



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT0YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHA DE TRANSMISSÃO - GLT

**SOLUÇÃO INÉDITA PARA LT 230 kV VILHENA – JAURU DE CIRCUITO DUPLO
ASPECTOS ELÉTRICOS, MECÂNICOS E ECONÔMICOS**

Kleber Ribeiro dos Santos(*)

João Félix Nolasco

Hilton Antônio de Melo

Elilson Eustáquio Ribeiro

Alexandre E. Mendes Meloni

LEME ENGENHARIA LTDA.

Filipe Guerra Soares

Paulo Ricardo R. Liberato da Silva

Reynaldo Castriota de Mello

Sírio José Ferreira

ENGETOWER ENGENHARIA

Ricardo Martin

Rogério de Campos Vieira

JAURU TRANSMISSORA

RESUMO

O Setor de energia elétrica brasileiro vivencia uma fase excepcional, com altos investimentos em geração e transmissão de energia. Faz parte deste contexto a interligação de áreas importantes da região Norte (Rondônia, Acre, Amazonas e Amapá) com o restante do Sistema Interligado Nacional (SIN). Leilões da ANEEL têm considerado tais interligações, sendo que estes vêm promovendo uma intensa busca de soluções de engenharia para se atingir eficiência máxima, objetivando o menor custo possível do empreendimento.

No Leilão ANEEL Nº 005/2006, a Companhia Jauru Transmissora de Energia S/A, consórcio formado pelas empresas COBRA, ELECNOR e ISOLUX, venceu a concessão das LTs 230 kV que interligarão o estado de Rondônia ao de Mato Grosso, interconectando as subestações de Samuel, Ariquemes, Ji-Paraná, Pimenta Bueno, Vilhena e Jauru, com trechos de LTs em circuito simples e duplo. Assim, a Jauru Transmissora e as projetistas contratadas, Leme Engenharia e Engetower Engenharia, buscaram soluções integradas de engenharia que atendessem aos parâmetros elétricos exigidos pela ANEEL e às características de cada trecho de LT, bem como que possibilitasse atingir as taxas de retorno almejadas pelos investidores. As empresas envolvidas no projeto desenvolveram o projeto básico, os estudos elétricos, a solução estrutural e o projeto eletromecânico mais adequados às necessidades técnicas e econômicas do empreendimento. Para a linha de circuito duplo, LT 230 kV Vilhena – Jauru, foi desenvolvida uma nova série de torres de suspensão, a tipo Danúbio, onde a torre de suspensão típica é estaiada monomastro possuindo uma configuração de dois circuitos triangulares.

O presente informe técnico descreve aspectos elétricos, mecânicos, estruturais e econômicos desta solução inédita de projeto e apresenta alguns dos resultados obtidos com a sua aplicação na referida linha de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de Transmissão; Torre Estaiada Monomastro Danúbio; Torre Autoportante; Feixe Expandido; Compactação de Fases; Capacidade; SIL.

1.0 - INTRODUÇÃO

O edital de leilão da ANEEL Nº 005/2006, referente ao sistema de interligação Rondônia – Mato Grosso em 230kV, exigia para a LT 230kV Vilhena – Jauru a condição desta ser de circuito duplo com um SIL de 224 MW para cada

(*) Leme Engenharia Ltda. - Rua Guajajaras, n° 43 – 9º andar – CEP 30.180-909 - Belo Horizonte, MG – Brasil
Tel: (+55 31) 3249-7639 – Fax: (+55 31) 3249-7630 – Email: kleber.santos@leme.com.br

2.1 Aspectos Elétricos

Foram feitos estudos envolvendo a otimização dos componentes da LT abrangendo a definição do cabo condutor, os parâmetros de desempenho elétrico, a coordenação de isolamento, o comportamento da LT sob ação de descargas atmosféricas e sob ação de sobretensões de manobra. Estes estudos, bem como as soluções respectivas, estão mostrados a seguir.

