

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

COLAPSO DA TRAVESSIA DE LT 230KV CIRCUITO DUPLO SOBRE RIO PARANÁ: DESAFIOS DE ENGENHARIA E DE MANUTENÇÃO NA REQUALIFICAÇÃO ELETROMECÂNICA E ESTRUTURAL FRENTE ÀS SOLICITAÇÕES DE VENTOS DE ALTA INTENSIDADE E REQUISITOS DE PROJETO ATUALIZADOS

ROBERTO LUÍS SANTOS NOGUEIRA(1); DANIEL MOURA(2); VICTOR PRANGIEL DE MENEZES(2); ROGERIO PEIXOTO GUIMARÃES(3); AMAURI ALVES MENEZES JR(4); ANTONIO DE PADUA VIANA(5); WALLACE SILVA CASTRO(5); KELLY CHAN LAM; RANDER ANTONIO DE ALMEIDA
POWERSYS ENGENHARIA(1); STATE GRID (2); SAE TOWERS BRASIL (3); BATAVIA ENGENHARIA E CONSULTORIA (4); VERSÁTIL ENGENHARIA (5)

RESUMO

Em Novembro/2015, o trecho de 3km de Travessia das LTs 230kV sobre o Rio Paraná, em Circuito Duplo, sofreu colapso com a destruição completa de duas torres aplicadas nos dois principais vãos de 950m. O evento foi precedido por um fenômeno climático de alta intensidade com ocorrência de fortes rajadas de vento na região. Este artigo consolida as principais soluções técnicas e os desafios associados à requalificação eletromecânica/estrutural da Travessia, visando à mitigação de riscos de novos colapsos através da atualização dos requisitos de projeto e da aplicação de melhorias em campo, considerando novas condições de vento, carregamento mecânico e configuração da LT.

PALAVRAS-CHAVE

Colapso de LTs, Travessia de Grandes Rios, Ventos de Alta Intensidade, Atualização de Projeto, Critérios e Requisitos de Engenharia, Soluções de Manutenção, Investigação Estrutural, Mapeamento e Estatística de Ventos

1 INTRODUÇÃO

O colapso das LT's 230kV que saem da SE Nova Porto Primavera, na Travessia sobre Rio Paraná, representou uma condição especialmente adversa: a destruição completa de duas (2) torres de Circuito Duplo, afetando não somente os dois principais vãos de 950 m, como todo o tramo num trecho crítico de acesso.

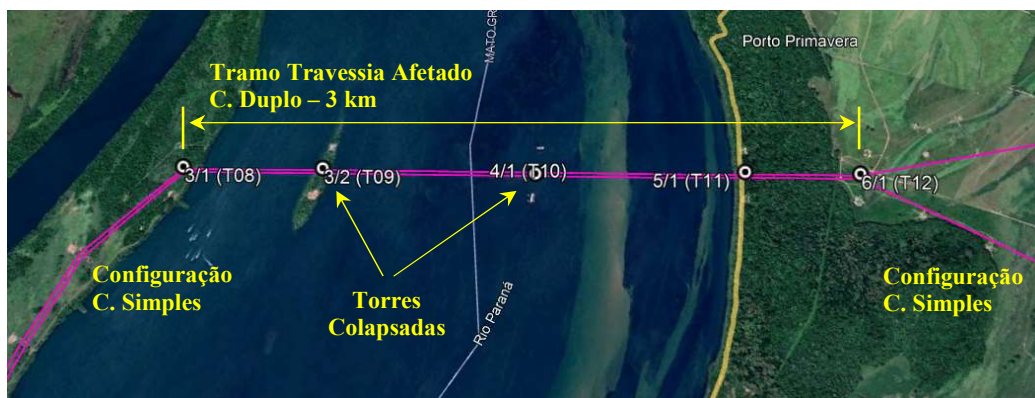


Figura 1 – Planta do tramo da Travessia sobre Rio Paraná.

A recomposição do trecho representou um desafio de Engenharia em virtude das dimensões do evento, condições do local, sobressalentes e urgência no reestabelecimento. Não obstante, duas torres novas, idênticas às existentes, foram implantadas e o condutor original (CAL-A 900 MCM) substituído pelo cabo convencional da LT, CAA TERN.

