



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

FI/GLT/10
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**TRAVESSIA DO RIO AMAZONAS E SUPERAÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA
PROJETO ESTRUTURAL E DESAFIOS CONSTRUTIVOS**

MSc.Juliana Nobre de Mello Motta
Mariana Souza Rechtman
Renata Cristina Jacob de Jesus
Rogério de Mello e Souza
Marte Engenharia

Roberto Luís Santos Nogueira
Evandro Cavalcanti
Julio Cesar Rocha Montoya
Isolux Infrastructure

DSc.Luiz Carlos Mendes
UFF
Zhitian LIN
Nanjing DAIKAI Engineering

RESUMO

Este IT descreve os principais aspectos desafiadores que foram superados tanto no projeto como na construção das Linhas de Transmissão do Sistema Tucuruí - Macapá – Manaus, mais especificamente nas LTs 230 e 500kV Tucuruí – Xingú – Jurupari – Oriximiná – Macapá, com enfoque na travessia do rio Amazonas, bem como na floresta amazônica e de suas áreas alagadas, tendo em vista a importância desta interligação para as principais cidades do norte do país, Manaus e Macapá, antes isoladas eletricamente do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Serão tratados os aspectos principais de otimização aplicados neste projeto de características exclusivas do empreendimento, como o vão de 2.108 m de extensão em torres de circuito duplo com altura total de 296 m, necessário para a travessia do rio Amazonas. Além disso, as soluções de projeto e construtivas para se transpor o bioma amazônico, cuja floresta apresenta um dossel médio da ordem de 40m de altura, e que apresenta extensas áreas permanentemente alagadas, no caso específico da LT, um trecho contínuo de 70 km.

A dependência de grandes cidades da região amazônica por geração térmica foi superada com a implantação dessas novas LTs. O abastecimento energético por energia provinda de geração hidroelétrica beneficia o meio ambiente, na medida que minimiza a emissão de CO₂.

Serão apresentadas as análises do projeto da torre especiais de 296m de altura, incluindo o cálculo de cargas, a seleção da estrutura e o projeto de componentes estruturais e conexões. Em projetos típicos, torres estruturadas em perfis cantoneiras representam a solução mais adequada, porém para a travessia em questão, será mostrada a avaliação técnica/econômica e os benefícios da opção por perfis tubulares. O comportamento estrutural deste tipo de torre, nomeado GTS, será discutido e a razão para a escolha das propriedades estruturais estarão presentes neste estudo.

Além disso, a vibração induzida pelo vento e a análise não-linear da estrutura deve ser considerada para este tipo de torre. A definição da estrutura será justificada com a verificação dos efeitos dinâmicos e a visualização das deformações.

De forma a assegurar a fabricação e montagem de alta precisão deste tipo de torre, GTS, algumas técnicas principais, os desafios e inovações serão apresentados. Para completar a fabricação das duas torres GTS, foram tomadas as medidas de controle de qualidade do material com ensaios não destrutivos e testes físicos e químicos.

Será demonstrado o desafio de fabricar grandes tubos de aço com 28 milímetros de espessura, sendo necessários testes a fim de se obter a melhor solução na técnica de dobragem dos perfis. Simultaneamente, a tensão residual e sua distribuição foram testadas e medidas para assegurar que as tensões residuais fossem mínimas na fabricação dessas peças.

As principais técnicas sobre a construção das duas torres de suspensão serão fornecidas em detalhe no desenvolvimento do IT. Os principais tópicos que serão abordados seguem descritos abaixo:

- Esquema da travessia;
- Definições de carregamento de vento;
- Hipóteses de carregamentos;
- Normas de dimensionamento utilizadas;
- Materiais aplicados;
- Análise estrutural: Pré-dimensionamento, cálculo não linear, indicação do membro mais carregado e ligação mais solicitada, verificação da deformação, análise dinâmica;
- Aproveitamento do elevador industrial na construção como grua;
- Procedimento de construção.