2.1.1 Estudo de Otimização

Mereceu particular atenção a LT 230 kV Vilhena – Jauru, circuito duplo, por sua extensão e suas características especiais, já que seu peso econômico no empreendimento era considerável. A definição e otimização dos principais parâmetros elétricos da LT, atendendo aos requisitos do sistema elétrico, como configurado nos estudos básicos iniciais, levando em conta o fator econômico, seria fundamental. Para atender aos requisitos do Edital, foram estudadas algumas alternativas a fim de se projetar uma torre de suspensão típica adequada, o mesmo acontecendo com as outras torres da nova série. A única torre que atendeu economicamente as especificações foi a do tipo Danúbio, com feixe duplo expandido. Sua configuração foi a de dois circuitos com disposição triangular das fases, sendo duas fases na mísula inferior e uma na mísula superior. A torre estaiada tipo monomastro se mostrou mais favorável, sendo complementada a série com duas torres autoportantes de suspensão, buscando uma solução ótima entre altura e peso das estruturas.

Os principais requisitos do Edital, e como seu atendimento foi conseguido, através de uma estreita interação entre os estudos elétricos e o cálculo estrutural, acham-se descritos a seguir:

- Definição do feixe de condutores: seria necessário atender a condição de seção mínima, para limitar as perdas, bem como estabelecer um feixe que proporcionasse à linha uma potência natural (SIL) mínima de 224 MW, por circuito.
- A definição do feixe mínimo foi confirmada através de um estudo simplificado de otimização, que comparou feixes duplos de condutores CAA na faixa de seção 477 MCM (Hawk) a 1272 MCM (Bittern). A Figura 2 mostra os resultados da avaliação econômica da LT 230kV em análise, em função da área total de Alumínio para o feixe duplo.

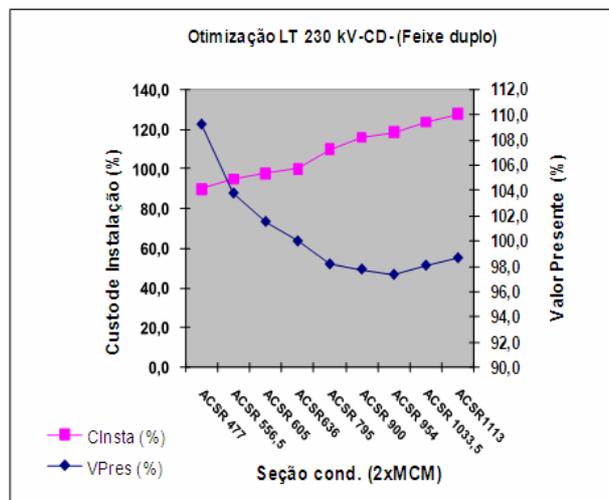


FIGURA 2 - Avaliação Econômica em Valor Presente LT 230 kV de Circuito Duplo - 2 Subcondutores / Fase

Observa-se que a seção condutora de alumínio situada entre 2x795 e 2x1033 MCM resultou mais econômica. O feixe duplo 2 x CAA 795 MCM (Tern) por situar-se na curva de valor presente apenas 0,9% acima do condutor ótimo (2xRail) foi selecionado para a aplicação na LT.

2.1.2 Potência Natural (SIL)

A obtenção do SIL mínimo de 224 MW por circuito constituiu-se na verdadeira chave do problema, pois demandava a viabilização simultânea de uma geometria da torre que fornecesse um desempenho satisfatório para descargas atmosféricas, principalmente com falhas de blindagem próximas de zero (0), sem comprometer os custos da linha.

Foi comparada em especial a torre tipo tronco-piramidal com a torre tipo Danúbio, sendo que, ao final, a configuração com duas cadeias na mísula de baixo, uma em **I** e outra em **V**, foi a única que atendeu satisfatoriamente ao requisito de balanço e aos espaçamentos máximos possíveis para se atingir o SIL necessário. Ressalte-se, no entanto, que a obtenção do SIL de 224 MW só se tornou possível com a expansão do feixe até 1230 mm. Para reduzir os custos de espaçadores e otimizar o peso da torre, adotou-se configuração vertical para o feixe duplo.

2.1.3 Parâmetros de Desempenho Elétrico

Para a potência de 224 MW por circuito, igual à potência natural (SIL) da LT, os principais parâmetros de desempenho referidos à tensão nominal de 230 kV (Exceto RI, RA e E_{max} , referidos a 242 kV) considerada teoricamente numa transmissão radial, encontram-se indicados na Tabela 1.

