



Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

A EXPERIÊNCIA DA CEMIG NA INSTALAÇÃO DE CABOS CONDUTORES AÉREOS PARA ALTAS TEMPERATURA DE OPERAÇÃO - ASPECTOS CONSTRUTIVOS, DE SEGURANÇA E CONFIABILIDADE DAS LINHAS

GIOVANI EDUARDO BRAGA(1);
Cemig D(1);

RESUMO

Este informe mostra a experiência da Cemig com instalação de cabos especiais para aplicação em recapacitação de linhas, com foco principal na experiência de construção em campo, mas sem deixar de analisar aspectos de planejamento, projeto, operação e manutenção. Com isso, é feita uma análise de engenharia e gestão de ativos, metodologia mais moderna na atualidade para avaliação de custos e riscos dos ativos ao longo do ciclo de vida dos mesmos, buscando a máxima eficiência do ativo. A conclusão é que a aplicação do cabo especial deve ser minuciosamente estudada ao longo da vida útil esperada do ativo.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de alta tensão, recondutoramento, instalação de cabos, cabo condutor para altas temperaturas, gestão de ativos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A recapacitação, ou aumento de capacidade de transmissão, de linhas de distribuição e transmissão (LD e LT) de eletricidade é uma das atividades de expansão mais comum existentes nas concessionárias, devido a necessidade de atendimento a cargas e dificuldades de encontrar novos corredores de servidão ou domínio para a passagem das linhas. Isso é particularmente muito comum em grandes centros urbanos onde há muita carga concentrada em pequenas áreas. Esta recapacitação pode ser feita por controle da tensão ou da corrente, sendo neste último a forma mais comum, prática e efetiva, na grande maioria dos casos.

Existem várias formas de se fazer essa recapacitação, como reesticar cabos, trocar os arranjos das cadeias de isoladores, fazer a raspagem do solo debaixo dos cabos, dentre outros. Mas o mais comum e efetivo é fazer a troca do cabo condutor (recondutoramento) para um cabo conduto de maior capacidade. Neste caso, como nos outros, uma variável muito importante é a temperatura do cabo, onde há uma relação direta com a corrente elétrica através da *lei de Joule*. O aumento de temperatura dos cabos tem efeitos físicos, químicos, mecânicos e metalúrgicos, que por sua vez irão interferir na confiabilidade mecânica/estrutural da linha, e na confiabilidade elétrica, onde a função isolamento é afetada, uma vez que na linha aérea o isolamento é feito pelo ar. Portanto, as propriedades físicas e químicas dos cabos condutores, como a dilatação térmica linear, fluência (ou creep), resiliência mecânica e resistência a corrosão são variáveis por demais importantes para a definição do cabo condutor de uma linha, e mais ainda em uma recapacitação por recondutoramento. Outra variável também muito importante, que não há relação direta com a temperatura do condutor, é o peso do cabo condutor, normalmente expresso pela densidade linear. Neste contexto se insere os cabos condutores especiais, que na verdade são cabos construído com formatos, arranjos e materiais diferente dos cabos comuns utilizados normalmente nas linhas, como os cabos CA ou AAC (cabo homogêneo de alumínio 1350), CAA ou ACSR (cabo condutor de alumínio 1350 com alma de aço) e CAL ou AAAC (cabo homogêneo de alumínio liga). Os cabo condutores CALA ou ACAR (cabos de alumínio com alma de liga de alumínio) são pouco usados, principalmetne na distribuição.

A Cemig vem estudando e desenvolvendo condutores especiais (ou não convencionais) junto a fabricantes de cabo condutores desde a década de 1990. Foram vários projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), dissertações de mestrado, etc. Embora a grande maioria dos cabos especiais são para fins de aumento da potência de transmissão de energia elétrica, existem cabos especiais para outros propósitos, como os cabos



auto-amortecidos para problemas de vibração, e recentemente os cabos OPPC (Optical Phase Conductor) utilizados para comunicação, monitoramento, etc (1 e 2).

Um parâmetro pouco trabalhado na maioria dos estudos de planejamento e viabilidade para a aplicação de cabos especiais para altas temperatura são as perdas elétricas e regulação (queda de tensão), principalmente as relacionadas ao *efeito Joule*. Mas além disso, geralmente, desconsideram os custos de instalação, que obviamente são maiores, e os custos de operação e manutenção (O&M), que também são maiores, geralmente. Na realidade, falta, na maioria dos casos, um sistema de engenharia e gestão de ativos, onde se possa avaliar e calcular os custos e riscos durante todo o ciclo de vida útil de um ativo, no caso o cabo e a linha, desde o momento da sua concepção, passando pela implantação e O&M, até o fim da vida útil e descarte (3).

2.0 - HISTÓRICO E APLICAÇÃO DOS CONDUTORES ESPECIAIS NA CEMIG

Os primeiros estudos da Cemig com cabos especiais para altas temperaturas foi no final da década de 90 do século passado, quando foram feitas as primeiras pesquisa (4), onde o cabo de alumínio termorresistente (liga TAL) foi pesquisado e aplicado (5). Isto culminou com a construção/recapacitação de uma linha, que inclusive tinha monitoramento em tempo real (6). Posteriormente, a Cemig fez uma pesquisa com condutores compactos com formato trapezoidal (ACSR-TW) e na sequência com cabo condutor chamado tipo Gap (GZTACSR), onde foi contruída/recapacitada uma linha com este condutor. Entre os anos de 2015 a 2017, foram contruídas duas LDs de circuito duplo com a tecnologia de condutor com alma de compósito de fibra de carbono (ACCC). Estas diferentes siglas e nomenclaturas estão bem descritas na referência (7).

2.1 Utilização do cabo condutor termorresistente (TAL): aplicações, problemas e soluções

O cabo condutor liga termorresistente começou a ser estudado pela Cemig no final da década de 90 (4 e 5), com a aprovação de projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do programa da ANEEL e desde então foram várias aplicações. A primeira aplicação real foi na LT Neves 1-Neves 2, 138kV no ano de 2000, com pouco mais de 12km de extensão, onde a linha foi recapacitada pela troca de cabos condutores para 180MVA (temperatura de projeto de 100°C), com cabo bitola CAA Linnet (336MCM, formação 26/7 e seção 170,5mm²) e CA Tulip (336MCM, 19 fios e seção 170,5mm²). Depois disso, foram feitas várias linhas com esta tecnologia de cabo, inclusive na tensão de 230kV.

