

**COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE
COBRE E ALUMÍNIO EM
CABOS ISOLADOS DE BAIXA TENSÃO**

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO PROJETO

Abril/2019

Preparado para:

The International Copper Association/Latin America

Por:

Eduardo Daniel - MDJ Assessoria e Engenharia Consultiva/Brasil

PREFÁCIO

A discussão sobre as vantagens e problemas para o uso de condutores de alumínio versus condutores de cobre tem sido realizada por um longo tempo. Estas preocupações baseiam-se nas propriedades muito diferentes dos dois materiais e na sua adequação para aplicação nos sistemas elétricos.

A confiabilidade dos condutores, das conexões e das terminações dos condutores é essencial à operação do sistema elétrico. Com os aumentos no custo relativo do cobre, os usuários estão percebendo estes aumentos serem repassados a eles pelos fabricantes dos cabos.

No entanto, a decisão final não pode ser apenas técnica e com base no preço de venda dos cabos. Os custos do ciclo de vida do projeto devem ser igualmente considerados para a tomada de decisões, envolvendo todos os aspectos da logística, instalação, utilização e manutenção do sistema elétrico.

Este documento tem duas partes. A parte 1 apresenta e discute as diferentes propriedades de ambos os metais, considerando o uso em sistemas elétricos e resultados de testes de projetos canadenses mais recentes, testando características mecânicas e elétricas de diferentes tipos de conectores.

A parte 2 fornece uma comparação entre o cobre e o alumínio e sua relevância na aplicação em cabos isolados elétricos, usados na distribuição e nos alimentadores, considerando a análise do ciclo de vida e as diferentes propriedades mecânicas e elétricas. Dois estudos de caso foram desenvolvidos, a fim esclarecer certos pontos adicionais a respeito de outros cenários.

Um relatório inicial foi elaborado em 2011, analisando o primeiro estudo de caso da parte 2. Após 7 anos, outros dados técnicos e publicações foram publicados e um objetivo específico deste documento foi verificar como as conclusões podem ser impactadas em função de alterações de preços, novas tecnologias e processos agora disponíveis.

O segundo estudo de caso da parte 2 foi elaborado pela Japan Copper Development Association, JCDA e International Copper Association, ICA e reforçará as conclusões do primeiro estudo de caso para diferentes situações.

O objetivo é fornecer ao usuário as informações necessárias para tomar uma decisão clara e correta sobre a seleção de condutores de cobre ou alumínio em sistemas elétricos.

PARTE 1 - PROPRIEDADES

1.1 INTRODUÇÃO

O cobre e o alumínio são os dois materiais mais comumente usados para condutores em sistemas elétricos. Cada um tem características positivas e negativas que afetam o seu uso em várias aplicações.

Ambos os materiais têm sido de uso contínuo na indústria elétrica por muitos anos. Enquanto o alumínio é o mais abundantemente disponível dos dois metais, a alta demanda de cobre tem causado a larga flutuação de seu custo. A prata é considerada geralmente o melhor condutor elétrico; Entretanto, seu custo elevado e a baixa resistência limitam seu uso às aplicações especiais tais como o revestimento de conexões e superfícies de contato deslizantes.

Para os propósitos deste documento, os aspectos discutidos são:

- Capacidade de condução de corrente real e condutibilidade
- Propriedades físicas:
 - Expansão
 - Peso
 - Resistência à tração
- Conexões e terminações
- Transporte e manuseio
- Fornecimento de produtos
- Comparação de custos totais

1.2 PROPRIEDADES DO COBRE E DO ALUMÍNIO

As propriedades gerais para ambos os materiais podem ser vistas abaixo como um guia para os projetistas da instalação. É importante ressaltar que diferentes propriedades indicam que uma consideração especial deve ser aplicada durante o desenvolvimento do projeto e não apenas por mudanças materiais com base em custos individuais. Uma análise mais completa pode ser vista no item 1.4 abaixo.

Propriedades do material	Valores comparativos	
	Alumínio de cobre	
Resistividade elétrica	100	164
Densidade	100	30
Peso/resistência unitária	100	53
Resistência /diâmetro unitário	100	129
Módulo de elasticidade	100	55
Dureza	100	44
Limite de resistência à tração	100	35
Temperatura de fusão	100	61
Limite de resistência à fadiga	100	62
Resistividade térmica	100	158
Corrosividade	1	2
Calor específico	100	230
Expansão térmica	100	135

Notas

- 1) o cobre é resistente à maioria de produtos químicos orgânicos
- 2) o alumínio pode apresentar corrosão rapidamente

