



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos - GDS

Coordenação de isolamento integrada ao dimensionamento mecânico e custo de estruturas de linhas de transmissão

**ARTHUR L. ESTEVES DOS REIS(1); JOAO CLAVIO SALARI (1); LUIZ F. ESTRELLA JUNIOR(1);
CEPEL(1);**

RESUMO

Apresenta-se neste informe um processo computacional elaborado para a integração do estudo da coordenação de isolamento ao dimensionamento das torres de linhas de transmissão aéreas e ao cômputo dos custos de instalação e das perdas elétricas da linha. Este processo é sistemático, convergente, permite análises técnico-econômicas mais abrangentes de linhas de transmissão, além de considerar os limites térmicos e do campo eletromagnético junto à superfície dos condutores e os limites dos campos eletromagnético, ruído audível e radiointerferência próximos da superfície do solo.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Técnico-Econômica, Coordenação de Isolamento, Dimensionamento Mecânico, Linhas de Transmissão, Projeto Básico.

1.0 - INTRODUÇÃO

O emprego de linhas de transmissão aéreas (LT) é uma solução natural para a transmissão de grandes blocos de energia das fontes distantes aos centros de consumo. Para reduzir as inevitáveis perdas elétricas nos condutores, o nível de tensão deve ser o mais elevado possível, desde o patamar inicial em alta tensão até os atuais UAT (ultra-alta tensão). Por outro lado, níveis mais altos de tensão exigem maiores distâncias de isolamento, maiores espaçamentos, e maior faixa de passagem ao longo da rota da LT; portanto, exigem um maior custo de instalação da LT e um maior investimento em equipamentos.

Conseqüentemente, na fase de investigação da melhor solução para um específico sistema de transmissão, surge a necessidade de minimizar os custos do sistema e os impactos ambientais. Um exemplo é o desenvolvimento de linhas compactas otimizadas, com uma distância entre fases reduzida e com configurações de feixes de condutores não convencionais. Essa estratégia deve ser aliada a melhor topologia das fases da LT, estudando-se disposições das fases em formato horizontal, vertical ou em triângulo.

A compactação das fases da LT é interessante por dois fatores: i) torres mais estreitas exigem menos material estrutural (menos custosas) e tendem a proporcionar menores faixas de passagem da LT; ii) reduzidas distâncias entre fases possibilitam mais facilmente obter maiores valores da potência característica e, portanto, da capacidade de transmissão da LT, posto que com a compactação para um mesmo valor da potência característica os feixes de condutores podem ter dimensões menores (vide item 2.4).

Naturalmente que a adoção de uma determinada torre de transmissão precisa estar calcada nos critérios de coordenação dos isolamentos entre condutores e entre condutores e partes aterradas na estrutura, incluindo fenômenos à frequência industrial, surtos de manobra e surtos atmosféricos; e também em condicionamentos

mecânicos e estruturais, verificando-se a exposição da torre a diferentes condições meteorológicas, diferentes carregamentos mecânicos verticais, longitudinais e transversais, tanto em operação normal quanto em manutenção da LT. Além disso, os consequentes níveis de campo elétrico, campo magnético, radiointerferência e ruído audível gerados junto ao solo, associados às alturas cabo-solo adotadas, devem ser inferiores aos respectivos limites preconizados na Resolução ANEEL nº 616 e nas Normas de Projeto de Linhas de Transmissão.

Portanto, está-se diante da tarefa de integrar cálculos de coordenação de isolamento, esforços mecânicos na torre, otimização da geometria dos feixes de condutores, e custos de instalação e de perdas elétricas da LT. Os autores deste informe têm-se engajado neste desafio, de onde se desenvolveu um procedimento computacional que acopla diferentes programas computacionais para os cálculos supracitados. Trata-se de um procedimento sistematizado, iterativo, convergente, e que tem sido aplicado com êxito em diversos estudos recentes de LT em vários níveis de tensão.

2.0 - METODOLOGIA

A metodologia descrita a seguir foi implementada e incluída no sistema computacional ELEKTRA (1), o qual é aplicável a LT em corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), lançando-se mão de uma série de módulos auxiliares, que compõem algumas das necessárias etapas do projeto básico de LT. A seguir será feito um breve detalhamento dos procedimentos de cada um destes módulos.

2.1 Aquisição dos dados ambientais da LT

O programa AmbLT foi desenvolvido para o auxílio na aquisição de dados ambientais necessários para o projeto básico de LT – tais como as séries históricas de velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, pressão atmosférica, umidade do ar, frequência de precipitações e descargas atmosféricas, entre outros – confeccionadas a partir dos registros oriundos das estações meteorológicas, coletados ao longo dos anos, e disponibilizados por instituições de pesquisa nacionais, como INPE, INMET, IBGE etc.

As diretrizes para Projetos Básicos do ONS (2) orienta que: “os parâmetros meteorológicos, necessários às avaliações elétricas e mecânicas do projeto básico, devem ser determinados, preferencialmente, com base nas informações oriundas das estações meteorológicas disponíveis na área de implantação do empreendimento”. Porém, em fases preliminares de projeto, os dados históricos nacionais acima citados se apresentam como uma forma prática de se levantar os perfis climáticos ao longo do traçado da LT. A Figura 1 apresenta a interface gráfica desenvolvida, donde se pode notar na esquerda a informação dos dados desejados, no centro um mapa com a visão geral do aspecto analisado, e à direita um gráfico ao longo do traçado da LT, de onde se podem tirar os valores numéricos necessários para as demais etapas de projeto.

