Nominal: valor calculado usando a corrente nominal na temperatura de projeto do condutor; iv) Perda com Fator de Carga: valor calculado usando um Fator de Carga da corrente nominal na temperatura de projeto do condutor. A Figura 4 mostra graficamente o comportamento do Fator de Perda Ôhmica em PU levando em conta os métodos de cálculo das perdas ôhmicas e comparando-os às perdas reais medidas em um ano de medição da média horária da corrente e temperatura no condutor de uma linha aérea em operação real, com as seguintes características:

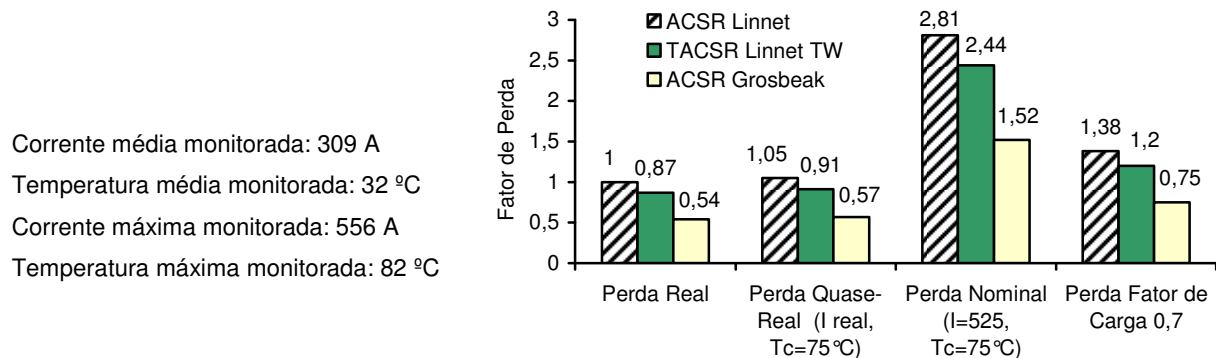


FIGURA 4 – Medição do fator de perdas ôhmicas em relação a uma LT 138 kV e 125 MVA, monitorada em tempo real.

Dessa forma, é possível observar que a perda elétrica do Linnet-TW, mostrada na Figura 4, é 13% menor em comparação a um condutor tradicional no mesmo diâmetro externo. Com a tendência atual de incentivo para reduzir as perdas elétricas e devido ao aumento do custo da energia, a análise das perdas por efeito Joule é determinante para a escolha da solução ótima, principalmente em linhas longas. A utilização da tecnologia de monitoramento do condutor (corrente e temperatura) para cálculo das perdas reais indicou diferenças significativas em relação ao cálculo determinístico. As diferenças encontradas indicam que as perdas dependem muito do perfil de carga da linha e dependem muito pouco do perfil térmico do condutor. Dessa forma, um cálculo de perdas elétricas pode variar expressivamente dependendo do fator de carga a ser considerado pelo planejamento.

5.0 - APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

5.1 Estudo de Expansão

A simulação de estudo de caso teórico, requerido na fase de planejamento, considerando a implantação de uma linha aérea nova, na potência de 125 MVA (525A) no 138 kV foi analisado para três condutores. A Tabela 2 apresenta os parâmetros básicos para cálculo da viabilidade técnica e econômica com o Fator de Perda Ôhmico real conforme mostrado na Figura 4 e calculado por [5] e [6]. O custo global apurado na análise de viabilidade técnica e econômica para a expansão da LT está apresentado na Figura 5.

Tabela 2 – Detalhes das Simulações

Insumo	Simulação
Custo km de LT nova no 138 kV	R\$ 220.000,00 / km
Custo da perda elétrica (R\$/MWh)	R\$ 130,00 / MWh (*)
Custo estrutura de aço (R\$/kg)	R\$ 6,00 / kg
Custo condutor (i ou ii) (R\$/kg)	R\$ 20,00 / kg
Custo condutor (iii) (R\$/kg)	R\$ 40,00 / kg (**)
Período de avaliação	30 anos
Taxa de desconto ao ano	12% a.a.
Crescimento de Carga	Não foi considerado

Nota: (*) valor estimado do Custo Marginal de Expansão.
 (**) valor estimado para simples comparação.

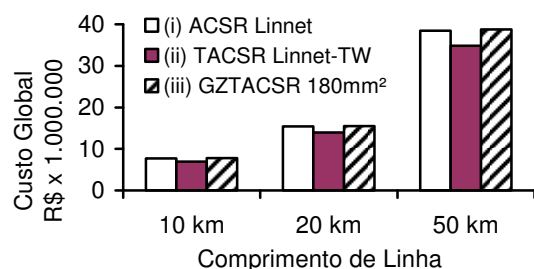


FIGURA 5 – Apuração das simulações de Custo Global na expansão (linha nova 138 kV).