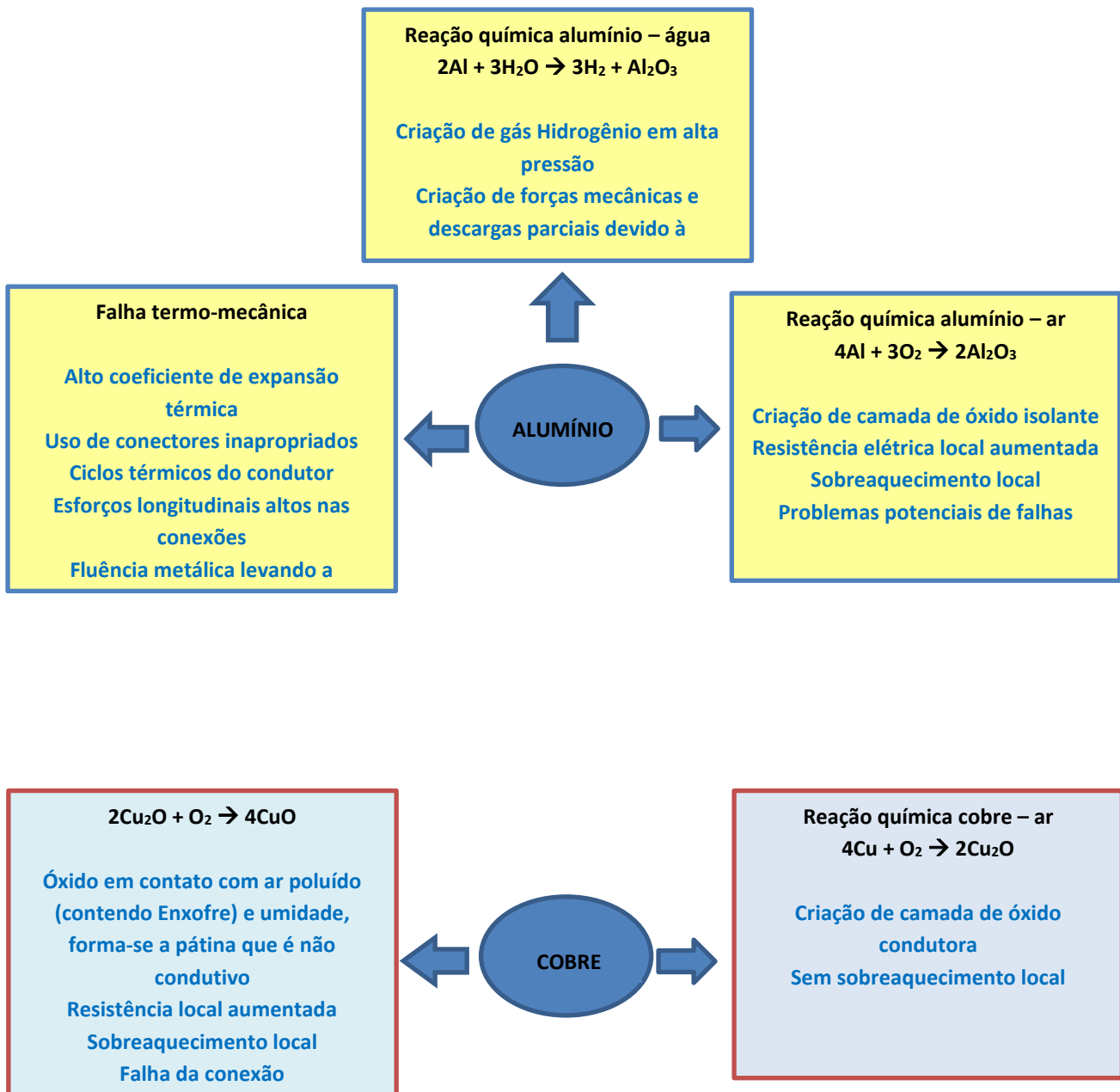
Fonte: referência 3

1.3 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

Os diagramas abaixo mostram a diferença nos mecanismos de degradação aplicados a cada material. O alumínio é mais influenciado pelos elementos do ambiente comumente presentes e que causam problemas de desempenho durante a vida útil das peças e conexões do condutor.

O Cobre, ao contrário, é muito menos influenciado por contaminantes normais e condições adversas.

DIAGRAMAS DE MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DO COBRE E ALUMÍNIO



Fonte: referência 3

1.4 CRITÉRIOS DE PROJETO

Os critérios utilizados para a escolha dos materiais condutores devem se basear não apenas na capacidade de condução de corrente real e na queda de tensão como habitualmente, mas também no custo total da solução, considerando:

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

Os principais critérios para a escolha do cabo de alumínio tem sido a economia de custos, uma vez que a maioria dos cabos instalados apresentam áreas de seção transversal maior do que 16 mm².

De acordo com uma boa prática apresentada na maioria das normas internacionais, os condutores de área transversal nominal inferior a 16 mm² devem ser de cobre recozido.

Em seções transversais semelhantes, o custo do cabo de alumínio é consideravelmente mais baixo do que o custo do cabo de cobre mas há muitos outros fatores a serem considerados como aqui detalhado.

1.5 CABOS

1.5.1 ENCORDADO OU SÓLIDO

Os cabos de alumínio e de cobre são fabricados nas configurações sólida ou encordoada.

O custo de fabricação de cabo encordoado é maior do que o sólido, mas há uma limitação real devido às necessidades de seção do cabo, portanto os fios sólidos de cobre podem ser mais usados devido ao seu diâmetro menor para a mesma capacidade de carga real. Os cabos de alumínio encordoados e sólidos, de seção maior que 16mm² podem ser usados.

Terminações por esmagamento simples não podem ser usadas no cabo encordoado, devendo ser adotadas terminações por compressão hexagonais.

1.5.2 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS

A principal diferença entre os cabos de alumínio e cobre é a capacidade de condução de corrente real e sua impedância. O cabo de alumínio tem uma capacidade de condução de corrente real mais baixa e uma impedância maior do que o condutor de cobre de mesma seção.

Embora os cabos de alumínio nas seções menores de 25mm² estejam disponíveis em alguns países, de maneira geral eles são fabricados nas seções maiores que 25mm².

Ao selecionar a seção correta do cabo de alumínio, a impedância deve ser cuidadosamente avaliada. Se o critério da capacidade de condução de corrente for a preponderante, os circuitos mais longos apresentarão uma queda de tensão mais elevada, conseqüentemente um cabo de alumínio deve ter muito mais área de seção transversal a fim de compensar a queda da tensão para a impedância equivalente.

Exemplo 1

Um exemplo usando um cabo de 1kV de 3x35 mm² (3 condutores) pode ser usado apenas para comparar as principais características e os resultados finais nas escolhas.

Na tabela 1 pode-se ver que, para a mesma seção transversal, o cabo de alumínio é menor e mais leve do que o cobre à exceção da avaliação atual que é muito mais baixo. Isto significa que um tamanho de cabo maior deve ser selecionado se o alumínio é ser usado.

O dimensionamento de um cabo é conseguido através de um processo de seleção com base em determinados critérios de base.

TABELA 1: COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CABO DE 1 KV-EXEMPLO 1

Características	Condutores de cobre	Condutores de alumínio
Capacidade de condução de corrente no ar	135 A	93 A
Impedância	0,627 Ω/km	1,043 Ω/km
Diâmetro do cabo	30,5 mm	27 mm
Massa do cabo	1,89 kg/m	1,4 kg/m

Fonte: referência 2

Os seguintes fatores devem ser considerados:

- Carga em kW
- Fator de corrente de partida
- Fator de potência do motor (tomado geralmente em 75% da carga plena)
- Fatores de correção para a altitude, ambiente, cabos múltiplos em bandejas/dutos , radiação solar e outros
- Comprimento do cabo da fonte de alimentação ao equipamento (painel de controle, motor)
- Tipo de isolamento do cabo
- Nível de falha do sistema

Exemplo 2

Outro exemplo ilustrativo considerando um motor em um circuito elétrico para alimentar:

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

Da tabela 2, pode-se observar que, usando o cabo de alumínio, o cabo selecionado terá duas seções nominais maiores.

TABELA 2: COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CABO – EXEMPLO 2

Dados calculados com um comprimento de cabo de 100 m			
Tipo de cabo	Queda de tensão em condições de regime permanente	Queda de tensão em condições de partida	Resultado
Seção do cabo usando o cobre Condutores 3x35 mm ² , PVC/PVC/Cu 1 kV	2, 15%	7, 42%	Cabo apropriado
Seção do cabo usando o alumínio Condutores: 3x70 mm ² PVC/PVC/Al 1 kV	2, 37%	de 5, 14%	Cabo apropriado

Usando o exemplo, se um cabo de cobre é usado, a seção de 35 mm² é apropriado e, usando o cabo de alumínio, a seção de 70 mm² é necessária.

Fonte: referência 2

1.5. 3 FABRICAÇÃO DOS CABOS

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

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

O mesmo ocorre durante o processo de encordoamento, uma vez que para obter o mesmo grau de flexibilidade de cabo (traduzido para "raio de curvatura" do cabo completo) o fabricante pode projetar menos fios de cobre, com mais produtividade e, portanto, menos custo.