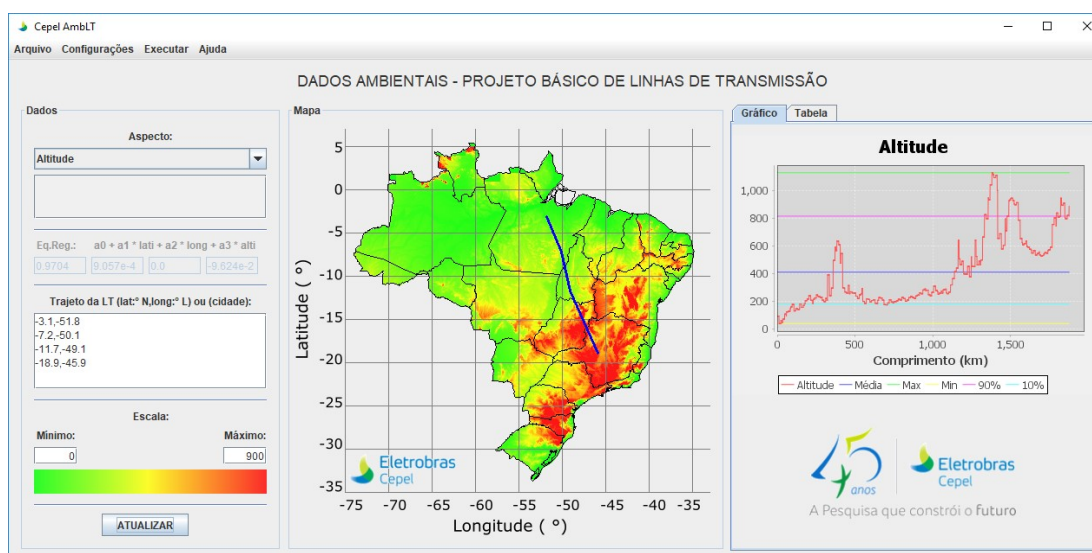


FIGURA 1 – Interface gráfica do programa AmbLT, módulo de aquisição de parâmetros ambientais da LT

2.2 Determinação das distâncias de isolamento e do desempenho da LT

O programa CISOL (3) é um software de auxílio no projeto básico de LT, focado no cálculo da Coordenação de Isolamento da LT, que, de maneira geral, envolve três estudos distintos, respectivamente associados às solicitações do isolamento quanto a frequência fundamental, a impulsos de manobra e a impulsos atmosféricos; além da especificação das distâncias mínimas de segurança das partes energizadas e aterradas, para, p.ex., manutenção em linha viva.

A interface gráfica do programa CISOL pode ser vista na Figura 2, exemplificando o dimensionamento de uma estrutura autoportante delta de uma torre em 500 kV. Essa é a etapa de projeto das torres da LT, e a partir de uma série de dados informados pelo usuário – tais como a seleção no banco de dados de torres típicas de linhas (autoportantes e estaiadas), isoladores (de vidro ou poliméricos), condutores (de fase e para-raios), disposição dos feixes de condutores (convencionais ou genéricos), dados ambientais, entre outros –, o programa CISOL calcula as distâncias mínimas de isolamento e os ângulos de balanço das cadeias nas torres, gerando um esboço das dimensões básicas do projeto da silhueta da parte superior da torre.

Numa outra função, aplicável a torres existentes, o programa CISOL permite calcular os desempenhos da LT para impulsos de manobra e atmosféricas, e desta forma verificar a adequacidade das torres da LT sob este ponto de vista.