PALAVRAS-CHAVE

Travessias, cálculo estrutural, construção

1.0 - INTRODUÇÃO

Torres de Suspensão: Para cruzar a extensão do rio de 2.108 m, o tipo torre de suspensão (GTS) foi escolhido para minimizar a sua carga, como a altura necessária de 296 m (altura da fase inferior 257,5 m). As torres são feitas de aço perfil tubular, cujo membro principal tem as dimensões 1530x28 mm (diâmetro x espessura). O peso total da torre é de 2381 tf e sua base 48 m x 48 m. Como a extensão do rio supera o vão da travessia, uma torre foi instalada em uma ilha e outra na ponta do rio.

Torres de Ancoragens: Para ancorar os condutores especiais, duas torres com um circuito de configuração vertical de fases, chamadas GTA, foram instaladas, antes e após as torres de suspensão de acordo com o esquema mostrado na Figura 1. Estas torres têm 40 m de altura e suportam a diferença longitudinal entre o condutor da travessia especial e o condutor padrão da LT: AAAC 1055 MCM.

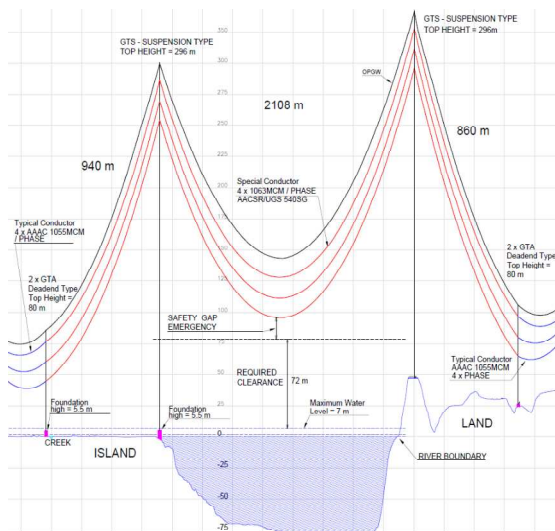


FIGURA 1 - Perfil da Travessia



FIGURA 2 – Imagem das Travessias

Cabo condutor: Foi desenvolvido um estudo técnico-econômico para escolha do condutor. Devido à extensão do vão da travessia, a melhor alternativa foi o condutor especial 1063 MCM - AACSR UGS, que possui núcleo de aço de alta resistência (330 MPa) e fios de liga de alumínio 6201-T81. Diâmetro = 36,3 mm, peso = 3,38 kgf/m, área total de 779,4 mm² e Carga de ruptura de 59.400 kgf

Cabos para-raios: foram instalados dois cabos OPGW, composto por fios de alumoweld, Diâmetro = 24,3mm, peso = 2.30 kgf/m, área total de 328,8 mm² e Carga de ruptura de 44.930 kgf. Contendo o núcleo óptico de 36 fibras.

2.0 - PRESSÕES DE VENTO

De uma forma geral, as normas internacionais para as linhas de transmissão têm sua precisão restrita a torres com alturas de até 60 metros e extensão de comprimentos de até 800 m. Para superar a situação, foram utilizados fatores de correção nas fórmulas, bem como a adoção da norma EN50341 para modelagem dos ventos.