Quanto aos rolos e carretéis utilizados para o acondicionamento de cabos, os principais fatores a serem considerados são:

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

O maior diâmetro do cabo de alumínio equivalente a um determinado cabo de cobre, usando o mesmo carretel, resultará em um comprimento de cabo mais curto. Portanto, para o mesmo comprimento total do cabo (que depende do comprimento do circuito), mais carretéis devem ser transportados e manuseados.

Estes efeitos impactam o preço de fabricação final do cabo que é percebido pelo cliente, mas pode-se ver que o preço final não é o único fator.

1.5.4 ENTREGA DO CABO

O cabo de cobre e de alumínio tem os mesmos períodos de entrega embora o alumínio, por não ser de fabricação tão comum, dificilmente pode ser prontamente fornecido. O cabo de alumínio é fabricado sob demanda e o cabo de cobre normalmente é mantido em estoque.

As quantidades adquiridas são as mesmas assim como os comprimentos de lance nos carretéis. Conectores de cobre e terminações são fabricados por muitos fornecedores e costumam estar prontamente disponíveis. Os acessórios bi-metálicos estão disponíveis em muitos casos. A disponibilidade desses materiais em locais mais distantes pode representar um problema real.

1.6 RESULTADOS DE TESTES

Uma nova publicação pelos laboratórios da Powertech no Canadá - **History of ICA Projects at Powertech** foi publicado em 2017 (referência 14) mostrando os vários projetos desenvolvidos com o objetivo de comparar alumínio e cobre nas conexões de uso elétrico.

A tabela abaixo mostra os diferentes projetos desde 2003 e os principais resultados.

Visão geral dos projetos completos e em andamento			
Número	Descrição do projeto	Ano	Conclusão
1	Corrosão acelerada – América do Norte	2003	Cu melhor que Al
2	Painel BT – 3000 ciclos de corrente	2010	Inconclusivo
3	Teste térmico de operação e materiais	2012	Inconclusivo
4	1500 ciclos de corrente – mecânicos	2014	Cu melhor que Al
	1500 ciclos de corrente – compressão - métricos	2014	Cu melhor que Al
	1500 ciclos de corrente – compressão	2014	Inconclusivo
5	Fluência – América do Norte versus China	2016	Cu melhor que Al
	Retirada de stress	2016	Inconclusivo
6	Corrosão acelerada – China	2016	Cu melhor que Al
7	1000 ciclos de corrente – compressão China	2017	Cu melhor que Al
8	Fluência – seleção global	2017	Cu melhor que Al
9	Estudo das fases intermetálicas de materiais bimetálicos	2017	Inconclusivo
10	1000 ciclos de corrente – conexões com cabos de grandes seções	2017	Em andamento

Fonte: referência 14

Pode-se verificar que, para quase todos os projetos, as conclusões são bem melhores para os condutores de cobre, apesar de algumas limitações aplicadas a métodos de teste específicos não puderam demonstrar uma conclusão definitiva. Um item muito importante acima é o #10, aplicado a grandes conexões para grandes seções (maior que 240mm²), com análise ainda em andamento.

1.6.1 VIBRAÇÃO E CORROSÃO

Os cabos de alumínio podem apresentar trincas e falhas quando submetidos a vibração, efeito que está presente em quase todas as instalações elétricas. Os motores e os transformadores produzem vibração, portanto o uso do cabo de alumínio será mais suscetível a trincas do que o cobre, de acordo com informações de instaladores e pessoal da manutenção.

Há casos registrados de linhas aéreas de alumínio que falham devido à vibração eólica (gerada pelo vento). Danos provenientes de vibração são ainda mais graves em condutores sólidos de alumínio.

O alumínio tem a resistência de corrosão excelente, mas este é somente verdadeiro para ligas de alumínio utilizadas em aviões e para alumínio revestido usado em janelas e outros. Alumínio utilizado em cabos sofre corrosão quando instalado em condições úmidas por isso não é adequado para instalações com processos úmidos, de acordo com informações dos instaladores e de equipes de manutenção.

A tabela abaixo mostra as conclusões do relatório da Powertech sobre este assunto.

Projetos concluídos – corrosão acelerada – América do Norte

Conclusões

Conectores de alumínio aplicados em condutor de alumínio

- ✓ 40% falharam
- ✓ 10% mostraram aumento significativo de resistência
- ✓ 20% mostraram aumento moderado de resistência
- ✓ 30% mostraram diminuição de resistência

Conectores de alumínio aplicados em condutor de cobre

- ✓ 40% mostraram aumento significativo de resistência
- ✓ 30% mostraram aumento moderado de resistência
- ✓ 30% mostraram diminuição de resistência

Conectores de cobre aplicados em condutor de cobre

- ✓ 70% mostraram pequeno aumento de resistência
- ✓ 30% mostraram diminuição de resistência

De modo geral, conectores de cobre apresentaram o melhor desempenho

É claramente demonstrado que os efeitos de corrosão impactam significativamente o desempenho e segurança de conectores e o cobre é a melhor solução.

1.6.2 CONECTORES E TERMINAIS

Ao aplicar terminais aos condutores de cobre, os acessórios de cobre estanhados são engastados no condutor com uma ferramenta de compressão hexagonal. Isso resulta em uma junção sólida de cobre para cobre, que pode ser parafusada na conexão de cobre do terminal.

Ao aplicá-los aos condutores de alumínio, é necessária uma abordagem diferente. O terminal deve ser um tipo especial de Al-Cu, de tal modo que o núcleo do cabo de alumínio seja engastado no tubo de alumínio que é ligado à placa de cobre (bi metálico). Desse modo, pode ser conectado com segurança à conexão de cobre.

A ferramenta de compressão para este tipo de acessório não é hexagonal, mas apresenta um recuo profundo circular, dois dos quais são necessários. Este recorte atravessa a camada exterior de alumínio, passando assim através da camada de óxido de alumínio da sua superfície externa. Isso se aplica a condutores de alumínio sólidos.

Uma compressão hexagonal pode ser usada desde que certas medidas de precaução sejam tomadas. A superfície externa dos fios de alumínio desenvolve uma camada de óxido de alumínio que reduz drasticamente a condutividade elétrica.

Para permitir o uso de compressão hexagonal, esta camada deve ser completamente removida e a superfície deve ser raspada imediatamente antes da compressão. Por esta razão, a compressão hexagonal de condutores sólidos não é recomendada.

Se um condutor de alumínio é ligado em um conector de cobre, duas coisas podem acontecer.

Uma reação eletrolítica ocorre na presença de umidade, causando corrosão.

A diferença entre os coeficientes de expansão térmica do alumínio e do cobre é tal que quando aquecido em carga, os dois metais se expandem e contraem a uma taxa diferente (17×10^{-6} para o cobre e 23×10^{-6} para o alumínio). Isto provoca o afrouxamento dos fios dentro do terminal, com superaquecimento subsequente e mesmo falha. Isso também pode ser a causa de eventuais incêndios.