O cabo condutor termorresistente, frequentemente encontrado no catálogo dos fabricantes como T-ACSR ou T-CAA, no caso dos cabos com alma de aço, foi desenvolvido pra trabalhar com temperaturas superiores a 90°C sem que haja perda de resistência mecânica significativa. Segundo os fabricantes de cabo, o alumínio convencional dos cabos (AI 1350 ou EC Grade) começa a perder significativamente a resistência mecânica operando acima de 93°C, não recomendando ou se responsabilizando por esta aplicação. O alumínio, neste cabo TAL, tem um teor maior de zircônio que é responsável por minimizar o efeito de crescimento de grão e diminuição da densidade de deslocamentos, mecanismos responsáveis pelo amaciamento nos metais, e muito sensível no alumínio, devido as sua forma de organização interna (microestrutura). Portanto, o aumento do zircônio aumenta (ou mantém) a resistência mecânica do alumínio e aumenta também a resistividade elétrica do alumínio, não aumentando, significativamente, as outras propriedades (coeficiente de expansão térmica linear, módulo de elasticidade, etc.).

Como citado anteriormente, a análise de aplicação a ser feita deve ser baseada na engenharia e gestão de ativos, onde os custos e os riscos, estes últimos sempre negativos do ponto de vista de engenharia, deve ser avaliado ao longo de todo o ciclo de vida do ativos.

Do ponto de vista de planejamento, projeto e engenharia a solução da liga TAL é muito interessante, tanto que foi e é muito utilizada no setor elétrico, já que permite que os cabos condutores operem acima de 90°C atendendo as recomendações de fabricantes de cabo. Existem análises feitas, segunda esta ótica (5), que o cabo pode ser reduzido de diâmetro com a aplicação da liga TAL, aumentando sua temperatura de operação, e reduzir os esforços estruturais, otimizando a aplicação de torres. Em linhas gerais, o cabo condutor TAL minimiza a perda de resistência mecânica, e consequentemente, a probabilidade de falha dos cabos. Mas as análises de confiabilidade não devem se limitar somente a isso, uma vez que a análise não deve ser feita somente no campo das resistência, mas também das solicitações (carregamento mecânico/estrutural). Segundo a norma de projeto de linhas de transmissão, ABNT NBR 5422, o carregamento mecânico máximo hipoteticamente idealizado nos



critérios de carregamento mecânico dos cabos de linhas é de 50% da resistência mecânica do cabo, também chamdo de resistência mecânica calculada (RMC), conforme norma ABNT NBR 7270. Ou seja, caso o carregamento mecânico do cabo condutor da linha alcançar 50% de sua resistência mecânica, seja por qualquer motivo, a linha irá falhar mecanicamente/estruturalmente (rompimento ou queda de torres, fundações, isoladores, etc.). A perda de resistência verificada e modelada, segunda várias bibliografia (4 e 5), do cabo condutor ACSR não chegou a 10%, em que pese todas as incertezas de medição, amostragem e a própria temperatura de operação do cabo, que também é uma variável estatística (6), assim como a resistência mecânica (3). A temperatura do cabo, normalmente, fica 90% do tempo, ou mais, abaixo da temperatura de projeto/plotação (6). Por outro lado, 90% ou mais dos cabos condutores tem a resistência mecânica superior a informada pelo fabricante (dados de catálogo). Assim, não parece razoável que esta perda de resistência mecânica tenha efeitos significativos na confiabilidade estrutural da linha ou dos cabos. Do ponto de vista eletromecânico (plotação), os cabos CAA (ou ACSR em inglês), seja TAL ou AL 1350, podem apresentar a vantagem de, em altas temperaturas, o cabo ser mais tensionado pela alma de aço, uma vez que o coeficiente de dilatação/expansão térmica do alumínio é o dobro do aço. Isso faz com que o cabo, a altas temperaturas ou trações, seja praticamente todo suportado pela alma de aço. Essa particularidade dos cabos CAA faz com que o comportamento da flecha em relação a temperatura não seja linear. Isso cria um ponto de inflexão na curva chamado joelho (knee point), temperatura a partir da qual o cabo é totalmente suportado pelo aço. Isso pode e deve ser usado nas simulações eletromecânicas de plotação dos cabos. De qualquer forma, a altas temperaturas e trações, a resistência mecânica do alumínio é praticamente desprezível na resistência global do cabo, não devendo este ser um parâmetro efetivo para limitar a aplicação de cabos CAA em temperaturas acima de 90°C. Tudo isso deve ser repensado/reavaliado se o cabo TAL for um CA (ou AAC do inglês). De qualquer forma, o alumínio TAL, por si só, não consegue resolver o principal problema de altas temperaturas que é a dilatação térmica excessiva e aumento da flecha dos cabos, prejudicando/reduzindo o isolamento de ar necessário para o funcionamento seguro da linha aérea.

Do ponto de vista de instalação/construção com cabos TAL, praticamente nenhuma particularidade ou diferença é feita em relação aos cabos convencionais, já que o cabo tem as mesmas características geométricas e visuais, e praticamente as mesmas características físicas. Talvez esse seja o grande problema, não só de instalação, mas de manutenção ou até mesmo de inspeção de recebimento dos cabos TAL. A única forma de diferenciar um cabo TAL de um cabo Al 1350 é através de análise de composição química e/ou metalográfica. É possível perceber a diferença pela resistência mecânica ou elétrica em ensaio, mas a incerteza é grande. Assim, nas aplicações práticas de instalação de cabo TAL, há possibilidades de erros, caso não haja um bom rastreamento do material. Isso pode acontecer também na inspeção de recebimento, uma vez que não se faz ensaios químicos ou metalográficos de recepção dos lotes. Além disso, alguns fabricantes de cabo recomendam que as ferragens de fixação, especificamente grampos e emendas, tenham dimensões superiores a dos cabos convencionais para se dissipar mais calor, uma vez que o alumínio destas ferragens não é termorresistente. Toda vez que se foge do padrão ou do convencional, em relação a materiais, causa alguma dificuldade para instalação, pois erros podem ser comuns. Ou seja, pode ser que se use ferragens convencionais em cabos TAL, caso não haja uma boa gestão dos materiais a serem utilizados. No caso das primeiras aplicações da Cemig (4 e 5), usou-se ferragens convencionais, sem qualquer problema até hoje. Até mesmo porque a análise de materiais feita neste caso é a mesma feita no parágrafo anterior. De qualquer forma, nenhum custo ou risco adicional deve ser imputado a instalação/construção de linhas aéreas com cabos de alumínio termorresistente (TAL).