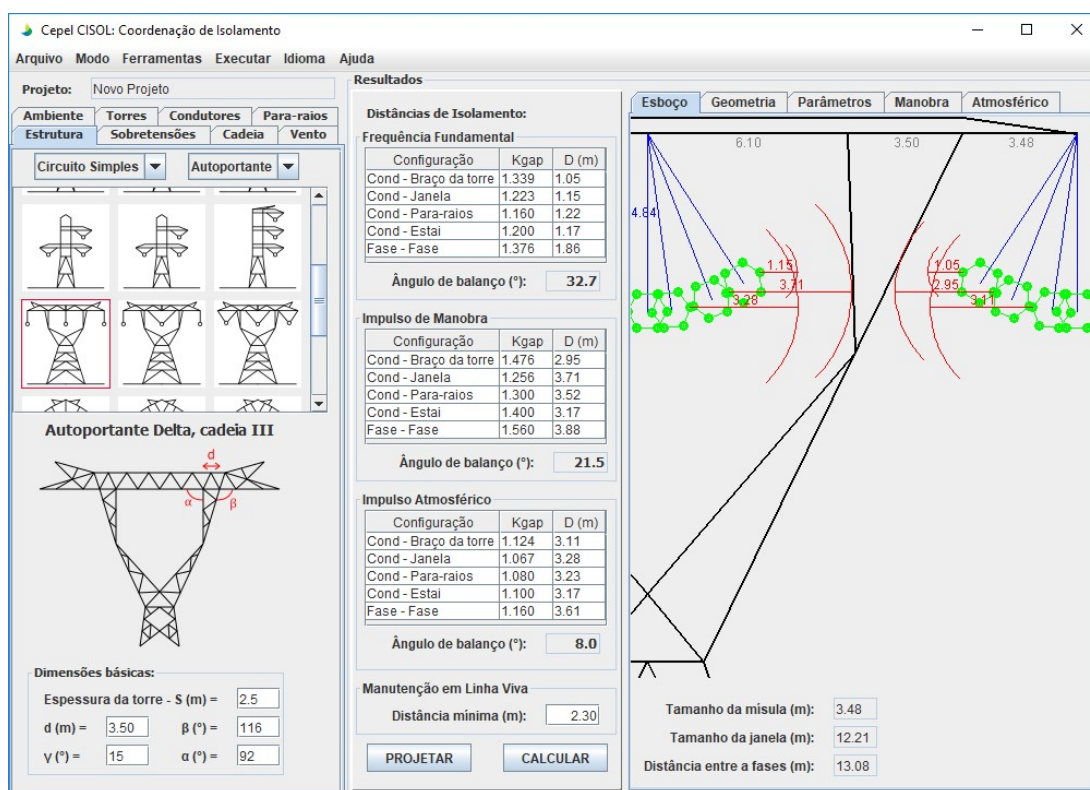


FIGURA 2 – Interface gráfica do programa CISOL, módulo de coordenação de isolamento

- Cálculo do desempenho da LT frente às sobreensões de manobra

As LT devem ser projetadas respeitando-se critérios de risco de falha no isolamento devido à sobreensões de frente lenta (ocasionados por impulsos de manobra). Os limites máximos de risco fase-terra (FT) e fase-fase (FF) estabelecidos de acordo com os Procedimentos de Rede (2) são, para manobras de energização: 10^{-3} (FT) e 10^{-2} (FF); e para religamento: 10^{-4} (FT) e 10^{-3} (FF).

A Figura 3 apresenta um fluxograma do método utilizado no processo de cálculo do risco de falha da LT devido à sobreensões de manobra e que foi incorporado diretamente no programa CISOL. O procedimento utiliza o conceito do Método de Monte Carlo, em que é realizado um número elevado de amostragens aleatórias para o cálculo da probabilidade. Em cada aplicação, caso a sobreensão seja maior do que a suportabilidade, contabiliza-se uma ocorrência de descarga. O risco final se resume ao número de descargas dentro do total de aplicações realizadas.

- Cálculo do desempenho da LT frente às sobretensões atmosféricas

Analogamente ao critério de desempenho da LT frente às sobretensões de manobra, devem ser realizados estudos estatísticos considerando a densidade de incidência de descargas atmosféricas na região, para que a LT observe a taxa máxima de desligamentos por descargas atmosféricas. Esta taxa é definida nos editais de leilão de transmissão como, p.ex., um desligamento por 100 km por ano, para LT com tensão nominal igual ou superior a 345 kV (2).

O programa DATMOS (4) realiza este cálculo, considerando a dispersão estatística de parâmetros importantes que caracterizam a incidência da descarga atmosférica na LT ou no solo próximo. São incluídas as distribuições de probabilidade do ângulo de incidência da descarga, do tempo de frente, da amplitude e da derivada no tempo da corrente da descarga atmosférica, assim como das impedâncias de onda dos sistemas de aterramentos das torres.

O cálculo pode ser feito tridimensionalmente, representando em detalhe os elementos que constituem as torres, cadeias de isoladores, cabos, sistemas de aterramento, e canal da descarga atmosférica; ou em duas dimensões, representando estes componentes por combinações de elementos típicos das análises de circuitos elétricos, tais como quadripolos representativos de linhas de transmissão, circuitos RLC etc. O programa DATMOS é acionado externamente pelo programa CISOL nesta etapa do cálculo da coordenação de isolamento da LT.