Alturas dos componentes:
torre

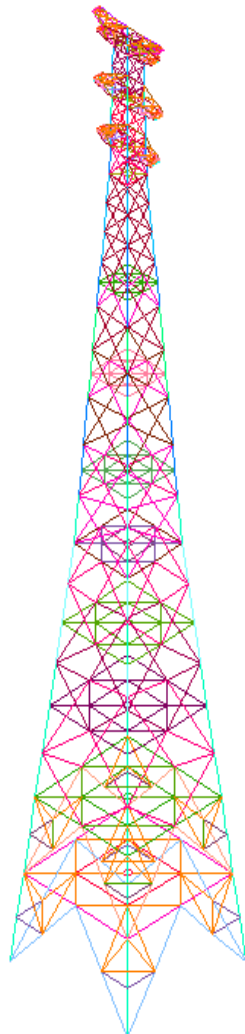
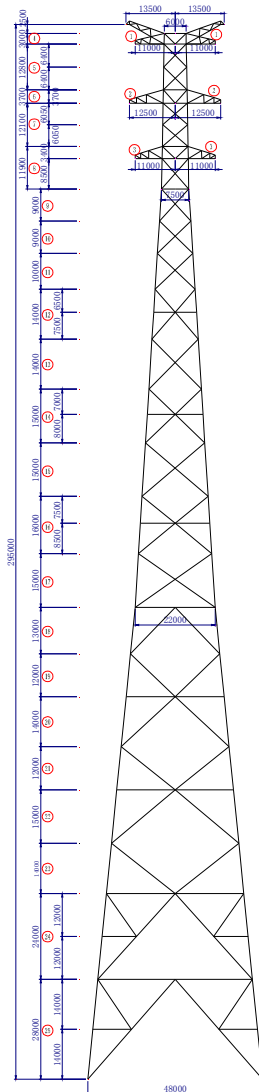
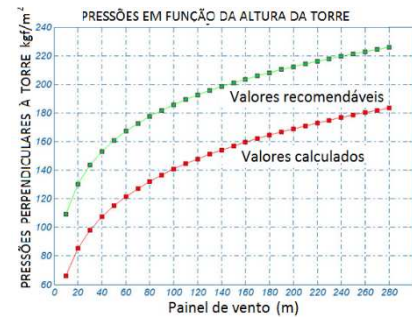
Tabela 1 – Pressões de vento nos cabos

FIGURA 3- Pressões de vento na

(Fonte: Batávia)

Condutores = 155 m
Para-raios = 175 m
Isoladores = 265 m

2.1 Componente	2.2 Vento (kgf/m ²)
2.3 Conductor	2.4 145
2.5 Para-raios	2.6 148
2.7 Isolador	2.8 260



3.0 - DIMENSIONAMENTO

Foi feita a análise não linear da estrutura (Figura2), utilizando dois programas TTA e SAP 2000 foi adotada na análise estrutural global, que é compatível com as estruturas de treliça de grandes alturas submetidas a grandes cargas. Durante a análise, as cargas que atuam sobre cada membro da torre e os deslocamentos correspondentes no topo da torre foram investigados e comparados. O limite de resistência de cada membro da torre foi calculado de acordo com as recomendações da norma ASCE 10-97.

A torre em perfis tubulares de aço foi recomendada para este projeto, pois a torre GTS tinha uma grande altura, grandes cargas. A estrutura de tubular de aço tem boa rigidez e propriedades de alta resistência.

Abaixo pode ser visualizada a diferença de peso entre a torre com a geometria escolhida e a torre com estrutura de cantoneiras:

Tabela 2 – Pesos das torres

Tipos	Torre em perfis tubulares	Torre em cantoneiras
Peso em tf	2381	3282

Os perfis foram calculados com material Q345B (equivalente ASTM A572 GR50). Para as placas de ligação Q235B (equivalente A36).

O dimensionamento da estrutura à flambagem local e às forças globais de estabilidade foi executado de acordo com as normas

FIGURA 2 – Silhueta da torre GTS

ASCE 48-11 e AISC 360-05, listadas com as seguintes equações:

$$\text{ASCE 48-11: } \left[\left(\frac{P}{A} + \frac{M_x c_y}{I_x} + \frac{M_y c_x}{I_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{VQ}{It} + \frac{Tc}{J} \right)^2 \right]^{1/2} \leq F_t \quad (3.1)$$

$$\text{AISC 360-05: Quando } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.2)$$

$$\text{Quando } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \quad \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.3)$$

Onde: P=força normal; A=seção transversal; V=cortante; Mx=momento fletor no eixo x; My= momento fletor no eixo y; Ix=Inércia no eixo x; Iy= Inércia no eixo y; t=espessura; T=momento torçor. Pr = compressão solicitante; Pc=compressão admitida; Mr=flexão solicitante, Mc=flexão admitida.

Para exemplificar o cálculo da estrutura, é demonstrado na tabela 3 o montante mais solicitado da estrutura $\phi 1530\text{mm} \times 28\text{H}$ (HTS).