Há uma grande diferença entre as dimensões dos conectores de cobre e bi-metálicos. Utilizando o exemplo 2 acima, um conector de cobre padrão de 35 mm^2 tem comprimento de 37 mm, enquanto que um bi-metálico de 70 mm^2 , tem 86 mm de comprimento.

Assim, pode-se ver que, em mais casos, mais espaço é exigido para terminações e conectores. Isso pode resultar que a caixa de terminação pode ser muito pequena, exigindo a adição de uma caixa maior.

Em muitos casos isso não é fisicamente possível, portanto, uma caixa de interconexão adicional precisa ser introduzida onde o cabo de alumínio é ligado a barras curtas e ao menor cabo de cobre conectado ao equipamento. Soluções especiais são necessárias.

Quanto à instalação de conectores e terminação, a qualificação do electricista de instalação é basicamente a mesma para cobre e alumínio. O alumínio é mais difícil de ser trabalhado, portanto o custo da terminação é mais elevado devido ao tempo extra necessário para realizar o mesmo trabalho.

Em média, o custo adicional é de cerca de 50% do custo do terminal, de acordo com os instaladores consultados. A instalação real do cabo para racks custa basicamente o mesmo.

A tabela abaixo mostra as conclusões do relatório da Powertech (referência 14) sobre este assunto.

Projetos concluídos – 1500 ciclos de corrente - mecânicos
Conclusões

- Todas as amostras de cobre apresentaram o melhor desempenho
- Condutores de cobre com conexão de alumínio apresentaram mau desempenho
- Conectores de alumínio aplicados em condutor de alumínio apresentaram o pior desempenho
- Não há correlação evidente entre método de preparação, nível de torque e falha

Projetos concluídos – 1500 ciclos de corrente – compressão métrica
Conclusões

- Amostras de cobre apresentaram o melhor desempenho
- Amostras de alumínio preparadas com inibidor de oxidação apresentaram desempenho adequado
- Amostras de alumínio escovadas apresentaram desempenho semelhante daquelas não escovadas
- Amostras de alumínio sem inibidor de corrosão e não escovadas apresentaram o pior desempenho

Projetos concluídos – 1500 ciclos de corrente – compressão
Conclusões

- Condutor de cobre com conector de alumínio apresentaram o melhor desempenho
- Amostras totalmente de cobre apresentaram desempenho adequado

- Amostras de alumínio escovadas apresentaram desempenho relativamente adequado
- Amostras de alumínio não escovadas apresentaram o pior desempenho

Os resultados demonstraram que, quanto aos testes de 1500 ciclos de corrente (mecânica, compressão) em conectores, o cobre ainda é a melhor solução.

1.6.3 SUPORTES DE CABOS

O cabo de alumínio é menor e mais leve que o de cobre, mas devido ao aumento na seção equivalente, uma bandeja ligeiramente maior pode ser necessária em alguns casos.

Se em uma configuração típica como no exemplo acima, havia 10 circuitos seguindo a mesma rota, então a largura da bandeja necessária para cabos de cobre seria de 305mm, enquanto que para cabos de alumínio seria de 330 mm de largura. Uma bandeja de 400 mm de largura seria escolhida.

A massa de cabo de cobre nessa bandeja seria de 21 kg/m, enquanto do alumínio seria de 20 kg/m, portanto, não muito diferente.

1.6.4 MANUTENÇÃO

As descrições acima mostram que o coeficiente de expansão térmica para o alumínio é 42% maior do que o de cobre. Esta característica é preocupante quando se estuda a expansão e contração de condutores em conexões elétricas durante a aplicação dos ciclos térmicos em sua operação normal.

Um dos fatores importantes para estabelecer e manter uma conexão de baixa resistência é o uso de pressão adequada e bem distribuída. A superfície de um pedaço de metal, mesmo parecendo lisa, consiste em microscópicos "picos" e "vales". Quando o aumento da pressão é aplicado, os pontos iniciais são deformados e achatados, permitindo o contato em mais pontos. Mesmo com a pressão máxima que pode ser exercida, aproximando-se do limite de escoamento do material, a área de contato real representa apenas uma pequena porcentagem da área total das superfícies envolvidas. Quando se realiza uma conexão parafusada, o metal se deforma plasticamente com o aumento da pressão, o que permite um melhor contato metal-metal.

O tipo de dispositivo afeta a distribuição da pressão na conexão parafusada. Se somente uma porca e um parafuso são usados, a área de contato fica muito concentrada em torno do furo do parafuso. O material na vizinhança pode ser altamente submetido a stress e sujeito a fluência, deformação não reversível.

Uma vez que o coeficiente de expansão térmica para o aço utilizado nos parafusos é de apenas 50% do que o do alumínio, como a temperatura aumenta durante o ciclo térmico da operação, a força de aperto também irá aumentar. Esta força de aperto aumentada tenderá a deformar ainda mais os pontos de contato que já foram deformados pela força de aperto inicial.

Assim, um efeito permanente na conexão pode ser produzido. Quando a conexão esfria, este efeito permanente resulta em uma pressão mais baixa sobre a conexão, o que provoca um aumento na resistência elétrica da conexão. No próximo ciclo de carga, a temperatura da conexão será aumentada causando mais deformação, resultando em um efeito mais permanente e perda de força de aperto no resfriamento. Eventualmente, pode resultar em falha conjunta.

Este comportamento 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.

1.7 CONCLUSÕES DA PARTE 1-PROPRIEDADES

- O cobre tem melhores propriedades técnicas (elétricas, mecânicas, térmicas, químicas) em comparação com o alumínio
- Os mecanismos de falha em princípio são mais intensos em alumínio
- Nenhum ou poucos dados disponíveis de falhas mostram-se insuficientes para justificar toda a diferença na confiabilidade entre os dois materiais para o uso em cabos condutores.
- Cabos condutores de cobre são preferidos tecnicamente por causa da falta de problemas com conectores, melhores propriedades mecânicas e considerados como material padronizado pela maioria de projetistas e usuários.
- Os condutores de alumínio são selecionados principalmente por razões econômicas. Vantagens adicionais são mencionadas, como menor peso e compatibilidade com os cabos existentes

PART 2-PERSPECTIVA DO CICLO DE VIDA

2.1 INTRODUÇÃO

A parte 1 deste artigo discutiu as propriedades gerais dos diferentes materiais e mostrou muito claramente a vantagem do cobre em comparação com o alumínio, em relação aos aspectos elétricos nos condutores e também relacionados a conexões e características mecânica.

A fim de permitir uma comparação mais prática entre os cabos de cobre e alumínio, a Parte 2 deste documento apresenta dois estudos de caso desenvolvidos discutindo outra perspectiva que é o ciclo de vida, considerando toda a história da instalação, mostrando o projeto, instalação, operação e manutenção, alinhados a uma abordagem mais moderna de gestão de ativos.

O gerenciamento de ativos físicos resulta em uma política de renovação de ativos clara que devem ser substituídos não apenas quando estão irreparavelmente danificados, mas quando:

- Os custos operacionais e/ou de manutenção durante a vida útil restante do ativo excederem o custo de substituição;
- Há risco iminente de falha do ativo;
- O impacto de uma falha provável supera o custo de substituição;
- Uma provável falha pode comprometer a confiabilidade e segurança do sistema e das pessoas;
- Os ativos tornaram-se obsoletos e ineficientes para operar e manter o negócio;
- Os ganhos resultantes da substituição implicam na melhoria dos indicadores relacionados com a segurança humana, o ambiente e o desempenho da empresa.

A tomada de decisão para a substituição antecipada de ativos deve se basear em informações exatas sobre as condições destes ativos, assegurando através da análise e diagnóstico o melhor retorno do capital investido, o melhor desempenho operacional e o menor risco para a Organização.

2.2 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO

O primeiro estudo de caso da parte 2 é um caso real de um circuito de 1 kV com 100 m de comprimento, considerando os dados fornecidos por uma Concessionária de distribuição de energia elétrica no Brasil (AES/Eletropaulo), instaladores e outros fabricantes listados em referências. Uma abordagem inicial foi desenvolvida em 2011 e o desempenho de custo é agora analisado considerando novos dados de cálculo de custos.

2.2.1 CUSTOS

Os valores médios de LME aplicados ao mesmo mês (março/2011) estão também registrados como referência, uma vez que os preços atuais não variam ao mesmo tempo e taxa do LME. Os preços dos cabos informados pela AES Eletropaulo representam o valor médio pago durante esse mês.

O preço unitário do cabo de alumínio é mais baixo do que o cobre mesmo para a maior seção transversal e considerando 1 circuito de 100 m, como segue:

- Cabo 3x35 mm² (3 condutores) PVC/PVC/Cu 1 kV – US\$ 16,87/m
- Cabo 3x70mm² (3 condutores) PVC/PVC/Al 1 kV – US\$ 14.6 m

De acordo com os registros do LME, os valores médios de referência aplicados a dezembro/14/2018 (3 meses) são:

- Cobre: US\$ 6100 /tonelada
- Alumínio: US\$ 1921 /tonelada

A relação entre os preços do cabo de Cu/Al não é proporcional aos valores de LME Cu/Al, devido à influência dos outros custos de componentes, principalmente os processos da isolamento e da cobertura e da própria manufatura.

Isto mostra uma economia de cerca de 14% se o cabo de alumínio equivalente é selecionado apenas considerando o preço de compra.

No entanto, a conclusão não é tão simples, o custo adicional de acessórios e trabalho deve ser adicionado a esta equação. Um custo oculto é a exigência de gabinetes maiores/caixas de terminais que é bastante difícil de quantificar.

- Custo de terminais para cabos de cobre de 35 mm² : US \$1. 32
- Custo de terminais bimetálicos para cabos de alumínio de 70 mm²: US \$9. 81

- O custo de realização de terminais de cabos de cobre (35 mm² - 3 condutores) é US\$16.05 (informado por instaladores, referências 6 e 13)
- O custo de realização de terminais de cabos de alumínio (70 mm² - 3 condutores) é US\$32.00 (informado pelos instaladores, referências 6 e 13)
- Os custos anuais de manutenção são considerados como da ordem de 3% do custo do mão de obra de instalação para cabos de cobre e 9% do custo de mão de obra de instalação para cabos de alumínio (informado pela AES/Eletropaulo, referência 1). Essa proporção é bastante estável ao longo dos anos, considerando a diferença de propriedades físicas de ambos os materiais.
- O custo de transporte, manuseio e armazenamento considera que o carretel representa 2% do valor do cabo de cobre nele contido e 4% do valor do cabo de alumínio. O frete + armazenamento + manuseio está sendo considerado como US\$44/ton (informado pela AES/Eletropaulo, referência 1).

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

TABELA 3 – CUSTO TOTAL DO CICLO DE VIDA DO PROJETO

Item de custo	Cabo de cobre 1kV (3x35 mm²) (US\$)	Cabo de alumínio 1kV (3x70 mm²) (US\$)
<i>LME (Dez/2018)</i>	<i>Cobre = 6100</i>	<i>Alumínio = 1920</i>
Cabo	1687,0	1460,0
Terminais	7,92	58,86
Mão de obra	32,10	64,00
Manutenção (durante 20 anos)	24,1	221,15
Transporte, manuseio e armazenagem	42,06	64,56
Total	1793,09	1868,57

2.2.2 CONCLUSÕES DO PRIMEIRO ESTUDO DE CASO

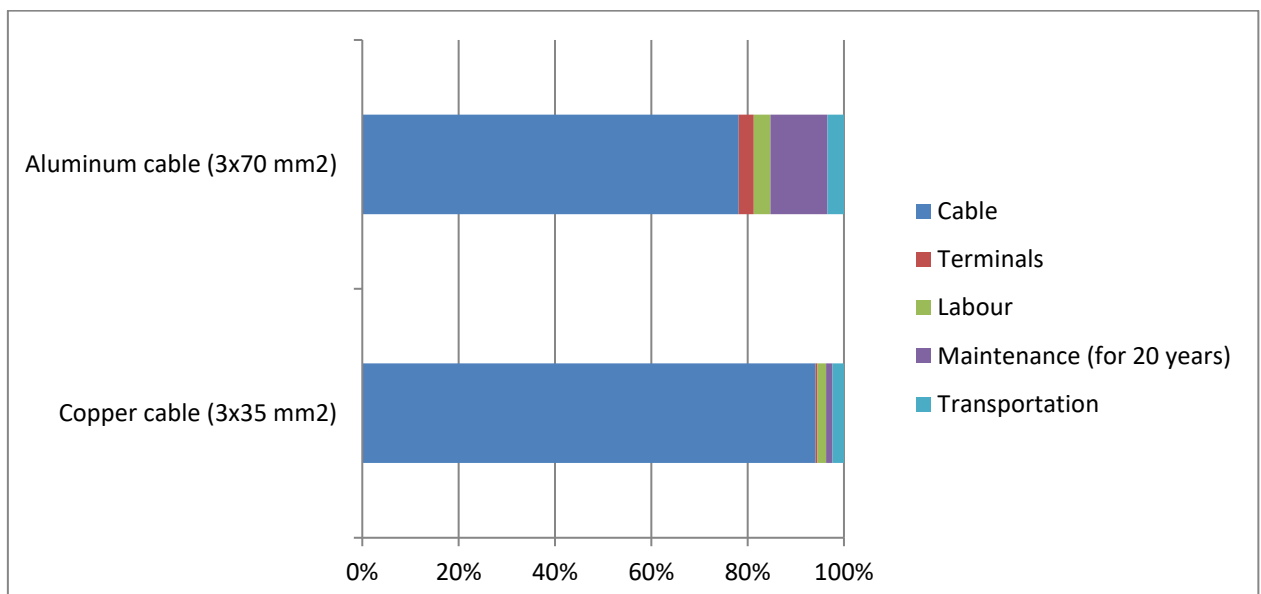
O caso real aqui descrito mostra que o custo total do ciclo de vida do projeto, considerando cabos, instalação, acessórios, manutenção, embalagem, transporte, manuseio e custos de armazenamento, é maior para cabos de alumínio do que para cabos de cobre.