TABELA 1 - Parâmetros de Desempenho Elétrico

Pr(MW)	L(km)	Ig(A)	Ir(A)	RA(db)
224	344	564,0	562,3	27,3
Vr(kV)	Cos Φ	Vg(kV)	Pg(MW)	Perd(MW)
230	1	242,7	236,977	12,97
S(mm)	Faixa(m)	Reg(%)	MVARperd	Perd(%)
1230	45	5,50	-4,9	5,79
E(kV/cm)	E_{max} (kV/cm)	RI(db)	E_0 (kVef/cm)	SIL(MW)
15,50	13,60	32,3	20,59	224

Simbologia:

L: Comprimento da LT;

Pr e Pg: Potências no terminal receptor e gerador, respectivamente;

Vr e Vg: Tensões no terminal receptor e gerador, respectivamente;

Cos ϕ : Fator de Potência no receptor;

Reg(%): Regulação no receptor;

Ir e Ig: Correntes no terminal receptor e gerador, respectivamente;

Perd (MW) e Perd (%): Perdas de potência ativa, em MW e em %, na LT;

MVARperd: Perdas de potência reativa na linha (Indutiva, se positivo);

RI: Rádio Interferência no limite da faixa indicada;

RA: Ruído Audível no limite da faixa indicada;

E, E_{max} e E_0 , em (kV/cm): Média e Máximo dos gradientes superficiais máximos dos condutores e Gradiente de corona crítico do ar;

SIL: Potência Natural da Linha;

S: Espaçamento entre subcondutores.

2.1.4 Coordenação de Isolamento e Desempenho

a) Cadeia de isoladores

Foi definida com 14 isoladores de suspensão 146 mm x 254 mm, chegando-se a uma distância de escoamento específica de 18,5 mm/kV.

b) Sobretensões e distâncias críticas

Foram estudadas as três condições de isolamento, correlacionadas com os respectivos ângulos de balanço das cadeias nas torres, a saber:

- Sobretensões operativas, associadas à velocidade de vento máximo, período de retorno 50 anos, à altura média de 17 m do solo, período de integração 30 segundos (31,0 m/s);
- Sobretensões de manobra, com vento reduzido de 18,6 m/s, igual a 60% do vento máximo, Considerou-se a tensão suportável máxima $V_{med}+3\sigma$ combinada com o Fator de Clima com probabilidade aproximada de 10% de ser inferior, para se determinarem as distâncias críticas;
- Sobretensões atmosféricas sem a ocorrência de balanço devido ao vento. As distâncias elétricas críticas foram calculadas de acordo com a Fórmula de Paris e verificadas conforme metodologia moderna descrita em [6] e [7], conferida com a da NBR-5422 [1].

Para a estrutura de suspensão típica, estaiada, CD, tipo monomastro JDE3, para pequenos ângulos - deflexões da linha até 3° - a Tabela 2 mostra o sumário dos ângulos de balanço e distâncias críticas calculadas.

TABELA 2 - Sumário das Distâncias Críticas (m) e Ângulos de Balanço Torre Estaiada Monomastro Tipo JDE3 ($\alpha \leq 3^\circ$)

Condição	Fase Interna (Cadeias V)	Fases Laterais (Cadeias I)		
	Sem Balanço	Ângulo de Balanço	Estrutura	Estai
Frequência Industrial	0,45	37°	0,45	0,45
Surto de Manobra	1,10	24°	1,10	1,10
Descarga Atmosférica	2,05	11°	2,05	2,05

c) Desempenho sob descargas atmosféricas

Com o nível cerâmico da região de 70 e uma resistência de aterramento média $R = 19\Omega$ para 60 Hz (e 13Ω a impedância de surto), determinou-se pelo Programa Flash um índice de desligamento de 1,96 falhas/100 km/ano, que atendeu a prescrição máxima de 2 falhas/100 km/ano.

d) Desempenho sob surtos de manobra

Considerando-se a pior distribuição de surtos de manobra, obtida do Relatório R2 do edital, utilizou-se uma média $\mu = 2,10$ pu e desvio-padrão $\rho = 0,15$ e calculou-se o desempenho da LT com os métodos estatístico e determinístico,

2.1.5 Sistema de Aterramento das Estruturas

A redução das resistências de aterramento das estruturas de uma linha de transmissão constitui um dos meios efetivos de controlar as sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas. Essa redução deve obedecer a um compromisso econômico entre o custo do sistema de aterramento e a performance desejada da linha. No presente caso, o sistema de aterramento das estruturas da LT 230kV Vilhena – Jauru C1 e C2 deve ser compatível com a taxa de 2 desligamentos / 100 km / ano, especificada no Edital n° 005/2006 da ANEEL.

