COMPARAÇÃO DE CUSTO ENTRE CABOS ISOLADOS DE BAIXA TENSÃO EM COBRE E ALUMÍNIO

PROJETO DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Outubro / 2011

Preparado para:

International Copper Association

Latin America

COPPER
International Copper Association, Ltd.

PRO COBRE
Connects Life.™

PREFÁCIO

A discussão sobre as vantagens e desvantagens de se utilizar cabos de alumínio em relação a cabos de cobre tem sido desenvolvida há longo tempo. Estas preocupações são baseadas nas diferentes propriedades dos dois de materiais e da sua adequação nas aplicações em sistemas elétricos.

O desempenho confiável dos condutores, as conexões e terminações dos cabos são essenciais para o funcionamento do sistema elétrico. Devido ao aumento do custo relativo do cobre, os usuários percebem esses aumentos sendo repassados pelo fabricante do cabo.

No entanto, a decisão final não pode ser apenas técnica e com base em preço de venda dos cabos. A avaliação de custos durante o ciclo de vida do produto deve ser também considerada na análise de todos os aspectos de logística, instalação, utilização e manutenção do circuito elétrico.

Este relatório fornece uma comparação de cobre (Cu) e alumínio (Al) e sua relevância, aplicada para cabos isolados elétricos utilizados na distribuição e alimentação, considerando a análise do ciclo de vida e as diferentes propriedades mecânicas e elétricas.

A finalidade é proporcionar ao usuário a informação necessária para tomar uma decisão clara sobre a seleção de cobre ou condutores de alumínio em sistemas elétricos.

1. INTRODUÇÃO

Cobre e alumínio são os dois materiais mais comumente usados para conduzir a corrente em sistemas elétricos. Cada um com suas características positivas e negativas e que afetam sua utilização em várias aplicações.

Ambos os materiais tem sido utilizados continuamente na indústria elétrica por muitos anos. Enquanto o alumínio é o mais abundantemente disponível dos dois metais, a demanda e a escassez do cobre provocaram a variação maior de seu custo. A prata é geralmente considerada o melhor material condutor de eletricidade, porém seu alto custo e baixa resistência limitam o seu uso para aplicações especiais, tais como revestimento de conexões e superfícies deslizantes de contato.

Para efeitos deste relatório, os aspectos discutidos são:

- Capacidade de transmissão real e condutividade
- Propriedades físicas:
  - Expansão
  - Peso
  - Resistência à tração
- Conexões e terminações
- Transporte e manuseio
- Fonte de produto
- Comparação de custo total

2. CRITÉRIOS DE PROJETO

Os critérios utilizados para escolher os materiais condutores devem ser baseados não só na real capacidade de transmissão e na queda de tensão, mas também sobre o custo total da solução, considerando:

- Cabos
- Conectores e terminações
- Transporte até a instalação a ser construída
- Espaço necessário de armazenamento para diferentes soluções
- Custo de instalação
- Manutenção

O principal critério para o uso de cabos de alumínio é a economia de custo, uma vez que a maioria dos cabos instalados tem áreas de seção transversal maior que 16 mm².

De acordo com a boa prática apresentada na maioria dos padrões internacionais, condutores com área de seção transversal nominal inferior a 16 mm² devem ser de cobre recozido.

Considerando somente as seções equivalentes, o custo do cabo de alumínio é relativamente menor do que o custo de cabo de cobre, mas há muitos outros fatores a serem considerados, como aqui detalhados.

2.1 CABOS

2.1.1 TRANÇADO OU SÓLIDO

Cabos de alumínio podem ter configuração de fio sólido ou fios trançados.

O custo de fabricação do cabo flexível é maior do que o custo do cabo com condutor sólido, de modo que o cabo de alumínio sólido é usado com mais freqüência do que o sólido. Cabos de cobre com fios sólidos são praticamente impossíveis de serem flexionados e seu uso não é permitido. Tanto que, cabos de alumínio sólido e flexíveis, maiores que 16 mm² podem ser utilizados.