Um dado interessante observado para o período (dezembro/2018), quando os custos do projeto foram registrados foi que a relação entre os valores LME cobre/alumínio atingiu quase 3,2 valor que pode ser considerado significativo historicamente. Como os preços reais do cabo não variam diretamente com os preços LME devido a outros materiais e componentes, além de contratos de fornecimento a longo prazo, mesmo nesta situação o cobre mostrou ser a melhor solução técnica e econômica.

Embora o preço unitário do cabo de alumínio seja inferior ao cabo de cobre, essa lacuna pode ser reduzida se cabos de grandes seções transversais estiverem envolvidos na instalação.

No que diz respeito aos aspectos do ciclo de vida, devem ser incorporados os custos de outros componentes e serviços. Como visto aqui, os conectores e terminais para cabos de alumínio são muito mais caros do que o equivalente aos cabos de cobre devido aos materiais e às especificações diferentes. Adicionalmente, o custo de mão de obra para instalar cabos de alumínio é mais elevado porque são mais difíceis de trabalhar. O custo do ferramental também é maior, porém, obviamente, não na mesma medida.

A figura abaixo mostra a contribuição percentual de cada etapa do ciclo de vida aqui considerada com base nos valores da Tabela 3.



O comprimento real do circuito informado pela AES/Eletropaulo (referência 1) é relativamente longo considerando instalações comuns de 1 kV, o que seria relativamente pior para os cabos de cobre, na medida em que a contribuição do cabo no custo total é significativa.

Normalmente, os critérios da queda da tensão são obrigatórios nos circuitos onde as seções do cabo de 35 mm² (considerando cabos de cobre) são necessários e mesmo as perdas de energia (critérios a ser verificado) devido aos níveis reais para circuitos de 1 kV são demasiado elevados, de modo que a tensão será maior. Se a tensão aumentar, a classe de tensão do cabo deve especificar maior isolamento e espessura de cobertura, aumentando o custo do cabo, principalmente para cabos de alumínio para os quais a seção transversal e os diâmetros são maiores para a mesma capacidade de corrente. No entanto, para ser consistente com as fontes de informação, este circuito de 100 metros de comprimento foi escolhido

A maior desvantagem para o uso de cabos de alumínio é o fator de risco. Uma vez que um cabo de alumínio esteja instalado não pode com segurança ser trocado. Além disso, ao manusear o cabo de alumínio grande cuidado deve ser exercido para garantir que ele não seja flexionado muitas vezes, o que poderá causar trincas.

O raio de curvatura permissível do cabo de alumínio é menor do que aquele de cobre porém, uma vez dobrado, não pode com segurança ser endireitado.

Um grande cuidado deve ser tomado em aplicar o material ou a graxa inibidora da umidade em todas as conexões para impedir a reação eletrolítica.

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

Como sugestão para estudos futuros, deve ser muito importante analisar e avaliar mais detalhadamente a influência do critério de projeto econômico como complemento dos demais critérios técnicos aqui utilizados, considerando também as perdas energéticas e a eficiência de instalação global.

Como resumo, podemos concluir a partir deste caso específico:

- No estudo de caso, a grande diferença de custo inicial de investimento entre os cabos foi reduzida para 4% em toda a sua vida útil
- A diferença do preço do condutor entre o cobre e o alumínio é elevada, porém sobre a vida completa do cabo é uma fração do custo total
- As decisões de investimento devem se basear nos custos totais de vida, a fim de obter um sentido claro da diferença de custo entre os projetos

- A diferença nos custos de O & M precisa de mais análise e pode reduzir a diferença de custo durante o tempo de vida dos cabos
- Cálculos mais elaborados podem ser feitos com base em bancos de dados internos de Concessionárias para sua situação particular e operações específicas

2.3 SEGUNDO ESTUDO DE CASO

O segundo estudo de caso da parte 2 detalhada abaixo reforçará as conclusões para o primeiro estudo de caso. É baseado em um projeto novo patrocinado pela Japan Copper Development Association, JCDA e International Copper Association, ICA que organizou o Workshop "Comparison of Conductor Material Performance for Underground Cabling and Overseas' Case-study", em 22 de outubro/2018, em Tóquio. Foi a primeira vez que JCDA/ICA patrocinou um evento específico para linhas subterrâneas; o Workshop contou com a presença de 20 profissionais das indústrias afins, incluindo Concessionárias, fabricantes de cabos e instaladores. No Workshop, participaram 3 palestrantes.

O Sr. Andreas Karampekios, da DNV-GL, comparou o cobre e o alumínio como o condutor para a baixa e médias tensões. O alumínio custa e pesa menos, mas o cobre é superior em termos de propriedades mecânicas e físicas, além ser mais resistente contra a corrosão. Além disso, analisando o custo não apenas para o preço de compra inicial, mas para um ciclo de vida inteiro, o alumínio não carrega grande parte da vantagem econômica.

- As decisões de investimento se baseiam fortemente no investimento inicial
- Os custos durante a vida útil proporcionam uma melhor compreensão de todos os custos de um cabo subterrâneo
- A análise de custo do ciclo de vida pode ser utilizada para determinar a melhor opção de custo-benefício entre componentes tecnicamente iguais
- Os valores são descontados para o valor presente líquido e somados resultando no custo total da vida útil de um cabo
- O estudo assumiu diferentes circuitos de tensão, a fim de verificar a sensibilidade às seções transversais do cabo, conforme detalhado nas conclusões.