A partir de análises de desempenho da LT frente às descargas atmosféricas com a rotina computacional FLASH, identificou-se a necessidade de se obter uma resistência média do sistema de aterramento da ordem de 19Ω . É importante observar que nesta análise foi considerado o desempenho do sistema de aterramento frente a surtos. Entretanto, foi utilizado o critério de resistência, pois este parâmetro é de relativa facilidade de verificação em campo.

As fases de aterramento foram estabelecidas considerando a utilização de cabos contrapesos horizontais, hastes de aterramento e poços profundos. A complexidade das fases foi estabelecida de forma a se ter uma maior variação da resistência, principalmente para abranger situações mais críticas. Foram utilizados cabos contrapesos radiais, com comprimento variando de 10 a 90 m e em número variando de 4 a 6 rabichos. Além disto, foram consideradas hastes de aterramento instaladas no fundo das cavas das fundações das estruturas.

2.1.6 Corrente de Curto-circuito Estabelecida no Edital

As condições estabelecidas no Edital com relação às intensidades de corrente de curto-circuito nos terminais da LT (valor de 40 kA) impuseram diversas restrições. A solução para atender a cada uma delas exigiu:

- Verificações e ensaios de arco de potência em cadeias de fixação de condutores, ocasião em que se constatou a necessidade de aplicação de proteções elétricas (chifres, raquetes, etc.) nas cadeias que seriam instaladas nos extremos da linha. A figura 4 mostra os tipos de cadeias I e V que foram aplicadas nos extremos da LT.
- Estudo e definição de cabos pára-raios adequados sendo aplicados dois tipos de cabos, um no meio da linha e o outro nos seus extremos.

2.1.7 Cadeias de Isoladores

As figuras 3 e 4 apresentam os arranjos das cadeias de isoladores de suspensão I e V com feixe expandido aplicados nas estruturas da LT. Para as estruturas de suspensão, as cadeias em I foram aplicadas conforme mostrado na figura 1, na mísula superior e nos extremos da mísula inferior, sendo que as cadeias em V foram aplicadas na mísula inferior, próximo ao corpo das estruturas (ver figura 1). Cadeias de isoladores com proteção elétrica (chifres, raquetes, etc.) foram aplicadas nos extremos da LT, nos mesmos trechos onde foram aplicados cabos pára-raios de bitolas maiores. As cadeias sem proteção elétrica foram aplicadas no trecho restante da LT.

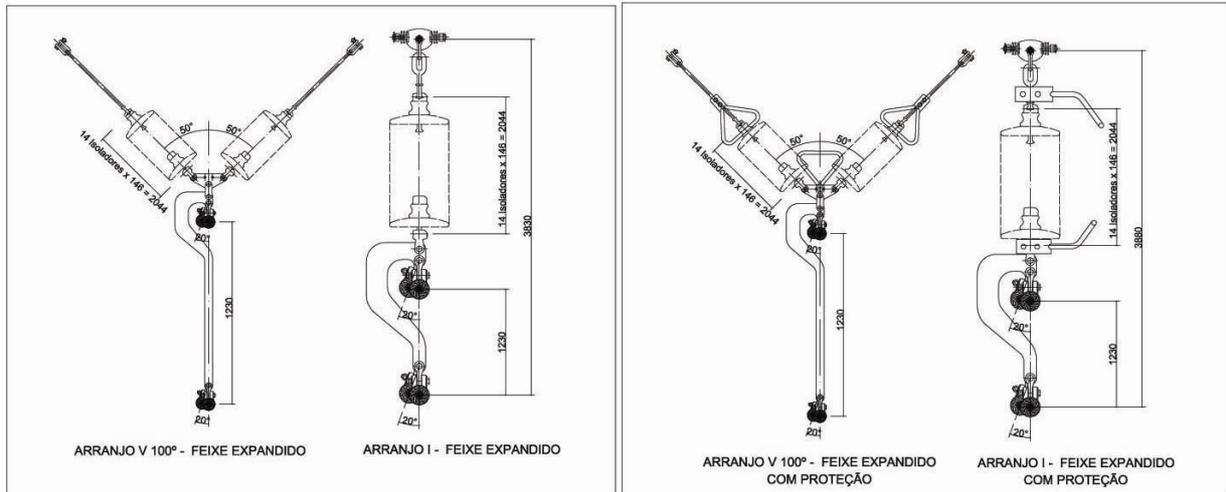


FIGURA 3 – Cadeias Típicas Sem Proteção Elétrica **FIGURA 4 – Cadeias Típicas Com Proteção Elétrica**

2.2 Aspectos Mecânicos

Foram feitos estudos envolvendo a confiabilidade mecânica, os critérios de tracionamento dos cabos, bem como envolvendo aspectos relativos à série de estruturas e seus condicionantes estruturais. Estes estudos estão mostrados a seguir.