Terminais com esmagadores não podem ser usados em cabos flexíveis, portanto devem ser adotados terminais de compressão hexagonais.

2.1.2 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS

A principal diferença entre os cabos de alumínio e de cobre é a capacidade de corrente e impedância. Cabos de alumínio têm uma menor capacidade de transporte de corrente e impedância maior do que o condutor de cobre equivalente.

Embora existam em uso em alguns países, cabos de alumínio com seções inferiores a 25 mm², eles são normalmente utilizados a partir de 25 mm².

Ao selecionar a seção transversal do cabo de alumínio, a impedância deve ser cuidadosamente avaliada. Se o critério de capacidade de corrente for aplicável, circuitos longos apresentarão uma queda de tensão mais alta, portanto, um cabo de alumínio deverá ter área de seção transversal do condutor maior a fim de compensar a queda de tensão para a impedância equivalente.

Exemplo 1

Um exemplo usando um cabo de 3x35 mm² (3 condutores) 1kV é mostrado abaixo, apenas para comparar as principais características e os resultados finais nas escolhas.

Na Tabela 1 pode-se observar que, comparando-se a seção transversal, o cabo de alumínio é menor e mais leve que o de cobre, exceto para a capacidade de condução de corrente, que é muito inferior. Isto significa que, se o alumínio for adotado, um cabo de seção maior deve ser selecionado.

Dimensionamento de um cabo é conseguido através de um processo de seleção considerando critérios básicos.

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS DE CABOS DE 1 KV - EXEMPLO 1

Característica	Condutores de Cobre	Condutores de Alumínio
Capacidade de condução de corrente	135 A	93 A
Impedância	0,627 Ω/km	1,043 Ω/km

Diâmetro do cabo	30,5 mm	27,0 mm
Massa do cabo	1,89 kg/m	1,40 kg/m

Os fatores seguintes devem ser considerados:

- Carga em kW
- Múltiplos da corrente de partida de motores
- Fator de potência do motor (geralmente medido com 75% de carga total)
- Fatores de correção para altitude, temperatura ambiente, cabos múltiplos em racks e dutos, radiação solar e outros
- Comprimento do cabo desde a alimentação de energia até o equipamento (painel de controle, motor)
- Tipo de isolamento do cabo
- Nível de falha do sistema

Exemplo 2

Outro exemplo ilustrativo considerando um motor e um circuito elétrico para alimentação:

- Motor: 90 kW
- Tensão de linha: 550 V 60 Hz
- Corrente em plena carga (CPC): 120,81 A
- Fator de potência do motor a 75% da carga total: 0,84
- Fator de partida: 7,6 vezes CPC
- Isolamento do cabo: PVC/PVC
- Queda de tensão em condições de funcionamento não deve exceder 5% da tensão nominal
- Queda de tensão em condições de partida não deve exceder 15% da tensão nominal

Na Tabela 2, pode-se verificar que, ao usar cabo de alumínio, a seção transversal selecionada será duas vezes maior.

TABELA 2: COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS DE CABOS – EXEMPLO 2

Dados calculados com um comprimento de cabo de 100 m			
Tipo de cabo	**Queda de tensão em condições de funcionamento**	**Queda de tensão em condições de partida**	**Resultado**
Tamanho de cabo usando condutores de cobre: 3x35 mm², PVC/PVC/Cu 1 kV	2,15%	7,42%	Cabo adequado
Tamanho de cabo usando condutores de alumínio: 3x70 mm² PVC/PVC/Al 1 kV	2,37%	5,14%	Cabo adequado

Analisando o exemplo, se um cabo de alumínio for utilizado, sua seção mais adequada é o dobro da seção de cobre.

2.1.3 FABRICAÇÃO DO CABO

Os custos envolvidos com os processos de fabricação, considerando alumínio e cobre são bastante diferentes. O aspecto inicial é devido às diferentes características físicas dos dois materiais durante o processo de trefilação.