Em relação a O&M, a grande particularidade está na questão das perdas e regulação (controle de tensão). As perdas elétricas podem ser um grande problema, principalmente em altas temperaturas, uma vez que o efeito *Joule* é conhecido a séculos e proporcional ao quadrado da corrente elétrica. Isso deve ser considerado na avaliação de viabilidade de aplicação de qualquer tecnologia de cabos a altas temperaturas. Outra particularidade, além da descrita no parágrafo anterior, é quando há um sinistro ou falha mecânica do cabo, como o rompimento do condutor. Cabos condutores convencionais são fáceis de serem conseguidos, podem ser comprado inclusive em comércio varejista local. Já os cabos TAL, precisaria, via de regra, reserva/compra de material identificada e rastreada. Foi o que aconteceu recentemente na LT Neves 1-Neves 2, quando houve um rompimento no vão 13-14 desta linha. Não havia cabo liga TAL em estoque, e foi colocado cabo convencional. Com isso, esta linha ficou com uma limitação de capacidade. O cabo condutor liga TAL foi feito para que o alumínio não perca resistência demaziadamente como já informado. O aço não sofre perdas significativas de resistência mecânica a menos de 300°C, aproximadamente. Entretanto, o sistema de proteção contra a corrosão atmosférica usado na alma de aço, a galvanização, pode não ser efetivo a altas temperaturas. Quando a temperatura supera o patamar de 60 a 70°C, o zinco passa a ser mais nobre eletroquimicamente que o ferro, e este tende a se corroer galvanicamente em detrimento do zinco. Para solucionar este problema, que pode ser significativo em ambientes de corrosão atmosférica agressiva, maior inclusive que a própria perda de resistência mecânica pela temperatura (amaciamento), pode-se adotar a solução do cabo aluminizado (alumoweld® ou



Aluminum-clad), que pode inclusive reduzir a resistividade elétrica. É possível também utilizar alguns tipos de graxa protetora sobre a alma de aço, como veremos mais adiante para outros fins, embora hajam dúvidas sobre a durabilidade destas graxas protetoras. Cuidados adicionais devem se ter com atividades em linha viva, já que a temperatura do cabo é maior e não adequada para os equipamentos e ferramentas deste método de trabalho, podendo ser necessário fazer com carga reduzida, com monitoramento termográfico ou simplesmente não ser possível fazer.

Por último, na análise financeira/viabilidade destes cabos, deve ser feita a avaliação dos custos de aquisição dos condutores liga TAL. Segundo dados da época das primeiras instalações (4), o cabo condutor liga TAL era cerca de 10% mais caro que um cabo Al 1350 convencional. Há informações que hoje esta diferença não chega a 5%. Entretanto, como descrito nos parágrafos anteriores, todas as variáveis que interferem no custo ao longo da vida da linha, sejam elas mecânicas, elétricas ou eletromecânicas, além de variáveis como disponibilidade da linha, gestão de reserva técnica, etc., devem ser consideradas dentro do tempo e conforme o regulamento regulatório, para que a melhor solução seja adotada.

2.2 Utilização do cabo condutor compacto trapezoidal (TW): aplicações, problemas e soluções

O cabo condutor compacto trapezoidal foi objeto de pesquisa na Cemig no início dos anos 2000 (8 e 9). É um cabo onde os fios de alumínio não são redondos e sim em formato de trapézio. Foram feitos dois projetos de pesquisa e desenvolvimento em parceria com um grande fabricante multinacional de cabos. O propósito da utilização deste cabo é para ter ganhos elétricos, como menores impedâncias, corona e ruído audível, conseguido com a diminuição da quantidade de vazios internos da seção transversal do cabo. Vislumbrou-se também alguns ganhos mecânicos com isso, como a diminuição do diâmetro, diminuição de coeficiente de arrasto e redução nos níveis de vibração eólica. Foi estudada também a aplicação da liga TAL neste formato construtivo de condutor.

Apesar de não ser propriamente uma aplicação de cabos condutores de alta temperatura e não ter tido nenhuma aplicação real na Cemig, devido ao fato do fabricante parceiro na época ter sido vendido para uma multinacional de outro país, que no seu portfólio ter o cabo compacto de fios de outro formato, a pesquisa foi válida pois ajudou muito a Cemig entender o comportamento mecânico e elétrico de cabos com geometrias não convencionais, geometrias estas que posteriormente foram utilizadas em outros cabos condutores especiais para altas temperaturas. O cabo condutor compacto trapezoidal foi utilizado em uma LT experimental onde foram retiradas as principais conclusões a respeito desta tecnologia, além de ensaios em laboratório e simulações numéricas (8).

A análise a ser feita da tecnologia de fios de formato alternativo ao redondo, no caso o TW, é, como citado anteriormente, baseada na engenharia e gestão de ativos. Ou seja, os custos e os riscos devem ser analisados ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, no caso o cabo condutor, inclusive servindo para definir este fim de vida útil.