2.3.1 CAPEX E OPEX

Os seguintes fatores se aplicam à abordagem de CAPEX e OPEX, com base nos critérios adotados por uma abordagem de gestão de ativos, o custo de investimentos (CAPEX) e o custo de operação (OPEX) durante a vida útil da instalação:

Capex

Custos do sistema de cabos

Custos de instalação

Opex

Operação & custos de manutenção

Perdas elétricas

Valor residual

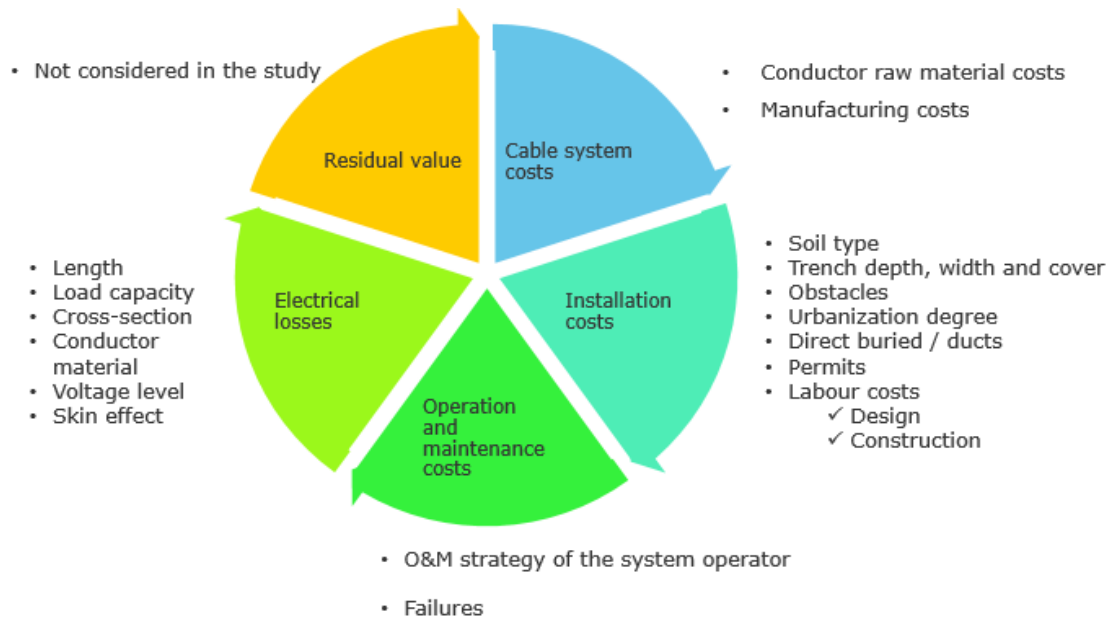
Dados utilizados:

Informações de custo da indústria, Concessionárias e instaladores

Dados de falha de um operador de rede Europeu

O modelo adotado pelo estudo considera as seguintes fases:

- Calcula o custo para os diferentes parâmetros com base em dados
- Calcula o NPV (valor presente líquido) de todos os custos
- Soma de todos os custos durante a vida útil
- Compara o cabo de cobre e alumínio
- Modelo baseado em Excel



Fonte: referência 3

2.3.2 CABOS COMPARÁVEIS

- Cabos comparáveis com a mesma capacidade de transmissão foram escolhidos para 3 diferentes níveis de tensão
- Enterramento direto como tipo de instalação em um ambiente urbano com 70% de custos de pavimentação

Tabela 4

Voltage level (kV)	Cross-section	
	Copper (mm ²)	Aluminium (mm ²)
20	400	630
110	400	630
400	1.000	1.600
400	1.200	2.000

Parâmetros escolhidos

Taxa de juros anual:	3
Área:	Urbana
Preço da electricidade:	50 EUR/MWh
Vida:	50 anos
Número de fases:	3
Comprimento:	1 km

Fonte: referência 3

Valor presente líquido

- Usado para medir o valor dos fluxos de caixa futuros
- Um fluxo de caixa futuro tem um valor menor do que o mesmo fluxo de caixa presente
- Comumente usado para determinar se um projeto justifica o investimento
- Pode ser usado para comparar vários projetos para determinar o investimento ideal
- O cabo com os menores custos pode ser considerado um melhor investimento a partir de uma perspectiva de custo neste caso

$$NPV = \frac{\sum_{t=1}^T C_t}{(t+r)^t} - C_0$$

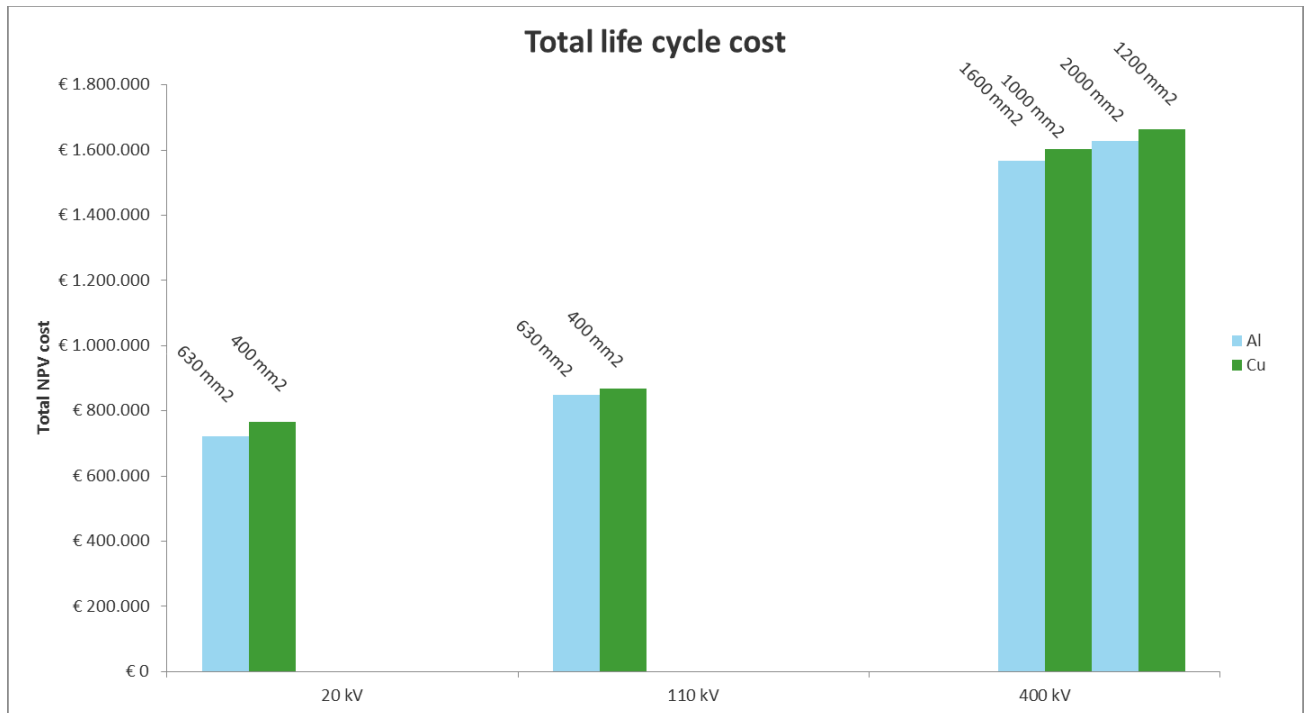
- C_0 = Initial cost
- C_t = Net cash flows
- r = discount rate
- t = time