A taxa de redução do cobre aplicada a cada fase de trefilação do fio é maior, o que significa que pode ser obtido um diâmetro final de fio de cobre com menos passes de trefilação, portanto, com menos tempo e custo de produção.

O mesmo ocorre durante o processo de encordoamento e trançamento, uma vez que, a fim de obter o mesmo grau de flexibilidade do cabo (entendendo-se como "raio de curvatura" do cabo completo), o fabricante pode utilizar menos fios de cobre, com mais produtividade e, portanto, menos custos.

Sobre as bobinas utilizadas para o acondicionamento do cabo, os principais fatores são:

- Diâmetro externo do cabo;
- Raio de curvatura permitido do cabo completo para calcular o diâmetro do núcleo da bobina;
- Limites para dimensões da bobina e seu peso devido ao transporte e manuseio.

O diâmetro maior do cabo de alumínio equivalente a um determinado cabo de cobre, se utilizar a mesma bobina, resultará em um menor comprimento de cabo contido. Portanto, para o comprimento do cabo total (que depende do comprimento do circuito), mais bobinas devem ser transportadas e manuseadas.

Estes efeitos impactam no preço de fabricação final do cabo que é percebido pelo cliente, mas deve ser notado que o preço final não é o único fator a ser considerado.

2.1.4 Entrega do cabo

Cabos de cobre e de alumínio tem os mesmos prazos de entrega, embora o de alumínio, uma vez que não é tão comum, não pode ser facilmente obtido a curto prazo. Normalmente é fabricado sob demanda enquanto o cabo de cobre é mantido em estoque.

As quantidades adquiridas são as mesmas como são os lances nominais das bobinas. Conectores de cobre e terminais são fabricados por muitos fornecedores, de modo que são prontamente disponíveis. Acessórios bi-metálicos estão disponíveis em muitos casos, porém a disponibilidade em locais mais distantes pode ser um problema real.

2.1.5 Vibração e corrosão

Cabos de alumínio podem apresentar trincas e falhas quando submetidos à vibração presentes em quase todas as instalações elétricas. Motores e transformadores produzem vibrações de modo que o uso do cabo de alumínio será mais suscetível a trincas e falhas do que os de cobre, de acordo com responsáveis pela instalação e manutenção.

São comuns casos registrados de queda de linhas aéreas de alumínio, devido a vibração eólica. Os danos causados pela vibração são ainda mais graves em condutores de alumínio sólido.

O alumínio tem excelente resistência à corrosão, mas isto só é verdade para ligas de alumínio utilizadas na aviação e para ligas de alumínio anodizados como usado em esquadrias de janelas, entre outros. O alumínio usado para cabos (EC grade) pode apresentar corrosão quando instalado em condições de umidade, portanto não é realmente adequado para instalação em locais com presença de água ou umidade, de acordo com as equipes de manutenção e instalação.

2.2 CONECTORES E TERMINAIS

Terminais estanhados planos em cabos de cobre são prensados no condutor usando matrizes hexagonais. Isso resulta em um conector sólido de cobre para cobre, que pode ser fixado sobre a conexão também de cobre do terminal.

Quando houver terminações de condutores de alumínio, uma abordagem diferente é necessária. O componente do terminal deve ser um tipo apropriado que permita a união Al-Cu, no qual o núcleo do cabo de alumínio é comprimido no tubo de alumínio, ligado ao componente bi metálico. Dessa forma, ele pode ser conectado à conexão de cobre.

A ferramenta de compressão para este tipo de acessório não é hexagonal, mas uma com perfil circular de compressão. Este componente no formato adequado penetra a porção de alumínio, passando através da camada de óxido de alumínio da camada exterior. Isso se aplica a condutores de alumínio sólido. Um componente hexagonal pode ser usado, desde que certas medidas de precaução sejam tomadas. A camada exterior do núcleo de alumínio desenvolve naturalmente uma película de óxido de alumínio, que reduz a condutividade elétrica superficial.