Tabela 3 – Montante mais solicitado

Compressão máxima	31978 kN
Compressão admissível	36339 kN
Utilização	88% - Ok

Na tabela 4 é demonstrada a ligação mais Solicitada da estrutura:

Tabela 4 - Esforços na ligação

T (Tração)	21860 kN
N (Compressão)	32861 kN



FIGURA 3 – Montante da Torre

Tabela 5 – Parâmetros da chapa de ligação e parafusos

Flange and Bolt Parameters	
D1 (diâmetro externo)	1910 mm
D2 (diâmetro interno)	1530 mm
Espessura do perfil	190 mm
D0 (diâmetro da linha de parafuso)	1720 mm
Diâmetro do parafuso	60 mm
n (numero de parafusos)	28
t (espessura da chapa)	42 mm

Tabela 6 – Cálculo da ligação

Parafuso (Material 8.8)	
Máxima tração	780.7 kN
Tração admissível	890.9 kN
Utilização	88% - Ok
Chapa (Material Q345)	
Momento máximo	249 N/mm ²
Momento admissível	295 N/mm ²
Utilização	84% - Ok

Quatro tipos de ligações foram adotadas para a estrutura, conforme Figura 4.

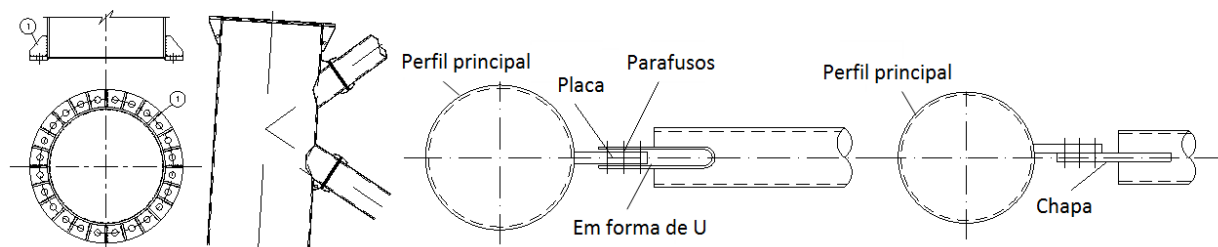


FIGURA 4 - Ligações

Com base na análise da estrutura (Figura 2), os primeiros modos de vibração foram mostrados na Figura 5 abaixo:

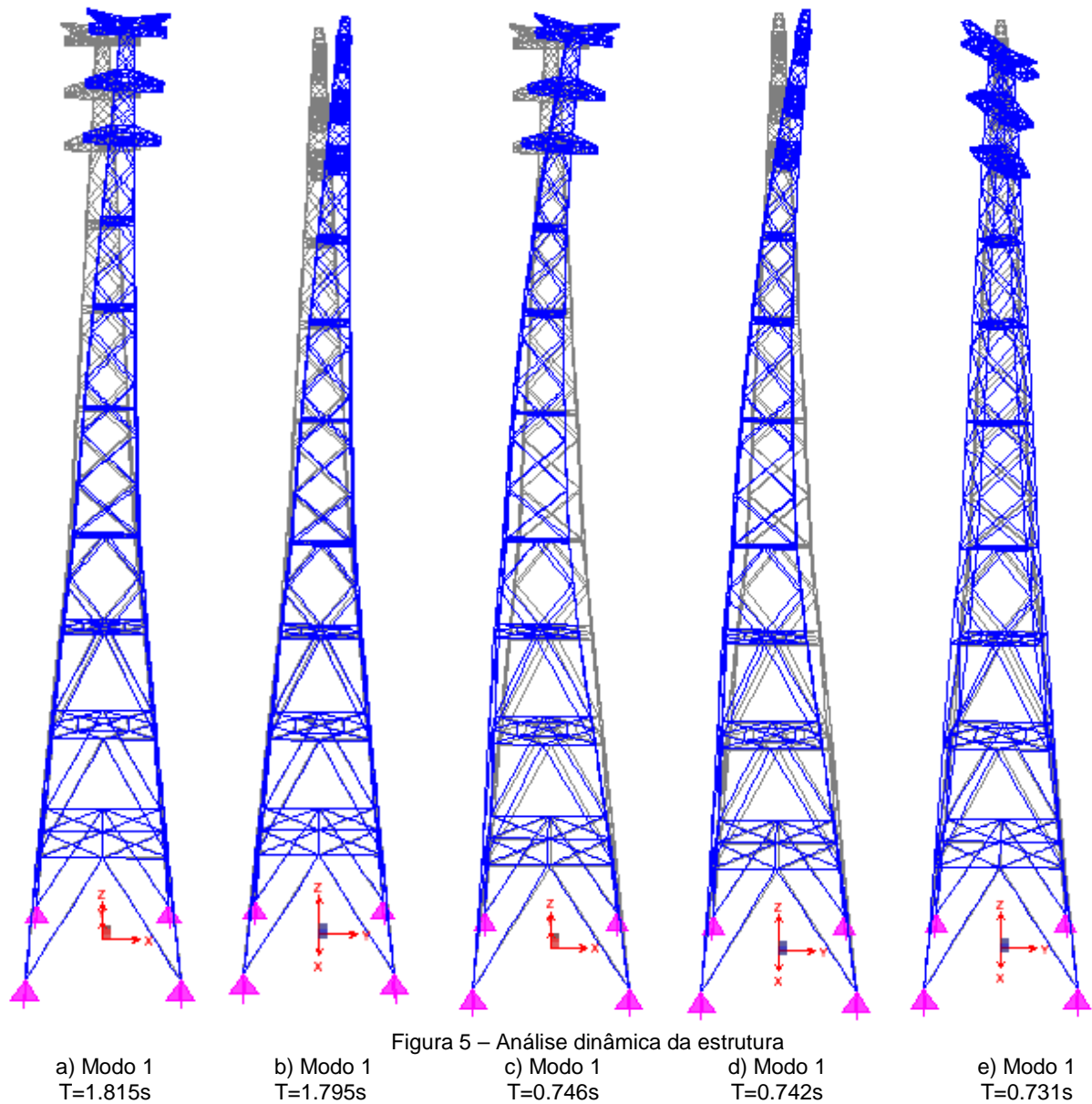


Figura 5 – Análise dinâmica da estrutura

4.0 - CONSTRUÇÃO



FIGURA 6 – Visão global das torres

Os desafios apareceram desde a fabricação, foi difícil de fabricar uma quantidade enorme de tubos de aço usando placa 28 milímetros de espessura, de modo que testes de foram realizados, a fim de se obter dados para flexão das peças. Simultaneamente, a tensão residual e sua distribuição foram testadas e medidas para assegurar que as tensões residuais fossem mínimas. Além disso, a manipulação dos membros à vibração foi feita para libertar a tensão residual.

As dificuldades específicas relacionadas com a travessia do Rio Amazonas tiveram que ser vencidas com planejamento de construção, tais como: interrupção total do tráfego fluvial não permitidos, longo vão para suspender os cabos sob alta tensão, um tratamento especial ao cabo para evitar danos, especial cuidado para evitar qualquer contato dos cabos à terra, entre outras características.

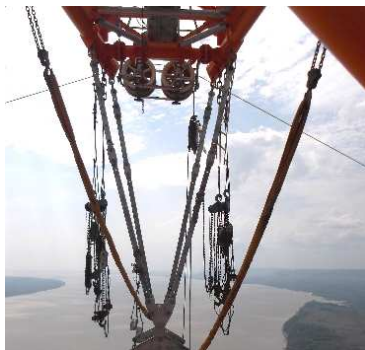


FIGURA 7 – Lançamento dos cabos

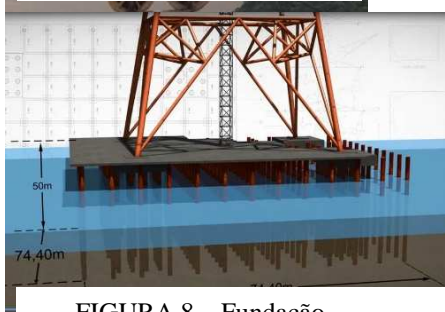


FIGURA 8 – Fundação

Para distância cabo-solo foi necessário manter a altura de 72 m em relação ao nível máximo de cheia do rio. No entanto, durante a montagem dos cabos foi necessário reduzir esta altura para a 30 m para minimizar a tensão para 7900 kgf para cada subconductor. Caso contrário, seria necessário aplicar uma tensão de 9400 kgf.