2.2.1 Confiabilidade Mecânica

A segurança do projeto mecânico estrutural da LT foi estabelecida com base em critérios probabilísticos, considerando-se as recomendações da IEC-60826 [2], critérios de confiabilidade exigidos nos editais da ANEEL, critérios de projeto específicos empregados em LTs similares já implantadas na região, e estudos estatísticos de dados climáticos elaborados para o local da LT, nos estados de Rondônia e Mato Grosso.

Estudos estatísticos de vento para a região da LT indicaram o valor de 23,33 m/s para a Velocidade de Vento de Referência (V_R), definida como sendo a velocidade de vento que ocorre a 10 m sobre o nível do terreno, em lugar aberto, plano e com poucos obstáculos (Rugosidade B), com período de integração de 10 minutos e para um período de retorno $T = 50$ anos. Considerando-se nível de confiabilidade mínimo para período de retorno do vento de 150 anos, conforme especificado pelos editais da ANEEL, obteve-se Velocidade de Referência correspondente de 26,67 m/s. Adicionalmente, foram introduzidos carregamentos para atuação de ventos de tormentas elétricas (TS – Thunderstorms), conforme exigências do Edital da ANEEL, considerando-se o seguinte critério:

- Velocidade de vento 20% maior que aquela correspondente à rajada de 3 segundos da Velocidade de Vento de Referência para $T = 150$ anos, constante com a altura, atuando integralmente sobre a estrutura e sobre 25% do vão médio. A velocidade de vento de alta intensidade atuante foi de 44,80 m/s.

A Tabela 3 apresenta os valores das pressões de vento finais adotadas no projeto, para vão básico de 500 m, altura média do cabo condutor de 18,3 m e do cabo pára-raios de 23,5 m.

TABELA 3 - Pressões de Vento de Projeto

Vento	Elemento	Pressão final de vento (kgf/m ²)
Extremo	Condutor	84,56
	Pára-raios	89,90
	Estrutura	$87,1(H/10)^{0,149}$
Tormentas Elétricas	Condutor	125,4
	Pára-raios	
	Estrutura	

2.2.2 Critérios para Tracionamento dos Cabos

Foram adotados os seguintes critérios para o cálculo das trações dos cabos condutores e pára-raios:

- Condição EDS (sem vento, após “creep” de 10 anos): tração axial máxima associada à temperatura de 25°C, limitada a 20% da carga de ruptura do cabo;
- Condição de temperatura mínima: tração axial máxima associada à temperatura de 5°C, limitada a 33% da carga de ruptura do cabo;
- Condição de vento nominal (T = 50 anos): tração axial máxima associada à temperatura de 15°C, limitada a 50% da carga de ruptura do cabo;
- Condição de vento extremo (T = 150 anos): tração axial máxima associada à temperatura de 15°C, limitada a 70% da carga de ruptura do cabo;
- Além das limitações acima, o cabo pára-raios atendeu à condição de que sua flecha final, em condição EDS, fosse igual ou menor que 90% da flecha final do cabo condutor na mesma condição.

2.3 Aspectos Estruturais

2.3.1 Série de Torres

A Tabela 4 mostra os tipos de torres da série e suas aplicações. As torres de suspensão típicas, estaiada e autoportante, foram projetadas com aplicações iguais, conforme mostrado na tabela abaixo, visando sua intercambiabilidade. As demais torres da série foram projetadas com silhueta tronco-piramidal tipo Danúbio, convencional.