Para permitir o uso de compressão hexagonal, esta camada deve ser completamente removida e a superfície tratada imediatamente antes da compressão para evitar a formação quase imediata do óxido de alumínio. Por este motivo a compressão hexagonal de condutores sólidos não é recomendada.

Se um condutor de alumínio é comprimido em um conector de cobre, duas coisas ocorrem:

Reação eletrolítica, quando a umidade penetrar na conexão, causando um processo de corrosão bastante conhecido devido à diferença de eletronegatividade dos dois materiais.

O coeficiente de temperatura entre o alumínio e o cobre é tal que, quando aquecidos, sob carga, os dois metais se expandem e se contraem a uma taxa diferente (17 x 10^{-6} para o cobre e 23 x 10^{-6} para o alumínio). Isso causa folgas no interior da conexão, com subseqüente superaquecimento da conexão e até mesmo falha. Isso também pode ser a causa potencial de incêndios.

Há uma grande diferença entre as dimensões dos conectores de cobre normais e bi-metálicos para cobre-alumínio. Usando o exemplo 2 acima, um conector de cobre padrão para um cabo de 35 mm² possui 37 mm de comprimento enquanto que para 70 mm² bi-metálicos (alumínio-cobre) o valor é de 86 mm de comprimento.

Assim, pode-se observar que, em mais situações, mais espaço é necessário para terminações e conectores. Isso pode resultar que a caixa de conexões fique limitada, exigindo a adição de uma caixa maior.

Em muitos casos isso não é fisicamente possível, portanto uma caixa de interligação adicional precisa ser introduzida onde o cabo de alumínio é conectado em barras curtas e cabos de cobre mais curtos conectando com os equipamentos. Soluções especiais podem ser necessárias.

Sobre a instalação de conectores e terminações, a qualificação do eletricista de instalação é basicamente a mesma para ambos cobre e alumínio. O alumínio é mais difícil de trabalhar, assim o custo de cada conexão é maior devido ao tempo extra, necessário para fazer o mesmo trabalho.

Em média, o custo adicional é de cerca de 50% do custo da conexão básica, de acordo com instaladores consultados. A instalação do cabo nos racks apresenta basicamente o mesmo custo.

2.3 Suportes de cabos

Cabos de alumínio são menores e mais leves que de cobre, porém devido ao aumento de seção do cabo equivalente, suportes maiores podem ser necessários.

Se em uma configuração típica, como no exemplo acima, houver 10 circuitos seguindo a mesma rota, a largura do suporte necessário para cabos de cobre seria 305 mm, enquanto que para cabo de alumínio, seria de 330 mm de largura, portanto um rack de 400 mm de largura seria o padrão escolhido.

A massa de cabo de cobre nesse rack seria de 21 kg/m enquanto o de alumínio seria de 20 kg/m, portanto não muito diferente.

2.4 Manutenção

As descrições acima mostram que o coeficiente de expansão térmica para Al é 42% maior do que o Cu. Esta característica é motivo de preocupação quando se estuda a expansão e a contração de condutores em conexões elétricas durante a ocorrência de ciclos térmicos.

Um dos fatores importantes no estabelecimento e manutenção de um conector de baixa resistência de contato é o uso da força adequada e bem distribuída. A superfície de um pedaço de metal, mesmo lisa, consiste em microscópicos "picos" e "vales". Quando a pressão crescente é aplicada, os pontos iniciais são deformados e achatados, permitindo o contato em mais pontos. Mesmo sob a pressão máxima que pode ser exercida se aproximando do limite elástico do material, a verdadeira área de contato representa apenas uma pequena parcela da área total das superfícies envolvidas. Quando um conector aparafusado é utilizado, o metal se deforma plasticamente sob a pressão aplicada, o que permite o real contato metal contra metal.