A engenharia de projetos de linhas pode-se ter um ganho considerável na aplicação de cabos compactos em função de se ter mais massa de alumínio em um mesmo diâmetro externo. Ou seja, a redução de espaços vazios entre os fios permite uma resistência elétrica menor sem haver maiores esforços mecânicos do cabo nas torres, uma vez que a seção aerodinâmica resistente (arrasto) do cabo permanece a mesma (8 e 9), embora a densidade linear (massa/comprimento) ser maior e refletir em maiores cargas verticais que merece ser avaliada estruturalmente. Houve ganhos significativos nos gradientes de campo elétrico na superfície do condutor, reduzindo seus efeitos associados (corona, RIV, TVI, etc.), e podendo reduzir a faixa de servidão e segurança das linhas. Entretanto, conforme observado nas referências (8 e 9), este benefício tem que ser melhor avaliado, uma vez que algumas pequenas imperfeições na superfície do condutor, como arranhões resultantes do processo de fabricação e montagem dos cabos condutores podem reduzir ou mesmo eliminar este ganho. Na referência (8) foi feita uma análise da capacidade térmica do condutor onde foi feita uma mudança na consideração do diâmetro externo do condutor para cálculo térmico de capacidade. Esta modificação foi considerada válida na referência, mas que necessita de maiores avaliações. Na referência (10), é mostrado um outro conceito térmico a respeito dos condutores que não encerra a discussão sobre o assunto. A respeito da possível redução do coeficiente de arrasto, a mesma observação deve ser feita. Apesar que existem referências desta possibilidade (11), existe a necessidade de mais estudos e pesquisas para afirmar que o condutor compacto tem um coeficiente Cd menor, que inclusive pode ser maior como foi verificado em alguns ensaios feitos na pesquisa (P&D), além de critérios, procedimentos e normas para estes estudos. Sobre o parâmetro vibração eólica, embora haja um indicativo de melhora do condutor compacto em relação ao tradicional (9 e 11), este parâmetro também merece mais estudos, uma vez que os resultados são indicativos e preliminares, sendo



necessários mais dados de monitoramento em campo, ensaios em laboratório, simulações, etc., já que o fenômeno vibração eólica é um fenômeno altamente não linear, complexo e com muitas variáveis que interferem (11). Inclui a questão da resistência a fadiga não foi trabalhada nesta pesquisa e/ou a questão não foi fechada, apesar de pesquisas indicarem comportamento similar a condutores convencionais (11). O comportamento físico/estático dos cabos compactos em alta temperatura pode ter diferença em relação aos cabos de formato convencional, uma vez que pode alterar o joelho da curva gráfica (knee point) da flecha em relação à temperatura, em função do contato da alma de aço com as coroas de alumínio ser um contato diferente (formato dos fios diferentes), como pode ser visto na Figura 1 adiante.

Do ponto de vista de instalação, nenhuma dificuldade adicional foi encontrada em campo. O cabo condutor é relativamente fácil de manusear e nenhum custo adicional ou risco deve ser imputado ao cabo condutor compacto no processo de instalação/montagem/lançamento.

Na Manutenção, as mesmas considerações/observações feitas no item 2.1 valem para este cabo. A princípio, não parece que os cabos de formação/construção compacta são menos confiáveis que os cabos convencionais, até porque os resultados de ensaios mecânicos são bem próximos aos demais tipos de cabo (8 e 9). Os cabos compactos, ao contrário dos cabos liga TAL, são identificáveis visualmente suas diferenças que está no formato dos fios de alumínio.

Por último, a análise financeira de viabilidade de uso dos cabos condutores compactos devem levar em conta que o cabo condutor compacto é de 10 a 15% mais caro que um cabo convencional de fios de alumínio redondos. Isso deve ser considerado juntamente com as simulações elétricas, mecânicas/estruturais e eletromecânicas, e se será uma linha totalmente nova ou recapitada. A consideração de regulação e perdas deve ser contundentemente analisada e calculada, além de questões de manutenção, para que o menor valor presente líquido seja levado em conta no momento da decisão de instalação destes cabos.

Todas as considerações técnicas e econômicas, a princípio, são válidas para os cabos compactos de formato diferente do trapezoidal, como inclusive já foi instalado na Cemig o cabo Aero-Z®.

2.3 Utilização do cabo condutor tipo Gap (GZTACSR): aplicações, problemas e soluções

O cabo condutor GZTACSR, popularmente chamado de Gap, começou a ser estudado na Cemig no início dos anos 2000, quando foi aprovado um projeto de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) do programa da ANEEL, e foi instalado no ano de 2008 na LD2 Barreiro 1-BH Bonsucesso, 138kV (12). Dentro do projeto, foram avaliadas algumas tecnologias de cabos condutores disponíveis na época, assim como a seleção de uma linha adequada para esta aplicação, que no caso foi a LD2 Barreiro 1-BH Bonsucesso e a bitola adequada para aplicação, no caso 300MVA de potência necessária.

Para atender a demanda de carga na linha escolhida, foram pensadas em duas tecnologias de cabos a altas temperaturas e baixa flecha: ZTACIR – cabo com alumínio ZTAL e alma de liga especial (Fe-Ni) invariável, e GZTACSR – cabo com alumínio ZTAL e gap (graxa para altas temperaturas) entre os fios de alumínio e a alma de aço, com os fios de alumínio em formato trapezoidal (TW). Estas tecnologias partem do princípio que a altas temperaturas somente a alma será responsável pela sustentação mecânica do cabo, já que o coeficiente de dilatação térmica linear do aço é a metade do alumínio (7). A Figura 1 mostra esquematicamente como trabalham estes cabos em termos de temperatura e flecha. No caso, para definir qual a tecnologia e bitola do cabo, seria necessário verificar o diâmetro total do cabo devido às cargas nas estruturas, capacidade (temperatura de operação), disponibilidade de bitola e custo. O cabo ZTACIR alcança temperaturas maiores (até 210°C contra 190°C do GZTACSR), porém apresentava como desvantagem o custo maior e a indisponibilidade de bitola adequada, que não poderia ser maior que a do Hawk, cabo existente na LD2 Barreiro 1-BH Bonsucesso. A linha escolhida foi LT2 Barreiro-Bonsucesso, de 2,1km de extensão e circuito duplo (com excessão dos vão de chegada nas SEs), originalmente com cabo condutor CAA Hawk (477MCM, seção 281,14mm² e diâmetro 21,8mm) que possui um corredor altamente demandado por carga, já que a SE Barreiro é de transmissão (345kV) e a SE Bonsucesso é um importante hub de distribuição da Cemig. Para atender a demanda das LTs e circuitos, o cabo condutor deveria ser capaz de transportar 300MVA ou seja 1255A, temperatura de operação de 170°C. O cabo foi plotado para esta temperatura, mas não opera nesta temperatura devido a limitações de carregamento dos equipamentos terminais nas SEs. O cabo dimensionado foi o GZTACSR 240mm², com diâmetro 20,6mm, 88,5KN de RMC e área de seção transversal 279,6 mm². Para cálculo da tabela de esticamento a condição regente para critério de cálculo foi EDS de 20% da C.R. (RMC), com excessão dos tramos de chegada das SEs onde utilizou-se o esticamento reduzido devido a limitações de carregamento mecânico dos pórticos.