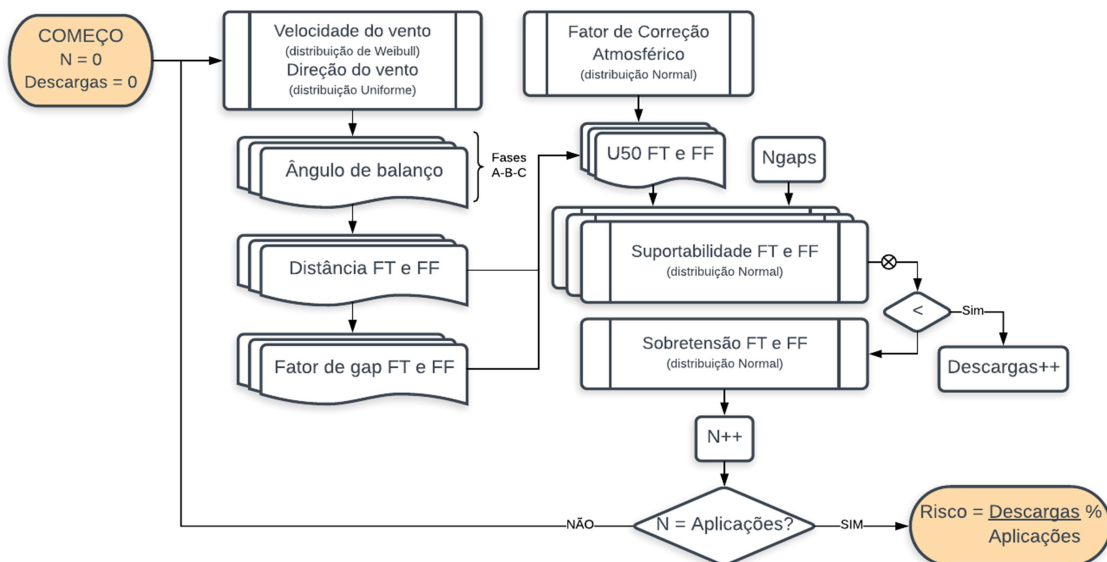


FIGURA 3 – Fluxograma do cálculo do risco de falha de LT frente a surtos de manobra

2.3 Dimensionamento mecânico da torre

Para o cômputo do custo de instalação médio de uma LT, interessa sobretudo o cálculo do peso das torres da LT. Uma análise estrutural rigorosa deve ser tridimensional e abarcar os esforços em todos os componentes da torre, em função das magnitudes e pontos de aplicação das forças longitudinais, transversais e verticais aplicadas à torre. Os resultados obtidos serão função, portanto, do tipo de torre, da altura da torre, do cabo condutor que é empregado, da tração neste cabo, etc. Este tipo de cálculo, implementado no programa SAD TLT (5), demanda grande esforço computacional e, mesmo para os computadores atuais, ainda é inviável de ser aplicado simultaneamente ao processo de seleção de condutores ou de configurações de LT pelo Sistema ELEKTRA.

Portanto, implementou-se um processo indireto, com uma fase inicial que parte de uma estimativa do peso médio das torres da LT em estudo, respectivamente gerando-se uma gama de condutores e quantidade de condutores por feixe que sejam potenciais ao estudo, assim como uma gama de distâncias básicas entre condutores de fases (ou polos) diferentes e entre condutores e solo. Dessa análise, resulta uma família de combinações de parâmetros da torre, em média um conjunto de dezenas a cerca de uma centena de configurações, que serão inicialmente analisadas individualmente pelo programa SAD-TLT. Este programa analisará os resultados obtidos para todos os casos e gerará equações de regressão linear a multivariáveis, sendo estas variáveis a distância horizontal entre o baricentro dos feixes e a fase (ou polo) mais afastada (f), a distância vertical entre este

baricentro e o solo (g), as forças vertical (V), longitudinal (L) e transversal (T) aplicadas à torre, além de combinações de produtos entre estas variáveis.

Essa equação, de cunho prático e preciso, é então utilizada pelo Sistema ELEKTRA para estimar os parâmetros da torre da LT em análise. Um exemplo para o cálculo do peso da torre (P_{EST}) é o seguinte:

$$P_{EST} = a_0 + a_1 f + a_2 g + a_3 V + a_4 L + a_5 T + a_6 L f + a_7 L g + a_8 T f \quad (1)$$

2.4 Otimização da geometria dos feixes de condutores

Para LT em corrente alternada (CA), a partir da teoria dos circuitos elétricos, para feixes de condutores circulares regulares, e desde que $D_{ffeq}/R_{eq} \gg 1$, tem-se que a potência característica (P_c) de uma LT trifásica é dada aproximadamente por:

$$P_c \cong \frac{1}{20} \cdot \frac{U_m^2}{\ln\left(\frac{D_{ffeq}}{R_{eq}}\right)} \quad (2)$$

sendo U_m a tensão fase-neutro, D_{ffeq} a "distância média equivalente entre fases" e R_{eq} o "raio médio equivalente do feixe de condutores das fases" da LT, sendo r o raio de cada condutor. Portanto, nessas condições, compactando-se a LT (reduzindo-se D_{ffeq}), ou expandindo-se os feixes (aumentando-se R_{eq}), aumenta-se a P_c da LT.

Para os feixes circulares e simétricos tradicionais, com n_s subcondutores por feixe, com espaçamento entre subcondutores igual a 18" (0,4572m) e igual entre as fases, este processo é obviamente bem definido. Entretanto, LT não convencionais, com feixes de condutores diferentes dos tradicionais, têm sido projetadas e construídas ao longo dos últimos anos, e estes feixes podem assumir diversas formas geométricas. Têm-se desde os feixes circulares expandidos, com espaçamento entre subcondutores aumentado (0,6m, 0,8m etc), com emprego para CA ou CC, até feixes com disposição dos subcondutores bem assimétrica, neste caso justificados somente para CA.

A definição robusta da posição espacial dos subcondutores nesses feixes assimétricos em CA advém de um laborioso emprego de rotinas de otimização específicas, que consideram funções objetivas não-lineares e restrições não-lineares de campo elétrico superficial nos condutores e restrições geométricas (p.ex., fixando-se um "retângulo" para localização genérica dos subcondutores de uma fase). Este processo foi implementado em programas computacionais no Cepel, sendo o programa computacional mais recente denominado FEIXE (6,7).