Outro cuidado refere-se às roldanas para evitar alguma perda de tensão. O processo para suspender o condutor AACSR ao longo da travessia foi executado na seguinte sequência (Figura7):

Φ 8 mm corda (através de um barco), Φ 18 mm corda, cabo de aço Φ 20 mm, 2 x Φ 20 mm de cabo de aço, Φ 28 mm de cabo de aço, 2 x Φ 28 mm de cabo de aço, 4 x condutor AACSR.

As aprovações de restrição de trânsito foram autorizadas sob rigoroso cuidado. A interrupção durante o lançamento limitou-se a 600 m de largura, centrada no rio, enquanto fora desta área apenas embarcações com mastros de até 25 m foram autorizados. À noite, o tráfego para embarcações altura até 40 m de altura foi permitido. Barcos da polícia foram responsáveis por assegurar a execução do planejamento.

Para a instalação da torre GTS na região alagada, foi necessário instalar uma plataforma com 17000 m³ de concreto, 450 estacas de aço com 50 m de profundidade (Figura8).

Além disso, para cerca de 70 km ao longo de uma extensão contínua da linha, o material só poderia ser transportado através de navios. Foi a melhor escolha para evitar a construção de estradas de acesso no meio da floresta Amazônica.



FIGURA 9 – Transporte de material

FIGURA 10 – Construção da torre



O sistema de aterramento foi especialmente projetado para combinar com a alta resistividade do solo. Portanto, foi necessário

instalar 5 estacas de aterramento a uma profundidade de penetração mínima de 33 m. O elevador também foi aterrado neste sistema. Uma camada especial de concreto foi aplicada sobre a base de torre para cumprir os requisitos de segurança.

5.0 - IMPACTOS AMBIENTAIS

Este projeto da LT em análise possibilitou a conexão das principais cidades de Macapá e Manaus com a Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Antes disso, essas cidades eram isoladas do SIN e exclusivamente dependente de usinas termelétricas. A redução estimada nas emissões é o equivalente a 1,3 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

Além disso, para reduzir o impacto sobre a floresta tropical virgem, a LT foi projetada considerando a catenária do condutor acima das copas das árvores (Figura 11), atingindo até 40 m na temperatura máxima de operação de 70 °C. Além disso, foram adotadas torres autoportantes (em vez de estaiadas) para minimizar a área de desmatamento. Para ter acesso construção e lançar os cabos, a faixa de acesso foi restringida a uma largura de 5 m em áreas de APP e 7m nas demais matas. Além disso, a localização da torre em APPs foi proibida sob rigorosa vigilância.



FIGURA 11 – Linha de Transmissão por cima da floresta

6.0 - CONCLUSÃO

O projeto das LTs Tucuruí - Jurupari e Oriximiná - Macapá representou um novo paradigma para O Sistema Interligado Nacional, devido a uma ampla gama de desafios, dentre os quais se destacam: Completamente inserido no Bioma da Floresta Amazônica; em segundo lugar, por possuir a torre de transmissão mais alta das Americas (296 m e terceira do mundo); e, por último, o vão mais longo em área plana no Brasil (terceira nas Americas), incluindo técnicas especiais de construção em zonas húmidas.

Com base em estudos estruturais, a estrutura apresentada uma geometria adequada, incluindo vantagens claras quando comparado com outras geometrias mencionadas neste artigo. O comportamento estrutural está de acordo com as melhores práticas de engenharia, comprovando a eficiência do projeto.