O tipo de acessório afeta a distribuição da pressão na conexão aparafusada. Se apenas porca e parafuso são utilizados, a área de contato está concentrada intensamente em torno do furo do parafuso. O material nas proximidades desta região pode ser altamente estressado e estar sujeito a fluência e deformação. A fluência ocorrida não é reversível, porque ultrapassa o limite elástico do material.

Se componentes de aço forem utilizados, como o coeficiente de expansão térmica do aço é de apenas 50% do alumínio, conforme o aumento da temperatura durante o ciclo de carga, a força da conexão também irá aumentar. Esta maior força de tração tende ainda a deformar os pontos de contato que já tenham sido deformados pela força inicial de aperto.

Assim, um esforço permanente pode ser produzido na conexão. Quando a conexão esfria, este valor permanente resultará em uma menor pressão sobre a conexão, o que provoca um aumento na sua resistência elétrica. No próximo ciclo de carga, a temperatura da conexão será aumentada causando mais deformação, resultando maior valor residual e perda de força da conexão no resfriamento. Eventualmente, este efeito cumulativo pode resultar em falha na conexão.

Este comportamento natural aumenta a necessidade de manutenção contínua e inspeção das conexões de cabos de alumínio a fim de evitar pontos quentes, perdas de energia extra e risco de falha.

3. CUSTO

De modo a permitir uma comparação mais prática entre cabos de cobre e cabos de alumínio, um caso real de um circuito de 1 kV com 100 m de comprimento foi adotado, considerando os dados fornecidos por uma concessionária de distribuição do Brasil (AES Eletropaulo), instaladores e outros fabricantes listados nas referências.

Também os valores médios LME aplicados ao mesmo mês (Março/2011) são registrados como uma referência, uma vez que os preços atuais não variam, ao mesmo tempo e na mesma taxa do que LME. Os preços dos cabos informados pela AES Eletropaulo representam o valor médio pago durante aquele mês.

O preço de referência dos cabos de alumínio é menor que o de cobre, considerando-se um circuito de 100 m, como se segue:

- Cabos 3x35 mm² (3 condutores) PVC/PVC/Cu 1 kV – US$ 16,87/m
- Cabos 3x70mm² (3 condutores) PVC/PVC/Al 1 kV – US$ 14,30/m

De acordo com os registros da London Metal Exchange, os valores de referência médios aplicados em Março/2011 são:

- Cobre: US$ 9.530,65 / tonelada
- Alumínio: US$ 2.552,61 / tonelada

A relação entre os preços reais de cabos de cobre / alumínio não é proporcional aos valores de cobre / Al do LME, devido à influência dos custos de outros componentes, principalmente a isolação, cobertura e os processos de fabricação.

Isso mostra uma economia de 15% se o cabo de alumínio é selecionado apenas considerando preço de compra. No entanto, o custo adicional de acessórios e de trabalho deve ser adicionado a esta equação. Um custo não incluído é a exigência de compartimentos maiores e caixas de terminais que é bastante difícil de quantificar.

- Custo de terminal para cabo de cobre de 35 mm² - US$ 1,51
- Custo de terminal bi-metálico para cabo de alumínio de 70 mm² - US$ 9,90
- Custo de execução de conexão de um cabo de cobre de 3 condutores de 35 mm² é de US$ 18,05 (informado por instaladores, referências 5 e 12)

- O custo de execução de conexão de um cabo de alumínio de 3 condutores de 70 mm² é de US$ 32.69 (informado por instaladores, referências 5 e 12)
- Os custos de manutenção anuais são considerados 4% de mão de obra de instalação de cabos de cobre e de 9% de mão de obra para cabos de alumínio (informado pela AES Eletropaulo)
- Custo de manuseio, transporte e armazenamento considera que a bobina representa 2% do valor do cabo de cobre nela contido e 4% do valor do cabo de alumínio nela contido. O frete + armazenamento + manipulação está sendo considerado como US$ 45/tonelada (informado pela AES Eletropaulo).