TABELA 4 – Tipos de Torres e Aplicação

Torre Tipo	Aplicação	Ângulo	Vão Médio (m)	Vão Gravante (m)
JDE3	Suspensão Estaiada	0°	480	650
		3°	385	
JDS3	Suspensão Autoportante	0°	480	650
		3°	385	
JDS6	Suspensão Autoportante	0°	700	950
		6°	500	
JDAT	Suspensão Transposição	0°	500	750
		5°	330	
JDA30	Ancoragem Meio de Linha	30°	400	1200
JDA60F	Ancoragem Meio de Linha	60°	400	1200
	Ancoragem Fim de Linha	10° (LT) 30° (SE)	400	1200

2.3.2 Critérios de Projeto

O projeto estrutural foi elaborado aplicando-se a metodologia dos estados limites últimos. As hipóteses de cargas foram estabelecidas segundo critérios indicados na IEC 60826 [2], considerando-se, adicionalmente, aquelas provenientes de ventos de alta intensidade oriundos de tormentas elétricas.

Devido ao comportamento estrutural diferenciado da torre estaiada monomastro, para ela foram também verificadas hipóteses com vento extremo máximo atuando nos cabos e na parte acima dos estais e vento reduzido atuando na parte inferior, bem como hipóteses de vento de alta intensidade atuando apenas sobre a estrutura.

O dimensionamento das torres atendeu integralmente os requisitos do Manual ANSI / ASCE 10-90 – “Design of Latticed Steel Transmission Structure” [3] e o projeto de norma brasileira NBR-8850-R14 [4].

Para o projeto das fundações, as solicitações a elas transmitidas pelas estruturas foram majoradas pelo fator 1,10, de modo a atender ao critério de coordenação de falha.

Foram realizados ensaios de carga em protótipo da torre estaiada monomastro tipo JDE3 e da torre autoportante correspondente tipo JDS3, montadas em suas maiores alturas, tendo como resultados comportamentos estruturais plenamente satisfatórios. A Figura 5 mostra os testes de carga destas estruturas.



FIGURA 5 - Testes das Torres Tipos JDE3 e JDS3

2.4 Aspectos de Construção

Sob o ponto de vista construtivo, a torre monomastro estaiada oferece grandes vantagens técnicas e econômicas. Pode ser facilmente montada, tanto por processos manuais como mecanizados, podendo inclusive ser içada por inteiro na vertical após pré-montagem horizontal. Adicionalmente, em comparação com as estruturas estaiadas convencionais, sua montagem é grandemente facilitada por ter mastro único, no qual os estais já podem ser definitivamente instalados antes mesmo da montagem da cabeça.

3.0 - RESULTADOS OBTIDOS

A utilização da solução de projeto apresentada neste trabalho, além de atender simultaneamente a todos os parâmetros elétricos e mecânicos requeridos, propiciou resultados significativos cujos mais relevantes são:

- Atendimento ao requisito do SIL (potência natural estabelecida para a LT) decorrente da geometria da cabeça da estrutura, disposição das fases e da forma de expansão do feixe dos condutores;
- A solução de estrutura de suspensão monomastro estaiada tipo Danúbio (JDE3) possibilitou uma aplicação da mesma da ordem de 90% do total de estruturas na LT. A estrutura autoportante JDS3, espelho da estrutura JDE3, foi aplicada em 6,5% do total das estruturas da LT;
- Os pesos da estrutura estaiada monomastro (JDE3), em suas maiores alturas, apresentaram uma redução de aproximadamente 35% em relação aos da torre autoportante de aplicação similar (JDS3).

4.0 - CONCLUSÕES

Tanto do ponto de vista técnico quanto sob a ótica econômica, os resultados obtidos na LT 230kV Vilhena – Jauru C1 e C2 com a utilização de estrutura estaiada monomastro tipo Danúbio foram plenamente satisfatórios. Atendeu-se a potência natural (SIL) requerida (de 224 MW por circuito) com significativa redução nos custos de implantação, mostrando ser esta estrutura uma solução de projeto adequada para aplicação em linhas de transmissão similares do sistema de 230 kV.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT – NBR 5422 – “Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica” – Brasil;
- [2] IEC 60826 - Loading and Strength of Overhead Transmission Line. Second edition, 1991-04;
- [3] ANSI/ASCE - Manual 10-90 – Design of Latticed Steel Transmission Structure – Edição Dezembro/1991;
- [4] ABNT – NBR 8850-R14. Execução de Suportes Treliçados para Linhas de Transmissão, Revisão 14;
- [5] EPRI – EHV Reference Book 345 kV and Above, 1982;
- [6] F. Kiessling, JFNolasco: Overhead Power Lines; Springer Verlag, 2003;
- [7] EN-50341-1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV.