



**GRUPO III
LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

**A Utilização de Condutores de Liga de Al Termo-resistente na
Repotencialização de LT de Transmissão e Sub-transmissão**

Oswaldo Régis Jr*
CHESF

J. Maurício de Barros Bezerra
UFPE

L. A. M. Cabral Domingues
CEPEL

Sidnei Massami Ueda
Furukawa

I

RESUMO

Este Informe Técnico aborda a aplicação de cabos condutores produzidos com uma liga especial, conhecidos por cabos termo-resistentes, como uma alternativa para aumento da capacidade de transporte das linhas de transmissão. Os aspectos abordados baseiam em linhas existentes mas são aplicáveis também a linhas novas.

São descritas as principais características desses cabos e descrevem-se situações típicas do sistema de transmissão onde sua introdução possa apresentar vantagens significativas.

As técnicas de recapacitação abordadas são o recondutoramento e, nas LT com um cabo por fase, a adição de um condutor auxiliar de bitola menor que o existente, formando um Feixe Expandido. Este último oferece além de aumento do limite térmico da LT, aumento da Potência Natural (SIL), com conseqüente redução na queda de tensão. Na conclusão são tecidos comentários sobre a aplicabilidade do cabo termo-resistente nestas técnicas de repotencialização.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Condutores, Limite Térmico, Potência Natural, SIL, Recapacitação de Linhas

1.0 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro teve a sua expansão calcada predominantemente numa geração hidráulica remota, associada a uma malha básica de transmissão até às subestações próximas aos grandes centros de consumo. A partir destas subestações as empresas regionais ou locais montaram a sua malha de sub-transmissão e distribuição até os consumidores.

A maioria destes investimentos ocorreu em empresas ligadas aos governos estaduais ou federal. Com a aceleração da privatização das estaduais e o início da privatização das geradoras federais, o antigo ambiente cooperativo entre estas empresas mudou e a tônica da competitividade aflorou de forma definitiva.

Nestes novos tempos, com as mudanças no setor elétrico, todos os negócios, desde a geração e transmissão básica até a sub-transmissão e distribuição, são chamadas a ter um aumento de rentabilidade.

Na transmissão, onde o custo de novas linhas é bastante elevado, torna-se fundamental desenvolver técnicas que permitam aumentar a capacidade de transporte a baixo custo, contemplando-se a recapacitação das instalações existentes.

Outro aspecto importante na repotencialização de linhas em operação é a maximização da energia transportada por área ocupada pela faixa da linha. Isto reduz a necessidade de negociação de novas faixas de passagem com os órgãos de licenciamento e a comunidade, trazendo menor impacto sobre o ambiente e maior agilidade na ampliação da capacidade de transporte da malha existente.

Na busca pelo aumento da capacidade de transporte das linhas de transmissão diversos avanços tecnológicos foram realizados nos últimos anos. A adoção de equipamentos modernos de compensação reativa e a técnica de feixe expandido [1][2] são exemplos de soluções que permitem aumentar a capacidade de transporte de LT's, especialmente quando o fator limitante está associado às questões de sistemas tais como queda de tensão ou estabilidade.

Neste quadro chega-se a um ponto em que o limite último da linha pode ser a capacidade térmica dos cabos condutores. Constata-se então que é desejável dispor de um avanço tecnológico que ofereça condutores com limite térmico mais elevado, com os quais se poderá alcançar novos patamares de carregamento do sistema de transmissão.

O trabalho apresenta uma investigação do potencial de aplicação de cabos termo-resistentes no sistema elétrico, procurando identificar situações onde a sua adoção torna-se recomendável.

2.0 – AS LIMITAÇÕES DA TRANSMISSÃO

O aumento da demanda leva o sistema de transmissão a uma progressiva elevação do carregamento de seus componentes e qualquer deles pode, individualmente ou em conjunto, limitar a potência transmissível.

Por exemplo, subestações podem limitar a transmissão por conta de superação da capacidade de corrente de chaves seccionadoras e barramentos, ou por atingir o limite de potência de transformadores e equipamentos de compensação reativa. Por estarem situados em uma área restrita, estas limitações são geralmente solucionadas pela adição de novos componentes ou pela substituição por outros de maior capacidade.

No caso das linhas, que atravessam áreas ou regiões com as mais diversas características, e têm um peso significativo no custo total do sistema, a questão toma outra dimensão. Aspectos ambientais, constituição da servidão e licenciamento das obras são um obstáculo crescente à adição de um novo componente. A própria determinação da capacidade da linha, no sistema de transmissão em que está inserida, depende de fatores intrínsecos à própria LT e de fatores sistêmicos.

Um deles, o limite térmico, reflete a característica termo-mecânica da própria linha. A temperatura do condutor é determinada pela sua equação de equilíbrio térmico, e na temperatura máxima deve-se respeitar as distâncias de segurança ditadas por norma., e ser limitada a um valor que não cause danos ao condutor.

O segundo reflete a interação dos parâmetros reatância série, capacitância e potência natural (SIL) da linha, com o sistema. Dependendo do comprimento da linha, do suporte de reativo disponível e da estabilidade do sistema, a potência transportável pode ser limitada pela queda de tensão ou para evitar, em caso da falha de algum elemento, a propagação de desligamentos em cascata, por instabilidade do sistema.

Estes dois fatores foram apresentados de forma segregada para facilitar o entendimento, mas de uma forma geral ocorrem de forma conjunta em um sistema de transmissão mais complexo.

Em um sistema malhado a potência se distribui proporcionalmente às reatâncias das linhas e não a seus limites térmicos, podendo ocorrer corrente elevada em uma linha com menor capacidade. Linhas em fechamento de anel, que em regime normal sejam pouco carregadas, podem ser sobrecarregadas pela saída contingencial de alguma outra LT deste sistema.

3.0 SOLUÇÕES PARA LIMITAÇÕES DA LT

A solução intrínseca à LT para as limitações causadas por aspectos de sistemas (queda de tensão, etc.) passa pela redução da reatância série e aumento da potência natural com a aplicação das técnicas de linha de potência natural elevada (LPNE) e de feixe expandido (FEX), quando a linha tem mais de um cabo/fase. Ainda por questões de sistema, soluções externas tais como o reforço de reativo capacitivo (série ou shunt) elevam a capacidade de transmissão. Todas estas soluções aumentam a corrente total nos condutores da linha, o que eleva suas temperaturas.

A solução clássica para as questões ligadas ao limite térmico passa pelo aumento da área transversal de condutor (se a torre suportar o esforço) ou a elevação do cabo em relação ao solo, se a temperatura máxima esperada não causar danos permanentes ao condutor.

Soluções alternativas tais como adição de um cabo auxiliar nas linhas com um condutor por fase para criar um FEX, e a possibilidade de aplicação de cabos termo-resistentes, nos casos onde se espera temperaturas elevadas, serão relatadas.

4.0 DESCRIÇÃO DO CABO TERMO RESISTENTE

O alumínio termo-resistente trata-se de uma liga onde são acrescentados alguns aditivos ao alumínio puro. A bibliografia especializada sobre metalurgia cita alguns destes componentes aditivos que podem melhorar as características do alumínio submetido a temperaturas mais elevadas.

Os cabos fabricados com esta liga apresentam características de recozimento e fluência em alta temperatura significativamente melhoradas em relação ao alumínio 1350.

Devido a estas características, um condutor com esta liga pode ser utilizado em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C, sem que haja deterioração das características mecânicas tais como tração, alongamento e dureza. Com condutores de alumínio 1350 a temperatura máxima recomendável para regime contínuo de trabalho, conforme bibliografia internacional pertinente, está em torno de 90°C.

Considerando estas premissas e mesmas condições ambientais (vento, sol, temperatura ambiente) o cabo de liga apresenta, em relação a um cabo de alumínio puro de mesma bitola, uma capacidade de corrente até 50% maior.

Por outro lado para uma mesma capacidade de corrente, um condutor de liga teria uma área transversal aproximadamente 50% menor e redução de 20% a 30% no diâmetro externo, com redução significativa nos esforços sobre os suportes de uma linha de transmissão.

Ainda considerando mesma bitola, o cabo de liga apresenta mesmo peso por km e mesma carga de ruptura que o cabo convencional. A condutividade, que no alumínio puro é de 61% do padrão IACS, tinha um valor, no início do desenvolvimento da liga, de aproximadamente 60% IACS. Hoje, com a evolução dos aditivos, já atingiu 60,8%.

Este tipo de condutor tem uma aplicação muito adequada no aumento da capacidade de corrente de barramentos de subestações e usinas, para atender ao aumento de potência dos sistemas de transmissão associados. No Japão quase todas as subestações de 275kV ou acima empregam este tipo de condutor.

No que se refere a LTs os próximos itens fazem uma avaliação de diversos cenários nos quais a utilização de cabos termo-resistentes poderá introduzir vantagens apreciáveis.

5.0 ELEVAÇÃO DO LIMITE TÉRMICO DE LTs

Uma situação bastante disseminada, sobretudo nas áreas de distribuição e sub-transmissão, consiste na existência de linhas operando no limite térmico, particularmente na vizinhança de grandes centros urbanos.

Para aumento da capacidade de transporte do sistema como um todo a solução clássica seria a construção de novas linhas. Porém, em muitos casos, seja pelos custos envolvidos, seja pela dificuldade de obtenção de faixa de passagem, essa solução não é de fácil implementação. A elevação dos condutores por técnicas já divulgadas no setor pode ser uma solução, porém somente se os cabos não atingirem temperaturas da ordem dos citados 90°C.

Uma alternativa que permite algum ganho consiste no recondutoramento da(s) linha(s), adotando um condutor de maior seção, o que automaticamente eleva a capacidade de transporte de corrente. Contudo, em muitos casos, devido ao considerável tempo de operação dessas LT's e o seu estado de conservação, não é desejável aumentar a carga mecânica nas estruturas.

Neste cenário a possibilidade de recondutorar as LT's com cabos termo-resistentes é altamente promissora, uma vez que com a mesma seção de alumínio se poderá passar de 90 °C para 150 °C, o que representa um ganho considerável.

Como exemplo desta aplicação considere-se uma linha 230 kV com um cabo Grosbeak por fase e aplique-se a metodologia de Ampacidade Estatística [3]. Adotando-se o critério de operação na temperatura de 60 °C com risco térmico de 15%, teremos uma corrente admissível nos condutores na faixa de 620 A a 790 A. Esta faixa de variação corresponde à variação dos dados climáticos obtidos de estações meteorológicas em Belém e Porto Alegre.

Com o recondutoramento e a substituição do cabo original por um cabo termo-resistente de mesma seção, poderíamos, no exemplo, passar a operar com uma temperatura limite de 120 °C, assumindo o mesmo risco térmico de 15%. Neste caso, as correntes limite para as mesmas estações, ficariam na faixa de 1054A a 1200A.

Neste caso, que é representativo da condição operativa de linhas 230 kV não muito longas ou que operam em sistemas malhados, teríamos obtido um ganho da ordem de 50 % na potência transmissível, o que é um ganho muito expressivo. É razoável estimar que algumas dezenas de linhas de 69 a 230 kV se enquadram nesta condição.

6.0 AUMENTO DO SIL - FEIXE EXPANDIDO

Uma outra alternativa muito promissora para recapacitação de linhas de transmissão consiste na utilização da técnica de feixe expandido-FEX [1][2].

Em algumas aplicações, nas quais a LT original tenha mais de um cabo por fase, o simples redimensionamento do feixe permite obter ganhos consideráveis na capacidade de transporte, pelo aumento da potência natural (SIL), redução da reatância e conseqüente redução na queda de tensão.

Para linhas novas deve ser considerado a possibilidade de se adotar um feixe com dois cabos em vez de um só. Para não aumentar o custo pode-se adotar a mesma área total de alumínio por fase, ou seja, cada cabo teria a metade desta área. Mesmo o feixe pequeno já agrega pelo menos +35% no SIL e com o FEX chega a +70%.

Porém em outros casos, sobretudo 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. Nestas soluções é possível determinar na fase de projeto, a bitola e a posição ideal do novo cabo, de modo a maximizar a capacidade de transporte.

Por outro lado as limitações das estruturas existentes normalmente impedem a adoção da solução teoricamente ótima. Entretanto, mediante uma abrangente análise de engenharia, e considerando a quantidade enorme de possibilidades que a técnica de FEX oferece, geralmente é possível achar uma solução para que a LT opere mais adequadamente no sistema. As Figuras 1 a 4 mostram dois arranjos diferentes em trechos experimentais de 230kV montados pela CHESF.

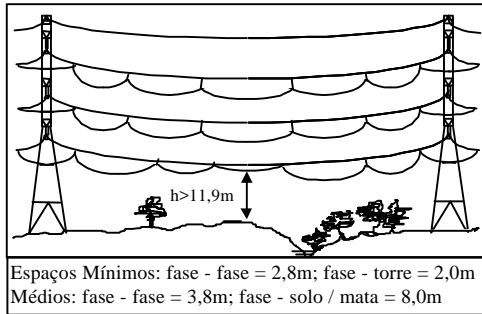


FIGURA 1 – Emprego de cabo auxiliar em LT existente



FIGURA 2 – Emprego de cabo auxiliar em LT existente – LT Piloto da CHESF – cabo auxiliar 4/0 AWG

Como exemplo das possibilidades do FEX a Figura 5 mostra cálculos típicos para uma linha de 138kV circuito duplo com o cabo original 556MCM e adição de um cabo auxiliar. São mostradas combinações de vários feixes e bitolas do cabo auxiliar. O SIL total para os dois circuitos sofre variações desde 102MW para o cabo original sozinho até 155MW para o cabo 4/0 com feixe de 1,2m. Comportamento similar ocorre nas outras tensões.

Nestes casos é provável que o novo cabo, de bitola menor que a do cabo original, venha a conduzir uma parcela de corrente tal que cause uma densidade de

corrente maior que a do cabo original. Ou seja, o cabo auxiliar vai operar mais quente.

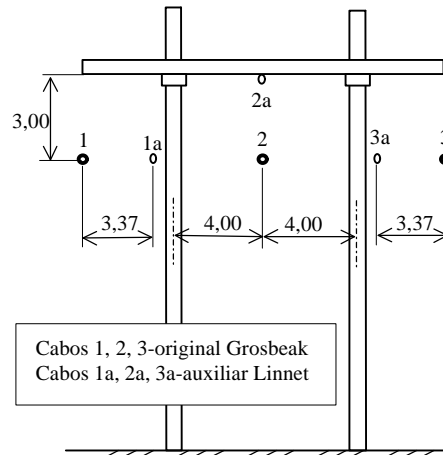


FIGURA 3 – Emprego de feixe expandido em LT existente



FIGURA 4 – Emprego de feixe expandido em LT existente – LT Piloto da CHESF – cabo auxiliar Linnet

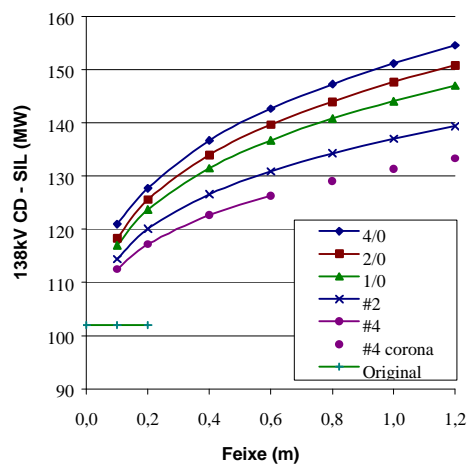


FIGURA 5 - Variação do SIL em função do tamanho do feixe, para cabo auxiliar de várias bitolas. SIL total para os dois circuitos de LT 138 kV circuito duplo.

Numa situação como esta, a possibilidade de adoção da solução de feixe expandido, pode depender da disponibilidade de condutores com limite térmico superior ao dos cabos tradicionais.

Este tipo de solução pode ser adotada nas linhas de transmissão de 69,138 e 230 kV relativamente longas, onde a potência característica esteja limitando a sua capacidade de transporte.

Observe-se ainda na Figura 5 que surge mais uma condição de contorno para a escolha da bitola do cabo auxiliar e sua posição. Naquela configuração, o cabo auxiliar #4 AWG apresentaria campo elétrico superficial muito elevado, causando corona em feixes acima de 0,6m, mesmo na tensão de 138kV.

6.1-O rateio da corrente entre os cabos

A divisão da corrente entre os cabos original e o auxiliar em cada fase dependerá da resistência destes cabos e principalmente das reatâncias próprias e mútuas da configuração final.

Embora seja possível determinar por meios de ferramentas de cálculo (parâmetros, distribuição de correntes, temperatura nos cabos, etc.) a posição ideal do novo cabo (maximizando o aumento da capacidade de transporte ou minimizando a perda ohmica por exemplo), nem sempre será possível, devido a limitações das estruturas existentes, especialmente as cargas admissíveis e a coordenação de isolamentos, efetuar a colocação do novo cabo na posição ideal.

Assim, variando a distância entre o cabo original e o novo, para diversos tipos de arranjo, bitolas e níveis de tensão, a corrente no cabo auxiliar pode variar de 20% a 60% da corrente total na fase.

Desta forma a temperatura de operação do novo cabo pode ultrapassar os critérios atualmente adotados, requerendo, para viabilizar essa recapacitação, a utilização de um cabo termo-resistente.

A Figura 6 mostra a análise do rateio de corrente entre o cabo auxiliar e o original, para a mesma torre e cabos da Figura 5. Verifica-se que para o arranjo, cabos e tensão considerados, a porção da corrente no cabo auxiliar varia entre 22% e 45% do total.

6.2- A influência do cabo auxiliar nas perdas

Uma outra linha de análise consiste em considerar as perdas Joule na seleção do cabo auxiliar. Neste caso pode ser verificado que em função da resistência elétrica do novo condutor, do arranjo adotado e da conseqüente repartição de correntes entre os cabos,

obtm-se diferentes valores de temperatura e perda nos condutores.

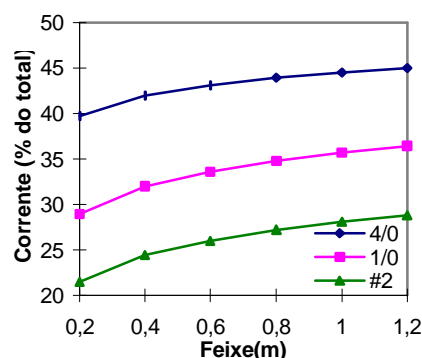


FIGURA 6 – Variação da corrente no cabo auxiliar em função da bitola e do feixe para uma linha de 138kV em circuito duplo.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram cálculos baseados em dados de linhas típicas de 230kV. O cabo original é o 636MCM e a análise paramétrica considerou a resistência dos cabos auxiliares (R_a) como sendo 1, 2, 3 e 4 vezes a resistência do cabo original (R_o). As perdas foram calculadas para correntes de 0 a 1000A.

Verifica-se a influência da divisão de corrente dos cabos na perda Joule total da linha. Por exemplo, no caso de rateio 50% em cada cabo, a aplicação de um cabo auxiliar com resistência igual a 4 vezes a resistência do cabo original ($R_a=4xR_o$) levaria a uma perda total maior que na linha normal, para uma mesma potência transportada.

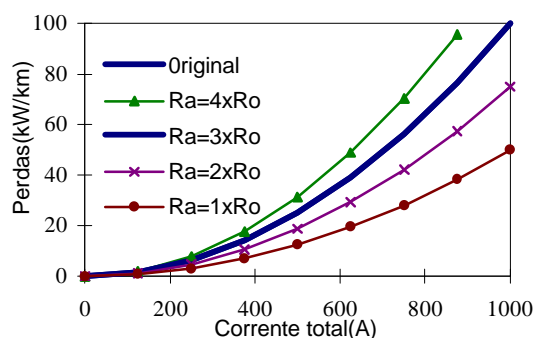


FIGURA 7-Corrente no cabo auxiliar 50%

O mesmo cabo auxiliar, em um arranjo onde o rateio fosse na proporção 30% da corrente nele e 70% no cabo original, resultaria em uma perda menor que na

linha normal. Resultados com características similares podem ser obtidos para outros níveis de tensão.

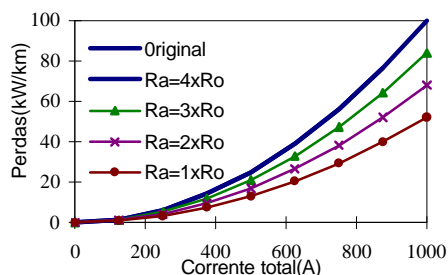


FIGURA 8- Corrente no cabo auxiliar :40%

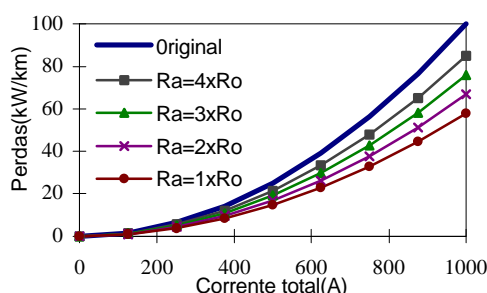


FIGURA 9- Corrente no cabo auxiliar :30%

A Figura 10 mostra também a variação de perdas para uma corrente total fixada em 1000A. Variou-se a corrente no cabo auxiliar desde 50% até o hipotético valor de 0%, e sua resistência de 1 a 5 vezes a do cabo original.

Note-se que todas curvas convergem para o mesmo ponto (corrente 0% no cabo auxiliar) pois esta seria a perda do cabo original sem existência de outro cabo.

Outro ponto a destacar é que até mesmo com o cabo auxiliar tendo $Ra=5xRo$ existe uma faixa de rateio de corrente que leva a uma perda menor que a da linha original.

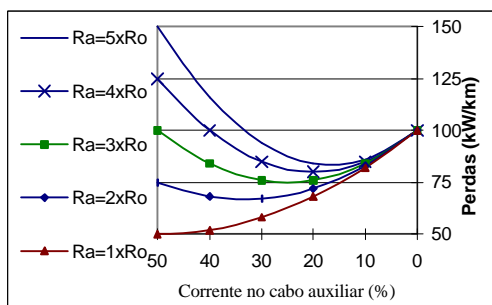


FIGURA 10-Corrente total 1000A

7.0 CONCLUSÕES

A questão ambiental, e dificuldades para constituição das faixas de passagem e licenciamento das obras são um obstáculo crescente à adição de novas linhas ao sistema de transmissão. Para o atendimento ao crescimento da demanda a repotencialização torna-se uma alternativa que deve mandatoriamente ser analisada nos estudos da expansão.

O recondutoramento em linhas que não tenham problemas de estabilidade e queda de tensão pode ser mais eficaz e econômico se aplicado o cabo termo-resistente pois, com a mesma bitola (sem adicionar esforço aos suportes), pode transportar até 50% a mais de corrente.

Para LT's onde aspectos relativos à operação do sistema, como o controle de tensão por exemplo, sejam o fator limitante, a redução de reatância pode ser obtida com a técnica de feixe expandido (FEX), reduzindo a queda de tensão e permitindo transportar uma maior potência.

A aplicação do FEX em linhas com um condutor por fase pressupõe a adição de um condutor auxiliar, de menor bitola para evitar esforços excessivos. Restrições elétricas e de projeto podem levar a arranjos onde o novo cabo tenha uma reatância que imponha uma alta densidade de corrente, elevando a sua temperatura. Neste caso a adoção do cabo termo-resistente torna-se recomendável.

Conclui-se que a possibilidade de utilização de cabos com essas características representa um avanço tecnológico importante que pode elevar consideravelmente a capacidade do sistema de transmissão atual com custos atraentes.

8.0 BIBLIOGRAFIA

[1] Recapitação de Circuitos 230 kV com o Conceito de Feixe Expandido. Oswaldo Régis Jr, S. J. Gusmão Cavalcanti, Marcelo J. A. Maia, José Felipe A. G. Wavrik, Georgij Viktorovich Podporkin - XIII SNPTEE, GLT, Camboriú, 1995.

[2] Linha de Potência Natural Elevada (LPNE): Adaptação do conceito para a recapitação de linhas existentes. Oswaldo Régis Jr, S. Gusmão Cavalcanti, Antônio Pessoa Neto, Fernando Dart. VII ERLAC-CE 22, 1997, Argentina.

[3] Ampacidade estatística de linhas aéreas com cabos alumínio/aço. Aldo Cosentino e Força Tarefa GCPS/GCOI- XII SNPTEE, GLT, Recife, 1993.