Uma visão mais robusta deste processo é fundamentada na teoria dos campos eletromagnéticos, onde o princípio da maximização da P_c consiste em posicionar-se os cabos dos feixes de condutores de modo a se buscar a igualdade de distribuição do campo elétrico ao redor da superfície de todos os condutores da LT (ditada pelo fator de utilização k_u) e este ao campo elétrico crítico condicionado pelo efeito corona (E_{cr}); ou seja, utilizar-se ao máximo a superfície de todos os condutores da LT, região em que a densidade de energia transmitida pela LT é maior. Portanto, têm-se:

$$P_c \cong \frac{1}{20} \cdot E_{cr} \cdot U_m \cdot n_s \cdot r \cdot k_u \quad (3)$$

Por conseguinte, conclui-se que P_c somente crescerá proporcionalmente a n_s se mantiver-se k_u elevado; caso contrário, haverá um efeito de "saturação" de P_c com o aumento de n_s , tal como ocorre com o emprego dos feixes circulares e simétricos tradicionais.

Como exemplo, para LT trifásicas com fases horizontais, elevando-se n_s , deverá migrar-se dos feixes circulares tradicionais para feixes circulares expandidos, então, para feixes elípticos diferenciados, e, finalmente, para feixes com geometria genérica, conforme se ilustra na Figura 4 (6).

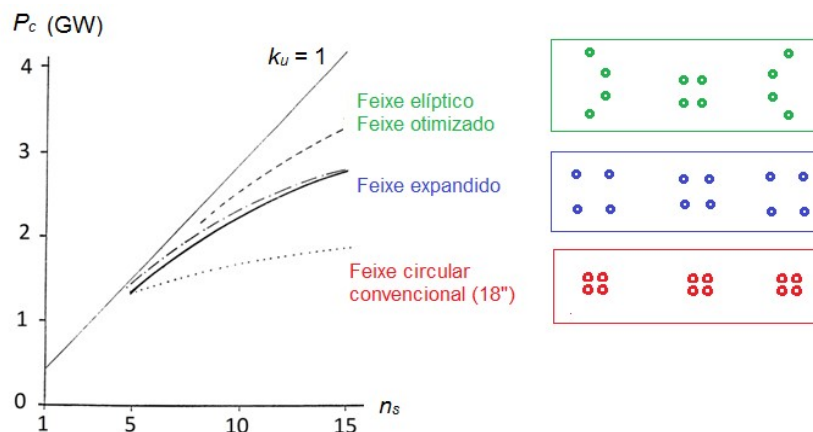


FIGURA 4. Exemplo de correlação entre a potência característica (P_c) e o número de subcondutores por feixe (n_s)

2.5 Custo da linha de transmissão

Naturalmente, é notória a grande quantidade de dados necessária ao cômputo do custo de uma LT, respectivamente vários dados de cabos condutores, cabos para-raios, cadeias de isoladores, estruturas, custos destes componentes da LT, dados ambientais, critérios de cálculos e parâmetros dos modelos de cálculo da LT, constituindo-se em um processo laborioso.

O Sistema ELEKTRA contempla banco de dados com tais elementos, incluindo custos customizados pelo usuário ou p.ex. os disponibilizados pela ANEEL (8), além de rotinas de cálculo dos diversos parâmetros envolvidos e segundo diferentes metodologias. Portanto, a partir de informações básicas fornecidas pelo usuário, pode-se rapidamente analisar várias configurações de LT e estimar-se o pré-projeto das configurações otimizadas (1).

2.6 Processo integrado implementado

Apresenta-se sumariamente na Figura 5 o diagrama de blocos do processo implementado, que mostra a interconexão entre os programas computacionais CISOL, FEIXE e SAD-TLT ao Sistema ELEKTRA

Partindo-se de estimativa, configuração existente, ou geometria obtida por cálculo aproximado, gera-se uma configuração inicial para as fases (ou polos, para LT em CC) da LT. Todo o processo será repetido para a gama de condutores selecionados para o estudo, considerando cabos de diversas configurações e bitolas possíveis.

Para cada configuração de LT composta pelo condutor e geometria dos feixes das fases (ou polos) selecionadas(os), têm-se as seguintes etapas principais:

- Faz-se o cálculo da coordenação de isolamento e determinam-se as distâncias de isolamento entre condutores e entre condutores e partes aterradas. A configuração é então atualizada.
- No caso de LT em CA: Faz-se a otimização da geometria dos feixes de condutores com vistas a se alcançar o valor da P_c (ou da reatância de sequência positiva) desejado. Se necessário, recalculam-se as distâncias de isolamento.
- Calculam-se as distâncias mínimas entre condutores e solo para o atendimento dos limites do campo eletromagnético junto ao solo e, se a faixa de passagem da LT não tiver sido fixada, esta é determinada.
- A configuração resultante é descartada se ela não atender aos critérios de máximos campo elétrico e temperatura na superfície dos condutores ou a qualquer outro condicionamento elétrico, mecânico ou térmico que tenha sido estabelecido.
- Conhecidas, portanto, as novas dimensões verticais e horizontais da torre, estimam-se os pesos da torre e de sua fundação.
- Faz-se os demais cálculos necessários ao cômputo dos custos de instalação e das perdas da LT.
- Retorna-se ao passo inicial se não houve convergência dos resultados; caso contrário, finaliza-se a análise.