A análise de engenharia e gestão de ativos para esta utilização é muito similar às anteriores, uma vez que utilizou a tecnologia existente de cabo termorresistente e fios de alumínio em formato trapezoidal (compacto). A diferença, neste caso, é que entre a alma de aço e os fios de alumínio existe um “gap” preenchido com uma graxa especial a base de silicone. Isso faz com que algumas considerações a mais devam ser feitas na instalação e na manutenção deste cabo.

Do ponto de vista de planejamento e engenharia de expansão, o cabo atende e atendeu a uma aplicação específica, onde foi praticamente dobrada a capacidade de transporte da linha, já que nesta tecnologia é possível haver uma mitigação da flecha do cabo, fato que, a princípio, não era possível com as tecnologias anteriormente citadas neste IT (Figura 1). Os custos de aquisição, comparado ao custo de um cabo convencional (ACSR), superou 200% (três vezes), incluindo a consultoria/treinamento de instalação do cabo pelo fabricante. Uma dificuldade que foi encontrada em projeto foi que este cabo precisa de ter parâmetros diferenciados da tensão-deformação para o cálculo das tenções e flechas, e conseqüentemente, a plotação. Hoje, os fabricantes disponibilizam os arquivos para os cálculos com o software mais utilizado hoje no projeto de linhas aéreas (PLS-CADD). Uma limitação de aplicação deste cabo em projeto está no fato de haver uma limitação do comprimento dos tramos (seções de ancoragem).

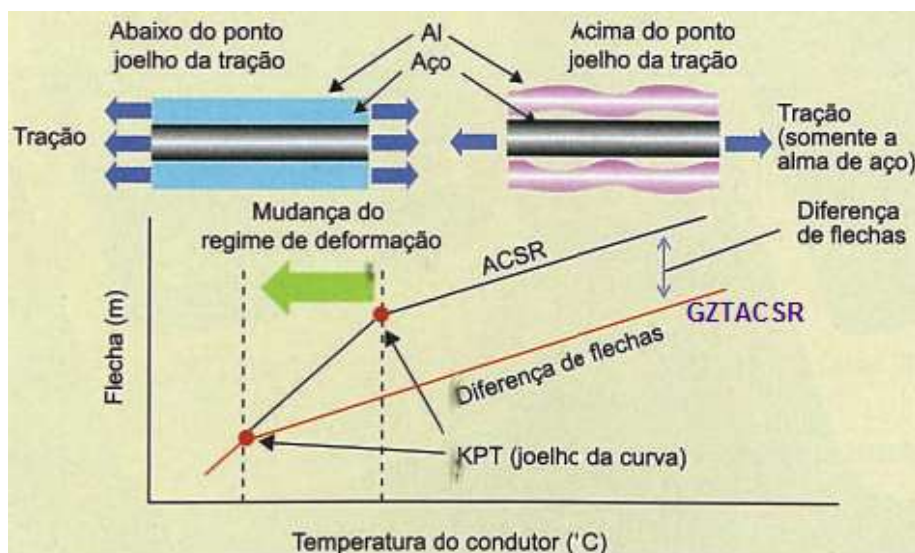


FIGURA 1 – Representação esquemática da relação da temperatura x flecha em cabos a altas temperaturas

Como este cabo condutor foi importado, gerou-se um atraso na entrega do material para a instalação na obra, fato comum devido a questões alfandegárias, transporte, etc. Na instalação, o cabo Gap (GZTACSR) teve algumas particularidades, onde, inclusive, foi necessária a presença de instrutores do fabricante do cabo. Aí surgiram os primeiros problemas de tradução e comunicação, uma vez que eles não falavam português e nem mesmo o manual foi disponibilizado no idioma local, gerando dificuldades. No manuseio do cabo, um aspecto importante de atenção e dificultador, como a alma de aço “desliza” dentro do condutor é importante ter um cuidado adicional para que não haja este deslizamento no momento do manuseio do cabo condutor. Outro aspecto importante de instalação, é que este cabo tem que ser regulado/tensionado nas trações e flechas de projeto pela alma de aço, para que o apresentado na Figura 1 aconteça. Isso gera um problema adicional, pois a alma é recoberta pela graxa, o que gera muita sujeira. Outro problema é no grampeamento do cabo, pois o aço e o alumínio não poderiam ser fixados logo na sequência. Assim, optou-se por fazer o grampeamento junto ao ponto de ataque do grampo (mísula no alto da torre) e também o lançamento tensionado aéreo com conjunto guincho (puller-freio). Mais detalhes desta instalação pode ser visto na Figura 2. Outra atenção deve-se ter nas seções de tensionamento (distância entre praças), pois há uma limitação devido ao tensionamento nas camadas de alumínio. Contudo, estes procedimentos geram custos extras de instalação, de prazos maiores para execução, além de riscos de saúde e segurança para a força de trabalho e para terceiros. Outro problema na instalação deste cabo está na emenda, pois é necessário uma série de cuidados semelhante ao processo de grampeamento na ancoragem do cabo. Isso gera atrasos e limitações no momento da elaboração do plano de lançamento. Neste projeto, especificamente, não foi necessário a aplicação de emendas. Outra particularidade do cabo GZTACSR (Gap) é que as ferragens de ataque (grampos e emendas) são diferenciadas. Assim, a

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Cemig optou por não comprar do fabricante junto com o cabo, devido ao custo elevado, e partir para um desenvolvimento nacional (12). Em linhas gerais, como já dito anteriormente, tudo que foge muito ao padrão existente está mais susceptível a erros na construção e montagem das linhas, o que exige uma boa gestão e planejamento das atividades.

Sobre as questões de O&M, as mesmas considerações citadas anteriormente, sobretudo dos itens 2.1 e 2.2 são válidas para este caso do condutor tipo Gap. Uma avaliação adicional deve ser feita a respeito da graxa aplicada sobre a alma de aço. Esta graxa pode ser muito útil para a proteção do cabo contra a corrosão, e melhorar o comportamento dinâmico de auto amortecimento do cabo. Entretanto, não se sabe qual a durabilidade ou vida útil desta graxa. Portanto, os custos de O&M deste cabo são bem maiores aos convencionais, quando da necessidade de alguma intervenção neste cabo. Contudo, nas análises e estudos feitos não foi verificada perda ou menor confiabilidade deste tipo de cabo em relação aos cabos convencionais ACSR (ou em português CAA).