Os aspectos ambientais foram especialmente considerados no projeto, como a Linha atravessa um dos biomas mais importantes e preservados do mundo, a Floresta Amazônica. A construção foi desafiadora devido a aproximadamente 70 quilômetros de extensão contínua sobre zonas húmidas, a ausência de rodovias, lançamento dos cabos dentro de apenas 5 m de faixa, transporte de material através de balsas, estação fluvial de produção de concreto, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hui, Y., Liu, Y. and Zhao, D. – Geometric nonlinear analysis of transmission tower with continuous legs". Proceedings of International Conference on Advances in Steel Structures, Hong Kong, 1996.
- (2) CAO, J., PACKER, J. A. Design of Tension Circular Flange Joints in Tubular Structures. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction.vol.34, n.1, p.17-25, First Quarter 1997.
- (3) Q/GDW384. The manufacturing code for transmission line steel tubular tower, 2009.
- (4) EN Publication 50341 - Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV, 2012
- (6) R.L.S. Nogueira, E. Cavalcanti, J. Rocha, J.N.M. Motta, S.M.M. Felix, R.M. Souza, A.A. Menezes, Amazon River Crossing and Rainforest Issues in Brazil- The Tucuruí - Jurupari – Macapá- OHTL System - Design Optimization, Sustainability and Overall Challenges, Cigré Canada Conference 2014.
- (7) LIN Zhitian, ZHANG Dachang, DAI Gangping, LI Buhui, WANG Chaosheng, ZHAO Wenbo - Design, Fabrication and Erecting of the Long Span Transmission Tower for Crossing the Amazon River of 500kV TL Tucuruí–Xingu–Jurupari–Oriximiná - Cigré Canada Conference 2014.

DADOS BIOGRÁFICOS

Juliana Nobre de Mello Motta, Rio de Janeiro, 12/05/1984

Engenharia Civil (UFF, 2007), mestrado (UFF, 2011), doutoranda (UFF, 2014).

Empresas: Projest Engenharia, Cerne Engenharia, Leme Engenharia e Marte Engenharia.

Experiência profissional em projeto de estruturas de Linhas de Transmissão, Usinas Térmicas, Indústrias, Pontes e Estruturas em Alumínio, com trabalhos publicados no CIGRÉ, CONPAT e CBPE.

Zhitian Lin

Engenheiro Civil (China)

Empresas: Jiangsu Electrical Power Design Institute, Nanjing DAIKAI Engineering Technology Co.

Experiência profissional no projeto de estruturas de Linhas de Transmissão com trabalho publicado no CIGRÉ

Roberto Luís Santos Nogueira, Rio de Janeiro, 16/11/1975

Engenharia Elétrica (UFRJ, 2000), mestrado (COPPE, 2003).

Empresas: Fluxo Engenharia, Ampla Energia, Marte Engenharia e ISOLUX Infrastructure

Experiência profissional em projetos de Linhas de Transmissão, Gerenciamento de Projetos e em concessões de Energia.

Rogério de Mello e Souza, Rio de Janeiro, 19/11/1938

Engenharia Civil (PUC, 1961).

Empresas: IESA Internacional de Engenharia e Marte Engenharia.

Experiência profissional no projeto de estruturas de Linhas de Transmissão.

Mariana Souza Rechtman, Rio de Janeiro, 12/10/1988

Engenharia Civil (UERJ, 2014).

Empresas: Marte Engenharia.

Experiência profissional no projeto de estruturas de Linhas de Transmissão.

Renata Cristina Jacob de Jesus, Rio de Janeiro, 08/05/1984

Engenharia Civil (UERJ, 2007).

Empresas: Marte Engenharia.

Experiência profissional no projeto de estruturas de Linhas de Transmissão.

Evandro Cavalcanti, Minas Gerais, 30/01/1971

Engenharia Eletrotécnica (UFRJ, 1993).

Empresas: GE, Alstom, Areva, Efaced, Johnson Controls, Abengoa Transmissora, ISOLUX Infrastructure

Experiência profissional em diversas áreas do setor de Energia Elétrica

Julio Cesar Rocha Montoya, México D.F., 04/10/1975

Engenharia Civil (Instituto Politécnico Nacional – Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, 1998).

Empresas: Isolux de México, Isolux Projetos e Instalações

Experiência profissional em Projeto eletromecânico de Linhas de Transmissão