3.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Trabalhos realizados nos últimos anos no Cepel apontaram a potencialidade de LPNE em 500 kV com feixes

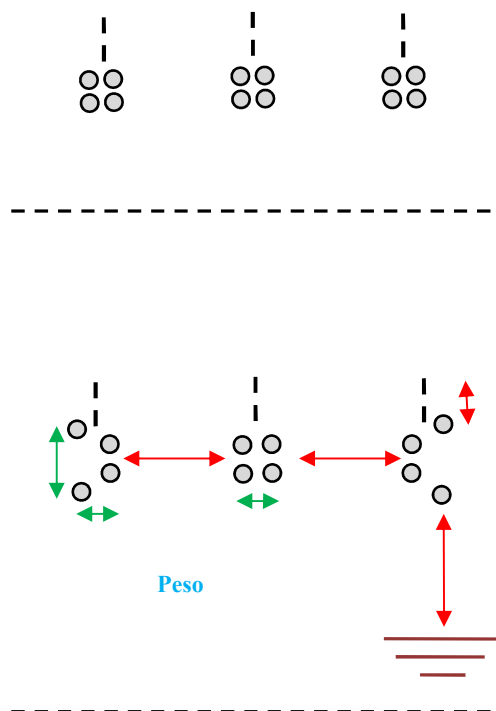
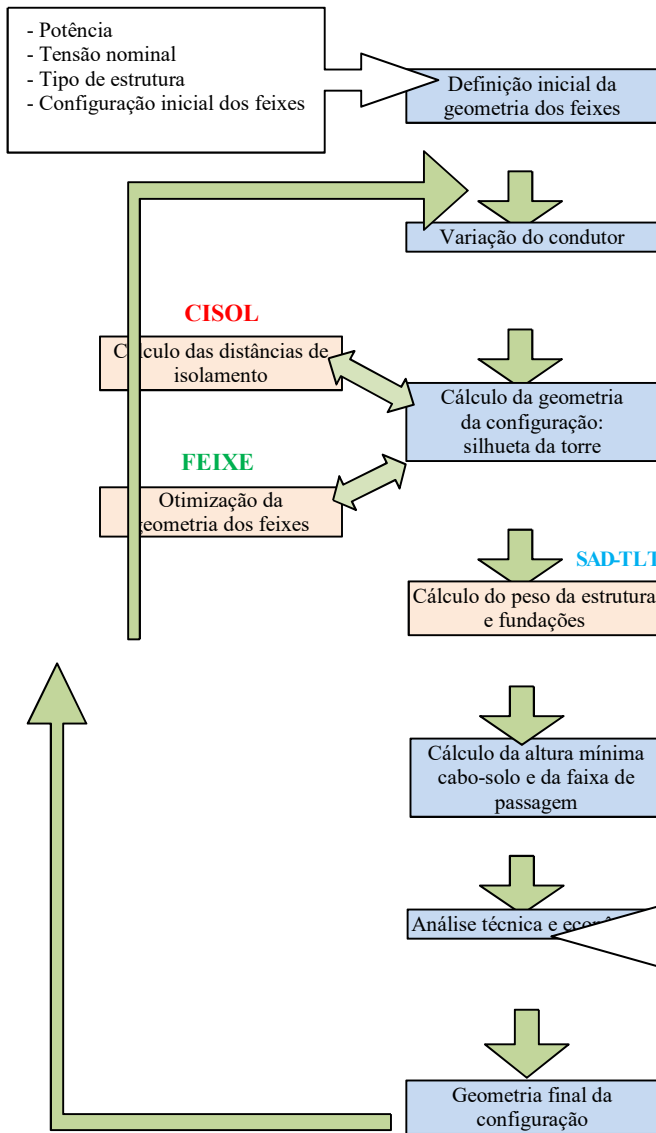
elípticos e expandidos com 4 e 6 subcondutores por fase, com distâncias entre fases reduzidas e torres estaiadas do tipo *cross-roped*, elevariam o patamar da potência característica destas linhas (P_c) para valores da ordem de 1450 MW e 1670 MW, respectivamente. Estas configurações foram planejadas pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e incluídas nos Relatórios R1 da Expansão das interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste (9).

Contudo, nos casos de ângulos de deflexão maiores ou orografia muito irregular no encaminhamento da LT, e de vãos muito extensos, estas torres estaiadas podem tornar-se inviáveis, além destas torres empregarem feixes de condutores com dimensões bem elevadas, situação em que se mais se adequam torres autoportantes.

Portanto, neste exemplo, para atingir-se o nível de P_c de 1670 MW, investigou-se a potencialidade de torres autoportantes do tipo "raquete" e "delta invertido" com feixes expandidos, pois tais torres permitem grande compactação das fases, e de torres autoportantes originalmente concebidas para circuito duplo porém operando como circuito simples, ou seja, dividindo-se cada fase em "dois circuitos" (Fase A = $a_1 + a_2$; Fase B = $b_1 + b_2$; e Fase C = $c_1 + c_2$), obtendo-se de outra forma o efeito de expansão do feixe mas com a grande vantagem de não necessariamente se utilizar feixes com dimensões muito elevadas.

No caso das torres originalmente para circuito duplo, investigaram-se duas topologias: (i) as tradicionais torres tronco piramidais com fases dispostas verticalmente; (ii) as torres do tipo "danúbio", as quais dispõem as fases em triângulo. Uma variante da topologia (ii) com as "fases" internas a_2 e b_1 empregando cadeias em "V" mostrou-se especialmente interessante, pois permite considerar maiores ângulos de deflexão da LT. Além disso, a topologia (ii) permite com maior facilidade as suas construções nas formas autoportante e estaiada.