FIGURA 2 – Detalhes da instalação do cabo GZTACSR – Grampeamento

2.4 Utilização do cabo condutor tipo ACCC (ou ACCR): aplicações, problemas e soluções

Os cabos condutores com alma de material compósito, que vem tendo a denominação de ACCC (Aluminum Conductor Composite Core) ou ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced), foram instalados recentemente na Cemig como sendo a última e mais recente tecnologia para cabos de alta capacidade de transporte de energia. Seu princípio de funcionamento é muito semelhante ao cabo GZTACSR baseado no princípio que a altas temperaturas a alma suporta todo o condutor estruturalmente/mecanicamente (Figura 1). Sendo esta alma de um material que tem propriedade de baixa dilatação térmica linear, baixa fluência (creep), elevada resistência mecânica e baixo peso, estes cabos apresentam uma flecha menor a altas temperaturas, temperatura esta que depende do joelho (knee point) da curva temperatura x flecha, em relação aos cabos ACSR ou mesmo os cabos GZTACSR e ZTACIR que também foram desenvolvidos para mitigar o problema de flechas a altas temperaturas. Existem algumas particularidades em relação a alma de compósito

que pode ser um fio único ou vários fios, de arranjos e materiais diferentes (compósito de matriz cerâmica, polimérica, etc.). O alumínio também pode ser de alumínio termorresistente, como descrito nas seções anteriores, ou de alumínio recozido (anelling em inglês) que, por já ser recozido, não sofre alterações/perdas de resistência mecânica e tem menor resistividade elétrica em média (63% IACS, contra 61% IACS do alumínio 1350).

A primeira aplicação do cabo condutor com alma de compósito feita na Cemig iniciou-se no ano de 2014 com a implantação das LDs LD2 Barreiro 1-Nova Lima 1 e BH Bonsucesso-Sabará 1, ambas em 138kV, em quase toda a sua extensão em circuito duplo. Tratou-se de uma recapacitação com troca de condutor, rearranjo de linhas e aproveitamento de estruturas em circuito duplo. Posteriormente a LD2 Barreiro-Nova Lima 1 foi seccionada para a entrada da SE Nova Lima 7, mas isso é indiferente para o assunto em questão. Coincidentemente, na saída da SE Barreiro, a LD2 Barreiro-Nova Lima 1 divide as mesmas torres em circuito duplo em 3 vãos com a LD2 Barreiro-Bonsucesso, onde foram instalados o cabo GZTACSR. A definição do cabo condutor a ser instalado nestas LDs deveriam ter as seguintes premissas:

- Ter as mesmas características dimensionais (diâmetro externo) do cabo condutor a ser substituído, cabo Linnet 336MCM, para não impactar a linha estruturalmente e ter que trocar/reforçar as torres e/ou fundações da LD existente;
- Ser capaz de trabalhar em temperatura de operação superior a 100°C sem que haja alterações significativas na plotação do cabo a ser substituído;
- Como a Cemig é uma empresa de economia mista, ela é obrigada a fazer licitações para aquisição de bens e serviços. Assim, o cabo a ser utilizado deveria ter o menor preço de mercado.

Para atender aos requisitos acima, foi feita uma especificação técnica para licitação na qual o cabo a ser adquirido deveria atender, sendo obrigatória a inspeção em fábrica e laboratório onde todos os ensaios de tipo e rotina deveriam ser feitos e aprovados pela inspeção. O cabo vencedor da licitação foi um cabo ACCC Linnet de alumínio recozido, com a alma de compósito de fibra de carbono envolto em fibra de vidro em um fio único. Na Tabela 1 abaixo é mostrado dados comparativos das principais características/parâmetros técnicos entre o cabo ACSR convencional (Linnet) e ACCC Linnet utilizado neste empreendimento.

TABELA 1 – Dados básicos comparativos entre Linnet convencional e Linnet com alma de compósito (ACCC)

CARACTERÍSTICA/PARÂMETRO	ACSR LINNET	ACCC LINNET
Seção transversal de alumínio (mm ²)	170,56	218,1
Seção transversal do condutor (mm ²)	198,4	245,9
Diâmetro do condutor (mm)	18,31	18,29
Massa aproximada (kg/km)	689,9	655
Resistência elétrica máxima CA 60Hz 75°C (Ohm/km)	0,203	0,156
Carga de ruptura ou RMC (KN)	62,88	72,5 (abaixo do kneepoint)
Coefficiente de dilatação térmica Linear (°C ⁻¹)	18,9 x 10 ⁻⁶	0,2 x 10 ⁻⁶ (abaixo do kneepoint)
Módulo de Elasticidade Final (GPa)	74,5	60,8 (abaixo do kneepoint)

Como as linhas originais tinham potência de 95MVA e houve a necessidade de recapacitação para 220MVA, ou seja mais que o dobro da potência de recapacitação, foram inseridas ou trocadas 15 torres, necessário transformar 03 estruturas de suspensão em semi-ancoragem (ancoragem suspensa) e fazer a raspagem do terreno em uma torre.

Em termos de planejamento/projeto de expansão, a aplicação do cabo ACCC neste empreendimento foi bem sucedida, uma vez que foram necessárias fazer pequenas alterações estruturais na linha, como informado anteriormente, até porque os dados técnicos comparativos mostram a inequívoca superioridade e capacidade do cabo ACCC. Na tensão de esticamento, a condição regente para cálculo foi o EDS de 18,5% da carga de ruptura (condição final, 20°C, sem vento) para não haver grandes alterações estruturais na LD. A temperatura de plotação do cabo condutor foi de 132°C na LD2 Barreiro-Nova Lima 1 e de 157°C na LD Bonsucesso-Sabará. Foram adquiridos, inicialmente, 80.970 metros de cabo ACCC Linnet para as duas linhas, e neste caso foi adquirido em conjunto na mesma licitação as ferragens e acessórios específico para este cabo (grampos de ancoragem, emendas total, reparos preformado, amortecedores stockbridge, etc.). A diferença de preço/custo de aquisição do cabo ACCC Linnet em relação ao ACSR Linnet ficou em torno de seis vezes, levando em conta que as ferragens e acessórios foram adquiridas junto com o cabo ACCC Linnet. No estudo de viabilidade não foi considerada outra alternativa utilizando cabo condutor convencional ACSR, e o valor orçado, referência no ano de 2012, foi de R\$ 12,7 milhões, aproximadamente, de valor global. Nas próximas seções será feita uma avaliação de custos levando em conta as ocorrências que tiveram na construção das linhas e instalação do cabo.