2.3.2 CONCLUSÕES DO SEGUNDO ESTUDO DE CASO

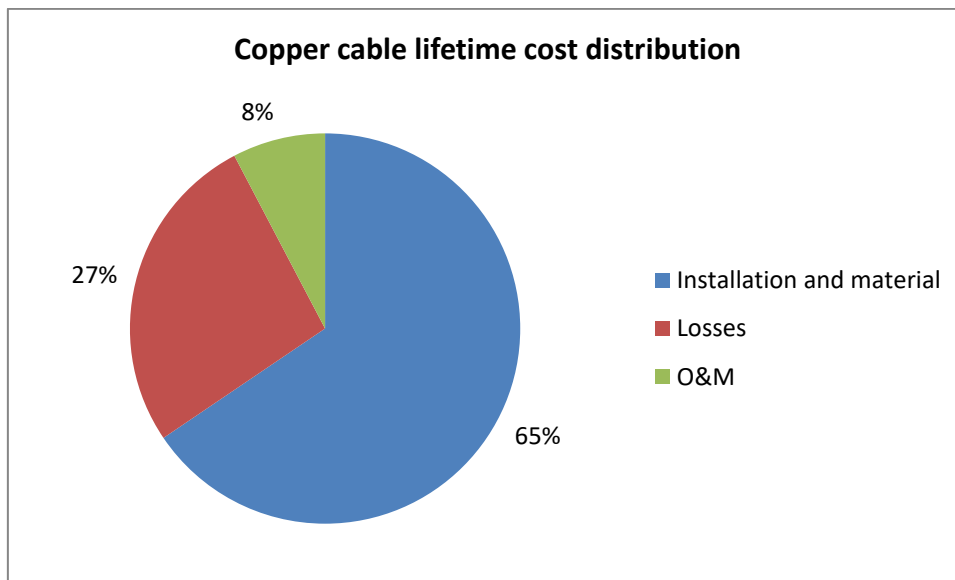
O custo total do ciclo de vida por tipo de cabo pode ser resumido da seguinte forma:

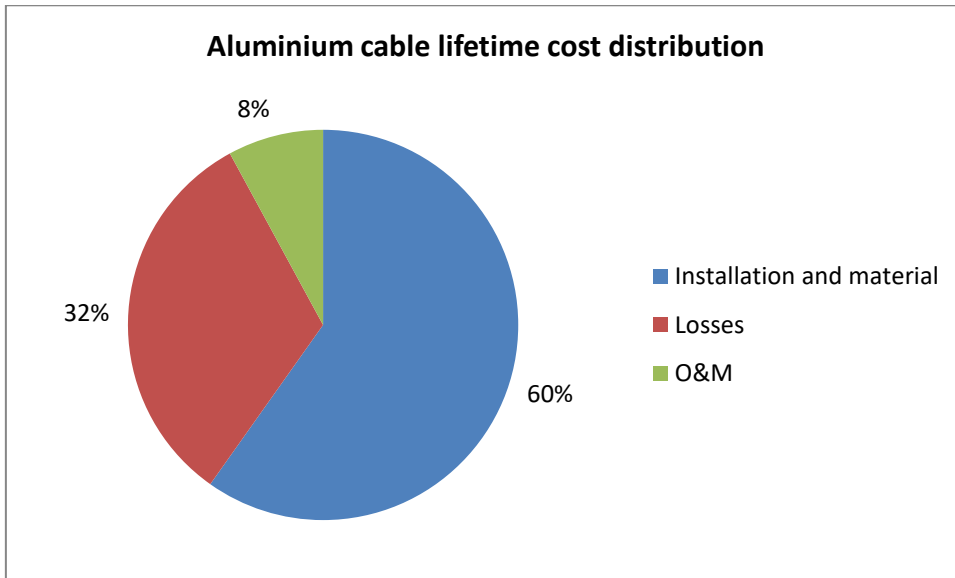
- Seções transversais de cabos maiores parecem diminuir a diferença de custo, principalmente devido à não-linearidade entre as propriedades condutoras e a dissipação de energia;
- Diferença média de 3% no custo entre o uso de condutores de cobre e alumínio;
- O investimento inicial é somente parte dos custos totais da vida, a análise real deve considerar o custo inteiro da vida que inclui perdas de energia, manutenção, história da falha.

Tabela 5



Fonte: referência 3





Fonte: referência 3

2.4 CONCLUSÕES GERAIS DO PRIMEIRO E SEGUNDO ESTUDOS DE CASO

De ambos os estudos de caso, as conclusões gerais são detalhadas abaixo, justificando claramente a vantagem da escolha do cobre:

- No primeiro estudo de caso, a grande diferença de custo inicial de investimento entre os cabos foi reduzida para 4% durante toda a sua vida útil;
- A diferença do preço do condutor entre o cobre e o alumínio é elevada, porém sobre a vida completa do cabo é uma fração do custo total;
- As decisões de investimento devem se basear nos custos totais de vida, a fim de obter um sentido claro da diferença de custos entre os projetos;
- A diferença nos custos de O & M precisa de mais análise e pode reduzir a diferença de custo durante o tempo de vida dos cabos;
- Secções transversais maiores parecem diminuir a diferença de custo
- De acordo com o segundo estudo de caso, uma diferença média de 3% no custo entre o uso de condutores de cobre e alumínio, considerando as diferentes hipóteses;
- O investimento inicial é apenas uma parte do custo total da vida útil;
- Cálculos mais detalhados podem ser feitos com base em bancos de dados internos de Concessionárias de energia elétrica para sua situação particular e para operações específicas.

A conclusão final das partes 1 e 2, em relação às propriedades físicas de cobre e alumínio, parâmetros diferentes para projetos de instalação reais e a perspectiva de ciclo de vida é que o uso de cobre apresenta claras vantagens. Considerando o desempenho técnico bem como ganhos financeiros.

REFERÊNCIAS

1. Eletropaulo – departamento de projetos/área de avaliação de projetos
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Standard NBR 5410:2004
3. Comparison of conductor material performance for Under Ground Cabling and Overseas' Case study – ICA 2018
4. Alumínio Association – alumínio condutores Handbook – 1997, Nova Iorque
5. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Abinee – AbineeTec reports at <http://www.tec.abinee.org.br/2009/>
6. Hidrelplan instaladora Ltda. – área de instalação elétrica
7. International Copper Association - ICA
8. Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo - IEE/USP, High Current Laboratory
9. Nexans e-Catalogue, em <http://www.Nexans.com>
10. Prysmian Brasil – Energy Cable Technical Department, Santo André - Brasil
11. Sindicato da Indústria de Instalações do Estado de São Paulo – Sindinstalação – São Paulo Association of Electrical Branch
12. Sindicato da Indústria de Condutores Elétricos, Trefilação e Laminação do Estado de São Paulo – Sindicel at www.sindicelabc.org.br
13. VOX projetos e instalações Ltda. – instalação e serviços ao cliente
14. History of ICA Projects at Powertech – Canada - 2017