Essas quatro alternativas estão ilustradas na Figura 6. A despeito dessas torres terem custo um pouco maior, por serem tipicamente mais pesadas do que as torres que têm disposição horizontal das fases, ou por utilizarem um número maior de cadeias de isoladores e mísulas, seu uso é justificado por proporcionarem configurações com P_c realmente elevada e tenderem a reduzir a relação (custo da linha)/(potência transmitida), além de soluções do tipo (a) e (b) já terem sido investigadas p.ex. em (10–13) e soluções dos tipos (c) e (d) para aplicações em circuito duplo já serem consagradas.



- Temperaturas e perdas elétricas dos condutores
- Campos interferentes
- Etc
- Custo das perdas
- Custos de instalação

FIGURA 5. Diagrama de blocos da integração entre os programas computacionais FEIXE, CISOL e SAD-TLT

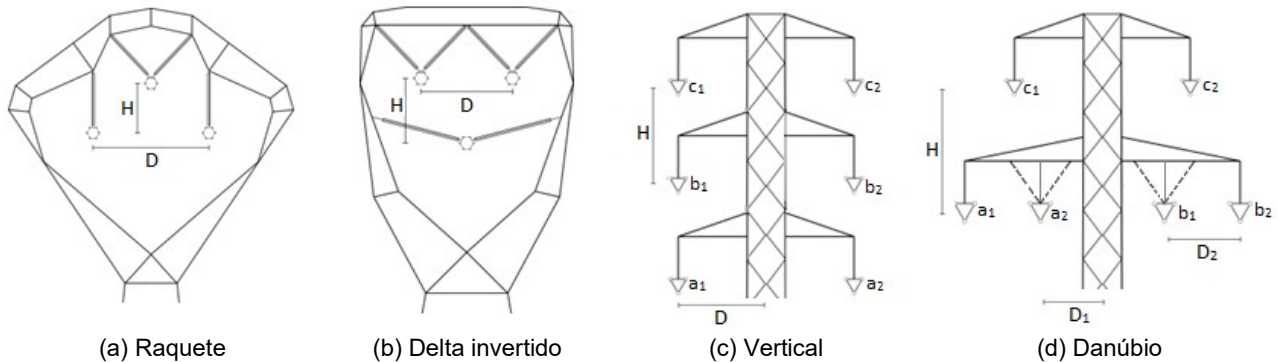


FIGURA 6. Silhueta das torres autoportantes compactas analisadas para o exemplo de LT em 500 kV

Portanto, baseando-se nas configurações das torres autoportantes apresentadas na Figura 6, a título de exemplo calcularam-se configurações de LT com P_c concorrente à da torre estaiada do tipo *cross-roped* empregada na LT 500 kV Barreiras II – Rio das Éguas – Luziânia (14), designada como "Caso Base". Consideraram-se os seguintes dados principais:

- Potência de transmissão: 1700 MW
- Condutores de fase: feixes com 6 subcondutores (ou feixes de 2 x 3 subc.); CAA 795 MCM (Tern)
- Geometria dos feixes de condutores das fases: circular; espaçamento variável, entre 0,40 e 2,0 m
- Coeficiente de rugosidade na superfície dos cabos: 0,82
- Densidade relativa do ar: 0,95
- Comprimento do vão médio da LT: 500 m
- Valores limites na faixa de passagem a 1,5 m do solo (cabos na altura a meio do vão e tensão elétrica máxima): campo elétrico: 8,33 kV/m no interior da faixa e 4,167 kV/m no limite da faixa; campo magnético: 420 μ T no interior da faixa e 83,3 μ T no limite da faixa; radiointerferência: 42 dB/1 μ V/m no limite da faixa; ruído audível: 58 dB(A) no limite da faixa.
- Relação entre o campo elétrico máximo e o campo elétrico crítico na superfície dos condutores: 95%

Os resultados principais obtidos estão apresentados na Tabela 1, os quais confirmam a potencialidade das torres autoportantes estudadas neste exemplo para o nível de potência de transmissão em questão.

TABELA 1 – Principais resultados para as LT em 500 kV

Parâmetro	Caso Base	Raquete	Delta	Vertical	Danúbio
Dimensão vertical/horizontal do feixe - fases externas (m)	2,58 / 2,10	1,99 / 2,30	1,99 / 2,30	0,35 / 0,40	0,82 / 0,95
Dimensão vertical/horizontal do feixe - fase interna (m)	1,39 / 0,96	1,35 / 1,56	1,32 / 1,52	-	0,40 / 0,457
Raio do feixe - fases externas (m)	-	1,15	1,15	0,23	0,67
Raio do feixe - fase interna (m)	-	0,78	0,76	-	0,32
Distância horizontal entre as fases externas ('D') (m)	13,0	10,3	10,2	8,0	5,5 / 5,2
Distância vertical entre os centros das fases ('H') (m)	0	5,0	5,0	9,0	10,2
Potência característica (MW)	1675	1675	1674	1699	1692
Altura mínima cabo solo (m)	12,2	12,3	10,4	12,0	14,5
Largura da faixa de passagem (m)	52	49	50	61	60

4.0 - CONCLUSÃO

Apresentou-se e exemplificou-se neste informe técnico um procedimento de cálculo que integra os cálculos de coordenação de isolamento, esforços mecânicos na torre, otimização da geometria dos feixes de condutores, e custos de instalação e de perdas elétricas de linhas de transmissão.