A análise de instalação teve uma série de particularidades e problemas. O primeiro deles, como o cabo, apesar de não ter sido importado no momento da compra, tem a sua principal tecnologia desenvolvida no exterior.



Portanto, tanto a confecção do manual de instalação quanto o instrutor de instalação não eram brasileiros. O manual foi disponibilizado no idioma português local, mas com uma má qualidade de tradução. O instrutor não falava português local, mas não houve grande dificuldades ou maiores problemas em relação a isso, embora a qualidade do treinamento teve alguma perda. O fornecedor do cabo no caso, fez exigências de que todos os profissionais de instalação deveriam ser treinados e atrelou a garantia do cabo a esta particularidade. Isso foi um grande dificultador, uma vez que a rotatividade de pessoal de construção em campo é grande. A grande dificuldade na instalação do cabo ACCC é que ele tem pouca flexibilidade de montagem e instalação, principalmente quanto a espaço, já que ele tem limitações de flexão (ângulos de lançamento) e no raio de curvatura. Essa limitação é bem parecida à dos cabos OPGW, onde há risco de quebra da fibra. Inclusive as ferramentas para manusear o cabo ACCC são praticamente as mesmas para o cabo OPGW. Portanto, o lançamento deste cabo deve obrigatoriamente ser feito tensionado com conjunto puller/freio e há de se ter cuidados com os ângulos de ataque no lançamento, inclusive na praça de bobinas. Outra particularidade está na execução de grampeamento e emendas deste cabo. O grampeamento pode ser feito no chão, mas deve-se preservar as distâncias e particularidade quanto a flexão do cabo. Diante disso, praticamente todos os grampeamentos foram feitos no alto da torre, semelhante ao que foi feito para o cabo GZTACSR (Figura 2), o que gerou grande dificuldade e riscos adicionais para saúde e segurança da força de trabalho. Isso gerou uma demanda de tempo muito maior para instalação do cabo, além dos custos que deveriam ser computados. Outro grande problema foi o fato deste cabo usar o alumínio recozido. Este alumínio tem resistência mecânica inferior ao alumínio convencional devido ao tratamento térmico de recozimento, que gerou arranhões, deformações em alguns pontos, engaiolamento, etc. O fato deste alumínio não ter praticamente nenhuma função na resistência mecânica do cabo, mesmo a temperatura ambiente, faz com que haja um maior compromisso mecânico/estrutural da alma de compósito, exigindo ainda mais cuidados de manuseio e instalação. A alma de compósito tem enorme resistência mecânica, muito maior que o aço inclusive, mas na direção axial (tração), devido ao fato deste material ser anisotrópico. Assim, a flexão pode gerar rompimento da alma deste cabo, que no caso inclusive aconteceu. Houve nesta obra, ao todo, três rompimentos de cabo durante o lançamento, na avaliação do fabricante por falhas na instalação do cabo, o que levou a grandes perdas de cabo, uma vez que o cabo quando vai ao chão deve ser inutilizado, por orientação do fabricante. Diante disso, a equipe de montagem da empresa contratada pela Cemig se recusou a trabalhar com este cabo, exercendo seu direito de recusa conforme NR 10, alegando riscos para a saúde e segurança da equipe de instalação. Assim, a Cemig desenvolveu um enorme esforço para terminar a obra com equipe própria de montadores. Além disso, foi necessário realizar novos treinamentos técnico.

Outro grande problema que houve nessa obra foi o furto de cabo. Foram mais de cinco furtos de cabo no decorrer da obra. Mesmo após a energização da LD com tensão em 138kV e depois em 13,8kV, houveram furtos de cabo. Embora isso não tenha relação direta com a tecnologia construtiva do cabo, uma vez que o furto de cabo acontece também com cabos convencionais, mas como o alumínio deste cabo é bem mais macio e maleável (alumínio recozido) foi bem fácil de separá-lo da alma de compósito, transportá-lo e facilitou muito o trabalho dos ladrões. A Figura 3 mostra alguns destes detalhes.

A análise de O&M é muito semelhante às feitas para os casos anteriores. A particularidade, no caso deste cabo ACCC, é em relação a vida útil da alma de compósito. Os compósitos de matriz polimérica podem sofrer com intemperes (os polímeros são susceptíveis a intemperes), embora a alma é bem protegida pelo alumínio. Outra dúvida é em relação aos efeitos elétricos sobre estes materiais, como erosões, arborescência, etc. Pouco se sabe a respeito disso. Contudo, uma LD ou LT com um cabo altamente carregado passa a ter mais importância para o sistema, e quando acontece uma falha, como um rompimento por exemplo, certamente demandará mais tempo para recomposição/manutenção/reparo, já que o cabo necessita de cuidados especiais, equipe treinada, quantidade adequada de reserva técnica (o cabo ACCC não pode ser emendado ou ancorado em qualquer lugar), etc.

Uma reflexão a ser feita sobre este projeto especificamente, é em relação aos custos de projeto (aquisição) e ao custo efetivo da obra executiva. Esta obra com cabo ACCC foi orçada em R\$ 12,7 milhões. Se a obra fosse feita com cabos convencionais ACSR convencional, o custo estimado seria de, aproximadamente, R\$ 13,7 milhões. Porém, como houve muitas perdas de cabo devido a rompimentos e roubos (aproximadamente 25% da quantidade inicial adquirida), retrabalhos, além do atraso de mais de um ano para compra do cabo com incidência de JOA (Juros sobre obra em andamento), a obra foi capitalizada com R\$ 15,6 milhões. Ou seja, a obra poderia ter sido mais barata usando cabos ACSR, embora o problema de roubo poderia ter ocorrido com cabos ACSR da mesma forma.