A Tabela 3 mostra o resumo do custo total do ciclo de vida do projeto, considerando-se um circuito com 100 m e 20 anos de operação.

TABLE 3 – CUSTO TOTAL DO CICLO DE VIDA DO PROJETO

Item de custo	**Cabo de cobre 1kV (3x35 mm^2) (US$)**	**Cabo de alumínio 1kV (3x70 mm^2) (US$)**
LME (Mar/2011)	*Cu = 9,530.65*	*Al = 2,552.61*
Cabos	1.687,00	1.430,00
Terminais	9,06	59,40
Mão-de-obra	36,10	65,38
Manutenção (para 20 anos)	36,13	224,60
Transporte, manuseio e armazenamento	42,25	63,50
Total	1.810,53	1.842,88

4. CONCLUSÃO

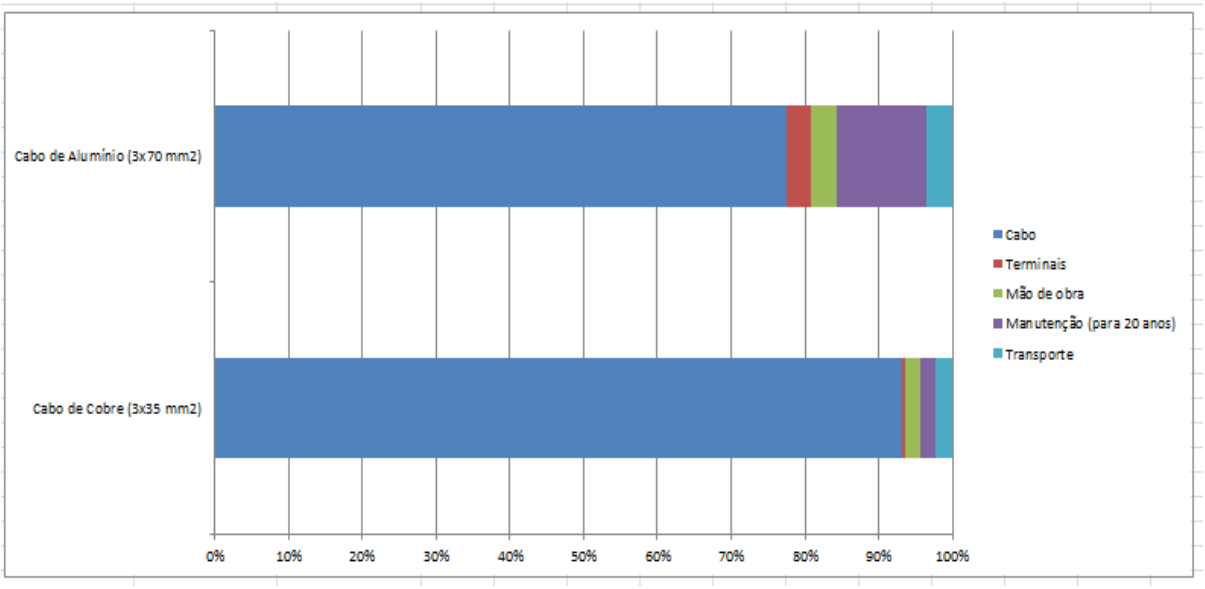
O caso real aqui descrito mostra que o custo total do projeto do ciclo de vida, considerando-se os cabos, instalação, acessórios, manutenção, embalagem, transporte, manuseio e custos de armazenamento, é maior para cabos de alumínio do que para cabos de cobre.