5.2 Estudo de Recapacitação

O estudo de recapacitação de uma linha aérea existente (condutor Linnet 336 MCM e 125 MVA no 138 kV), para uma nova potência de 220 MVA (925A) requerida pelo planejamento foi desenvolvido via recondutoramento com três possibilidades de condutores, tais como: (i) ACSR, Grosbeak 636 MCM; (ii) condutor especial com diâmetro externo equivalente ao Linnet; e (iii) condutor especial com diâmetro externo equivalente ao Grosbeak. O Fator de Perda Ôhmico foi obtido em uma linha monitorada de 170 MVA no 138 kV, calculado por [5] e [6]. A avaliação da análise de viabilidade técnica e econômica é mostrada na Figura 6, com as seguintes condições de cálculo:

- Condutores especiais (ii e iii): dobro do custo do condutor tradicional (i) em mesmo peso.
- Condutor especial (ii) utiliza as estruturas existentes.
- Condutores Grosbeak (i) e (iii) requerem novas estruturas.
- Custo de desmontagem da linha existente não foi apurado em (i) e (iii).

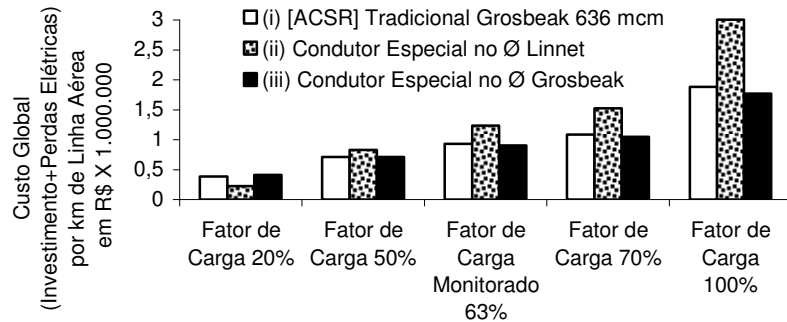


FIGURA 6 – Apuração do custo global na recapacitação por km de linha.

6.0 - APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO DE ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECÔNOMICA

Uma situação real analisada foi utilizada no estudo de reforço no sistema 138 kV para suportar a entrada de geração térmica nova. A solução tradicional considerada foi a construção de uma nova linha com 54 km com condutor ACSR Grosbeak 636 MCM, em substituição a uma linha em operação com condutor ACSR Linnet 363 MCM. Como alternativas, quatro condutores especiais foram analisados e geraram vantagens associadas ao investimento inicial devido aos seguintes custos evitados: i) novas estruturas; ii) condutor de maior diâmetro; iii) licenciamento ambiental; iv) faixa de servidão; e v) desmontagem da linha existente. Na Figura 7 são apresentados os ganhos da parcela de investimento relativo à opção de recapacitação via recondutoramento com condutor especial em relação à alternativa tradicional. Exceto Condutor Especial 2, mostrado na Figura 7, que superou a temperatura de 150 °C em regime normal, os outros três condutores especiais apresentam ganho no investimento inicial considerável em relação a solução tradicional máxima.

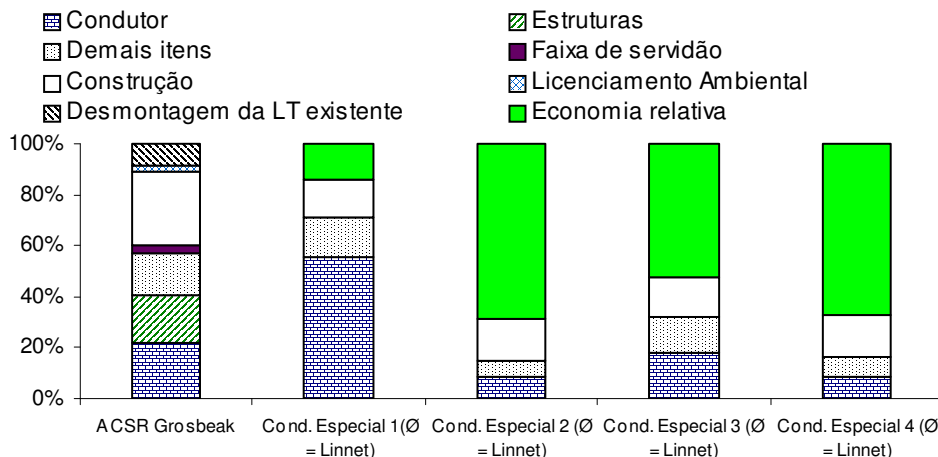


FIGURA 7 – Apuração dos resultados finais do Custo de Investimento em um Estudo Real.

O passo final para definição da melhor solução de viabilidade técnica e econômica está baseada na análise complementar das perdas elétricas, que deve ser adicionada ao investimento global. Conforme foi mostrado na Figura 6, isto é, dependendo do Fator de Carga da Linha de Transmissão em estudo pode-se concluir as seguintes constatações em relação ao Fator de Carga:

- Fator de Carga menor que 50%: Os condutores especiais 3 e 4 são mais econômicos em relação ao investimento global da solução, supondo que o custo desses condutores especiais é até duas vezes maior do que o custo do condutor tradicional em mesmo peso unitário (kg/km).