3.0 - CONCLUSÃO

É cada vez maior a necessidade e uso de cabos condutores especiais, sobretudo cabos com alta capacidade de condução. Entretanto, uma análise detalhada deve ser feita, levando em conta todos os custos e riscos ao longo

da vida útil da linha, pois os custos durante a instalação/montagem, ou mesmo de O&M, podem levar a grandes prejuízos para a concessionária ao longo do tempo. Sempre quando de um novo projeto de linha ou sua recapacitação, é sempre bom fazer uma análise mecânica/estrutural, plotação eletromecânica, elétrica (perdas e regulação) e custos (aquisição, instalação, reservas técnica, prazos, etc.) para saber qual cabo condutor dará o menor VPL (valor presente líquido) e menores riscos. É nítida a evolução dos cabos condutores no tocante a projeto e materiais dos cabos condutores. É natural que esta evolução continue e cabe os engenheiros de linha avaliar a melhor solução técnica para cada linha especificamente, ao longo de todo tempo de operação.



Grampeamento no alto da torre



Passagem do cabo já grampeado pela bandola



Alma de compósito após o furto de cabos



FIGURA 3 – Detalhes e algumas particularidade de instalação do cabo ACCC

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ROSOLEM, J.B. et al. Optical system for broadband data transmission concomitant to monitoring the physical integrity of conductors in overhead transmission lines. In: CIGRÉ 2018, 21, rue d'Artois, F-75008 PARIS - B2-101, 2018, Paris-FR, Anais...2018, p. 1-9.
- (2) KWIK ALLAN, S e DELGADO ÁLVAREZ, J.M. A new experience of Optical Phase Conductor (OPPC) in Red Eléctrica de España. In: CIGRÉ 2014, 21, rue d'Artois, F-75008 PARIS, D2-109, 2014 Paris-FR, Anais...2014, p. 1-15.
- (3) BRAGA, G.E. AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL E GESTÃO DOS ATIVOS FUNDAÇÕES METÁLICAS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DEVIDO A CORROSÃO. 2016. 202 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Engenharia de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2016.
- (4) NASCIMENTO, C. A. M., Metodologia experimental para utilização de cabos termorresistentes (TAL) em linhas e redes de distribuição. 1999. 85 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 1999.
- (5) NASCIMENTO, C. A. M. et al. AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE LINHAS AÉREAS, UTILIZANDO CABO CAA DE LIGA DE ALUMÍNIO TERMORRESISTENTE (TAL). In: XV SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu-PR-Brasil, 1999.
- (6) NASCIMENTO, C. A. M. et al. Aplicação de tecnologias e monitoramento em tempo real para aumentar a capacidade transmissão em LTs aéreas. XVI SNTPEE, GLT/004, Campinas, out.2001.
- (7) Working Group B2.26. Guide for Qualifying High Temperature Conductors for Use on Overhead Transmission Lines. Technical Brochure 426. Cigrè, Paris, 2010. ISBN: 978-2-85873-114-5
- (8) MIRANDA, G.C. et al. O ESTADO DA ARTE NA APLICAÇÃO DE CONDUTORES COMPACTOS EM PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO – ASPECTOS MECÂNICOS E ELÉTRICOS PARA O NOVO MODELO DESENVOLVIDO NO BRASIL. In: XIII SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba-PR-Brasil, 2005.
- (9) GIUDICE, E. B. F.; NASCIMENTO, C.A M; GUIMARÃES, G. E.; BRAGA, G. E.; CAMPOS, O. F.; MIRANDA, G.C.; SALDANHA, J. O. P.; UEDA, S. M. Desenvolvimento de Condutores Compactos Aplicados a Linhas Aéreas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - XVII SNTPEE. Uberlandia, 2003.

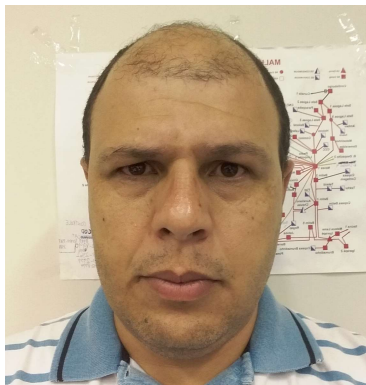
(10) GAUDRY, M. et al. INCREASING HTE AMPACITY OF OVERHEAD LINES USING HOMOGENEOUS COMPACT CONDUCTORS. In: Cigré Session 1998, 22-201, Paris-FR, Anais...1998, p. 1-7.

(11) BERNARDEZ, L.L. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA EM FUNÇÃO DE SUA GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO. 2015. 163 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2015.

(12) FURTADO, T. A. et al. Diagnóstico do estado da arte em vibração eólica de linhas aéreas de transmissão. SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2003.

(13) BRAGA, G. E.; NASCIMENTO, C. A. M.; FILHO, E. B. G.; NOGUEIRA, P. J. C.; MOTTA, I. L. M.; NOGUEIRA, C. H. S.; MIRANDA, G. C. Recapacitação com emprego de cabos de altas temperaturas. Eletricidade Moderna, v. 40, p. 216-224, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em Engenharia Industrial Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG (2000), Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG(2008) e doutorado em engenharia de materiais pela REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP, CETEC e UEMG). Desde 2002 é engenheiro da CEMIG, e atualmente é engenheiro mecânico de empreendimentos. Tem experiência na área de projetos, obras, educação, tecnologia, inovação, gestão de projetos, engenharia mecânica, sistema elétrico de potência, manutenção, gestão de ativos e estruturas, com ênfase em comportamento mecânico de materiais, análise e seleção de materiais e projeto mecânico, atuando principalmente nos seguintes temas: Projetos, análises e estudos de cabos, energia elétrica, projeto eletromecânico de linhas de transmissão, fiscalização de obras, manutenção em linha viva, análise e especificação técnica de fornecimento de materiais e serviços, módulo de elasticidade, cálculos mecânicos, carregamento elétrico de linhas, análise de falhas, vibrações, fadiga, ensaios não destrutivos, inspeção, corrosão, manutenção, estruturas, método dos elementos finitos, metalurgia, inovação, gestão de projetos, confiabilidade, gestão de ativos, etc.