Um dado interessante observado para o período (Março/2011), quando os custos do projeto foram registrados era de que a relação preço entre cobre - alumínio na LME chegou a quase 3,7. Como os reais preços do cabo não variam diretamente com os preços da LME devido a outros materiais de componentes e contratos de fornecimento de longo prazo, mesmo nesta situação o cobre mostrou ser a melhor solução técnica e econômica

Embora o preço unitário de cabo de alumínio seja menor do que o cabo de cobre, essa lacuna poderia ser reduzida se grandes cabos de seção transversal estivessem envolvidos na instalação.

Sobre os aspectos do ciclo de vida, o custo de outros componentes e serviços devem ser adicionados. Como pode ser visto aqui conectores para cabos de alumínio são muito mais caros do que o equivalente a cabos de cobre devido a diferentes materiais e especificações. Além disso, o custo de mão de obra para instalar cabos de alumínio é maior já que eles são mais difíceis de trabalhar e envolvem mais tempo de operação. O custo de ferramentas também é maior, mas, obviamente, não na mesma proporção.

A figura abaixo mostra a contribuição percentual de cada etapa do ciclo de vida aqui consideradas, com base nos valores da Tabela 1.



O comprimento efetivo do circuito informado pela AES Eletropaulo é relativamente longo, considerando instalações comuns de 1 kV, o que seria relativamente pior para cabos de cobre, uma vez que a contribuição do cabo no custo total é significativa. Normalmente, os critérios de queda de tensão são mandatórios em circuitos onde seções de cabos de 35 mm^2 (considerando-se os cabos de cobre) são necessários e mesmo as perdas de energia (critério a ser verificado) devido aos níveis reais para circuitos de 1 kV são muito altos, de modo que a tensão deve ser maior. Se a tensão aumentar , a classe de tensão do cabo deve especificar maiores espessuras de isolamento e cobertura, elevando o custo de cabo, sobretudo para cabos de alumínio, onde a seção transversal metálica e diâmetros são maiores para a mesma capacidade de condução de corrente. No entanto, para ser coerente com as fontes de informação, este circuito de 100 metros de comprimento foi escolhido.

A maior desvantagem ao uso de cabos de alumínio é o fator de risco. Uma vez que um cabo de alumínio foi instalado, não pode ser manipulado de forma segura. Além disso, ao manusear cabos de alumínio um grande cuidado deve ser exercido para garantir que ele não seja dobrado muitas vezes já que isso pode levar a trincas e danos.

O raio de curvatura permitido de cabo de alumínio é menor do que a de cobre, mas, uma vez dobrado, ele não pode seguramente ser esticado.

Grande cuidado deve ser tomado na aplicação de produtos inibidores de umidade ou graxa em todas as conexões, para evitar reação eletrolítica.

A corrosão pode ser um sério fator de risco em condições de umidade e em locais especiais e até mesmo em condições não previsíveis podem ocorrer, especialmente em ambientes industriais.

Como sugestão para estudos futuros, é muito importante para análise e avaliação mais detalhada a influência do critério de projeto econômico como um complemento dos outros critérios técnicos utilizados neste documento, considerando também as perdas de energia e da eficiência da instalação global.

REFERÊNCIAS

1. AES Eletropaulo – Departamento de Projetos / área de avaliação de projetos

2. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Norma NBR 5410:2005

3. Aluminum Association – Aluminum Conductors Handbook – 1997, New York

4. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Abinee – AbineeTec reports em http://www.tec.abinee.org.br/2009/

5. Hidrelplan Instaladora Ltda. – área de instalações elétricas

6. International Copper Association - ICA

7. Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo - IEE/USP, Laboratório de Alta Corrente

8. Nexans e-catalogue, em http://www.nexans.com

9. Prysmian Brasil – Departamento Técnico de cabos de energia, Santo André - Brasil

10. Sindicato da Indústria de Instalações do Estado de São Paulo – Sindinstalação – São Paulo

11. Sindicato da Indústria de Condutores Elétricos, Trefilação e Laminação do Estado de São Paulo – Sindicel at www.sindicelabc.org.br

12. Vox Projetos e Instalações Ltda. – Serviços de Instalações e serviços a clientes