- Fator de Carga igual ou maior que 50%: Todos os condutores, tanto o tradicional como o especial, têm perdas elétricas elevadas em função do aumento na corrente da linha. Nesta condição os Condutores Especiais 1, 3 e 4, tipo Linnet, têm perdas elétricas ainda mais elevada em relação ao condutor ACSR Grosbeak, o que de forma puramente técnica não se recomendaria como uma solução ótima global. Entretanto, em função de fatores financeiros, como por exemplo, o tempo reduzido de execução de obras e o menor investimento inicial na recapacitação, onde os Condutores Especiais são mais competitivos.

A análise de viabilidade técnica e econômica deve balizar a solução ótima levando em conta o custo do investimento inicial e custo de perdas elétricas, avaliando se o projeto é de linha nova ou de recondutoramento.

7.0 - CONCLUSÕES

Foi apresentado neste trabalho o estágio atual do uso da tecnologia de condutores em liga e em geometrias especiais, apresentando os aspectos essenciais na análise técnica e econômica de estudos de novas linhas de transmissão e ou projetos de recapacitação (recondutoramento). Foram avaliados de forma paramétrica os custos relativos ao investimento inicial entre condutores especiais e os condutores tradicionais ACSR, bem como, as perdas por efeito Joule foram estimadas por diferentes maneiras, sendo que, uma comparação entre o cálculo determinístico e medições reais via monitoramento direto no condutor mostraram como o Fator de Carga de uma linha é determinante no custo global, tanto para a expansão de linhas novas como para o recondutoramento das linhas em operação.

De forma geral, os resultados desse trabalho indicam ganhos associados a nova tecnologia de condutores especiais, particularmente em projetos de recapacitação de linhas com Fator de Carga menor que (50%). Entretanto, quando há aumento da potência transferida e, conseqüentemente, aumento do Fator de Carga (maior que 50%), deve-se atentar para as perdas elétricas, que crescem de forma quadrática com a corrente. Mas, uma outra importante conclusão obtida nesse trabalho é que, na expansão das linhas novas, o uso dos condutores especiais com geometria compacta possuem perdas elétricas até 13% inferiores. Isso resulta em um ganho econômico considerável quando as perdas são trazidas a valor presente. Outros ganhos associados à aplicação desses condutores especiais, em novas linhas, ainda não foram completamente explorados pelas áreas de planejamento e projeto, devido talvez, ao alto custo dessas tecnologias. Entretanto, devido a menores flechas, os condutores especiais trazem ganhos de confiabilidade ao sistema elétrico em função do aumento da capacidade de emergência das linhas. Finalmente, apesar dos ganhos de confiabilidade não serem calculados economicamente, os mesmos podem ser um diferencial na perspectiva de planejamento do sistema.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5422: *Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*. Rio de Janeiro. Fev. 1985.
- (2) SEDAT KARABAY. ACSS/TW Aerial high-temperature bare conductor as a remedy for increasing transmission line capacity and determination of processing parameters for manufacturing. *Technical Report Elsevier*, ago. 2007.
- (3) J. L. REDING, P.E. Development and installation of BPA's new generation transmission conductor. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. PWRD-2, jul. 1987.
- (4) COLE, S. et al. Technical developments for future transmission grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE POWER SYSTEMS, 2005, Amsterdam, nov. 2005. p. 6.
- (5) AHMAD ALAWAR, et al. A Composite Core Conductor for Low Sag at High Temperatures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, jul.2005.
- (6) NASCIMENTO, C. A. M: metodologia experimental para a utilização de cabos termorresistentes (TAL) em linhas e redes de distribuição. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.
- (7) WIEDMER, R.S., Recapacitação de Linhas de Transmissão 138 kV utilizando cabo de alumínio liga 6201 – XIX SNPTEE – RIO DE JANEIRO/BRASIL – OUT/2007.
- (8) NASCIMENTO, C. A. M. et al. Aplicação de tecnologias e monitoramento em tempo real para aumentar a capacidade transmissão em LTs aéreas. XVI SNPTEE, GLT/004, Campinas, out.2001.
- (9) GIUDICE FILHO, Edino B. et al. Desenvolvimento de condutores compactos aplicados a projetos de linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica compacto. XVII SNPTEE, Uberlândia, Outubro-2003.
- (10) GORUR, R. S. et al. Mechanical and electrical issues concerning the use of composite materials for the supporting core in transmission line conductors. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006.
- (11) MAZÓN, J. et al. Gap-Type conductors: influence of high temperature in the compression clamp systems. IEEE Bologna PowerTech Conference, jun. 2003.
- (12) ADAMS, H. W. et al. Steel supported aluminum conductors (SSAC) for overhead transmission lines. IEEE PES Winter Meeting. New York, 1973.