Este modelo foi implementado no Sistema Computacional ELEKTRA e mostrou-se bastante robusto, convergente, de fácil implementação, e melhora a precisão dos cálculos efetuados nas análises técnicas e

econômicas e em otimizações de configurações de linhas de transmissão.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J.C. Salari, "O Sistema computacional ELEKTRA – Integração de modelos matemáticos para o dimensionamento otimizado de linhas de transmissão com feixes convencionais e não convencionais", in X SEPOPE, Florianópolis, Brasil, Maio, 2006.
- (2) Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- (3) A.L.E. Reis, J.C. Salari. "A methodology for insulation coordination for overhead transmission line design", in XIV SEPOPE, Recife, Brasil, 2018.
- (4) J.C. Salari, "A Methodology for Computing Transmission-Line Short Circuits Caused by Direct and Nearby Ground Lightning Incidence—Part I: Methodological Aspects; —Part II: Application Examples ", IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 4, pp.1578-1585, pp. 1586-1590, Agosto, 2014.
- (5) L.F. Estrella, SAD-TLT - Instalação, Registro e Base de Dados, Relatório Técnico CEPEL/DLE, no. 7624, 2018.
- (6) J.C. Salari, "Otimização da Geometria dos Feixes de Condutores de Linhas de Transmissão", Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Brasil, Abril, 1993.
- (7) S. Gomes Jr, J.C. Salari, "Manual do Usuário do Sistema Computacional OTLIN", Relatório Técnico Cepel DPP/TEC no. 43, 1996.
- (8) ANEEL, "Estabelecimento da Metodologia de Definição do Banco de Preços de Referência ANEEL a ser Utilizado nos Processos de Autorização, Licitação e Revisão Tarifária das Concessionárias de Transmissão de Energia Elétrica", Nota Técnica no. 099–SRT/ANEEL, 2008.
- (9) D. Carvalho Jr., J.H.M. Almeida, "Estudos para Expansão da Transmissão - Primeiras Linhas de Transmissão em 500 kV com 6 Subcondutores Planejadas no Brasil - Comparação com as Soluções Indicadas nos Projetos Básicos", Nota Técnica no. EPE-DEE-NT-018, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2015.
- (10) J.A.A. Casagrande, F. Sganzeria, *et al.*, "Torres para linhas compactas do segundo circuito 500kV da interligação Norte-Nordeste, no sistema Eletronorte - 2a. Parte - Etapas e evolução do projeto mecânico", in VIII SNPTEE, São Paulo, Brasil, Maio 1986.
- (11) P.C.V. Esmeraldo, C.P.R. Gabaglia, *et al.*, "A proposed design for the new Furnas 500 kV transmission lines", IEEE Trans. Power Del., vol. 14, no. 1, pp. 278-286, Janeiro, 1999.
- (12) H. Wei-Gang, "Study on conductor configuration of 500-kV Chang-Fang compact line", IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 3, pp. 1002-1008, Julho, 2003.
- (13) A. Nigri, A. Simões, *et al.*, "Poluição nos isoladores de linha de 500 kV - Nova metodologia de coleta e lavagem com as instalações energizadas", in XXIV SNPTEE, Curitiba, PR, Outubro, 2017.
- (14) R.P. Guimarães, R.S. Nakamura, *et al.*, "LT 500 kV CS Barreiras II - Rio das Éguas - Luziânia - Solução eletromecânica estrutural para SIL de 1670 MW", in XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, 2015.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Arthur Linhares Esteves dos Reis é Pesquisador do Departamento de Linhas e Estações (DLE) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras CEPEL). Possui mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ (2018) e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, MG (2014). Participou de intercâmbio pelo Ciência sem Fronteiras na Universidade de Brunel, Reino Unido (2012/13). Foi bolsista de iniciação científica, dando continuação ao estágio na Universidade de Uppsala, Suécia (2012). Foi bolsista do Programa de Educação Tutorial - PET (2010/12). Trabalha com pesquisa na área de Sistemas Elétricos de Potência, com ênfase em Coordenação de Isolamento e Projeto de Linhas de Transmissão.



João Clavio Salari Filho é Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras CEPEL). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1988), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1993) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: cálculo bidimensional e tridimensional de campos e transitórios eletromagnéticos nos domínios do tempo e da frequência; linhas de transmissão em CA e CC convencionais e não convencionais (LPNE, LNC); linhas de distribuição urbana e rural; subestações de energia elétrica; aterramento elétrico; análise técnico-econômica de transmissão de energia; propagação de descargas atmosféricas; ampacidade de condutores; e efeito corona em

condutores.



Luiz Felipe Estrella Júnior possui graduação em Fortificação e Construção Civil pelo Instituto Militar de Engenharia (1984), mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1988) e doutorado em Mécanique des Structures et Stabilité - MSM pela Université de l'Etat a Liege (1993). Atualmente é Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras CEPTEL). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: instabilidade, análise não linear geométrica, perfis leves de chapa dobrada, e flambagem local.