De acordo com as evidências meteorológicas levantadas à época, o evento foi precedido por uma tempestade de alta intensidade, com a formação de nuvens do tipo Cumulonimbus na região e fortes rajadas de vento, sendo o colapso estrutural a hipótese de causa inicial mais provável. Após a recomposição, iniciou-se uma análise minuciosa do projeto da Travessia para se investigar os detalhes associados à queda e a relação de causalidade com o evento.

O presente artigo consolida, portanto, as soluções técnicas e os desafios associados à requalificação eletromecânica e estrutural da referida Travessia, visando à mitigação de prováveis riscos de colapso similares através da atualização dos requisitos de projeto e da aplicação de soluções de melhoria em campo. São tratados neste IT os estudos eletromecânicos desenvolvidos, a análise estatística do mapeamento de ventos e a análise estrutural considerando as novas condições de carregamento eletromecânico e configuração da LT.

2 O EVENTO

No dia 19 de novembro de 2015, às 15h31min, o tramo de 3 km de extensão em circuito duplo das LT's 230kV que partem da SE Nova Porto Primavera foi totalmente danificado, ocorrendo a destruição completa das torres 3/2 (T09) e 4/1 (T10), nos dois principais vãos de 950 m. Ambas as torres locadas no leito do Rio Paraná, a primeira, com 72 m de altura útil, instalada numa pequena ilha e a outra, com 80 m, implantada no meio do Rio, conforme indicado a seguir.

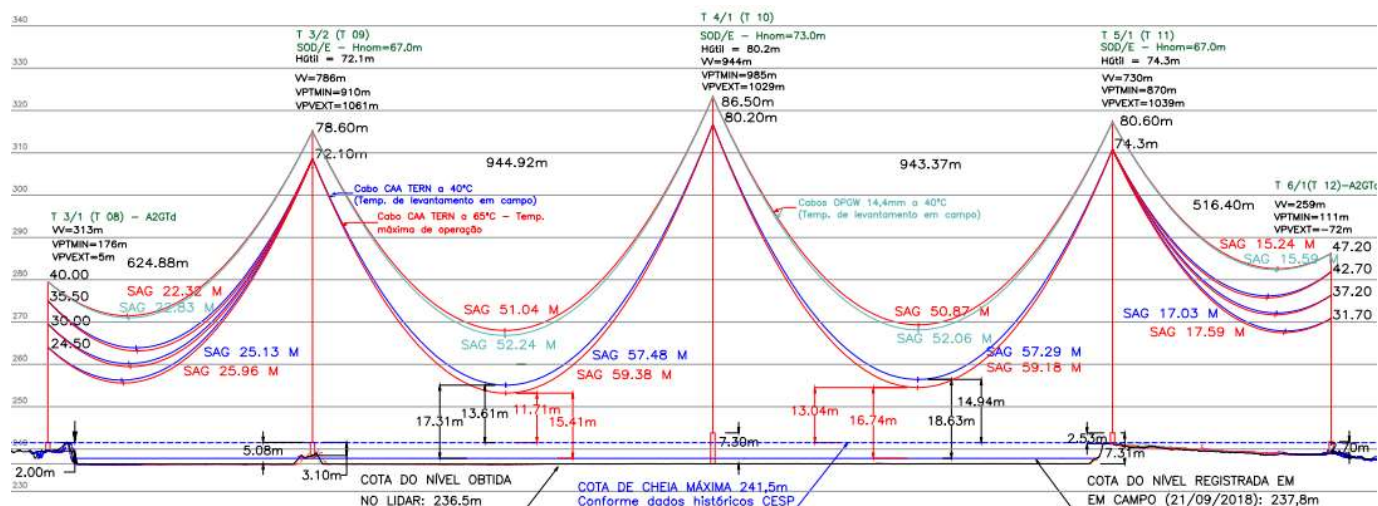


Figura 2 - Perfil do tramo da Travessia (condição atual) sobre Rio Paraná.

O boletim meteorológico indicava que uma intensa tempestade se originara na fronteira MS/SP, associada ao encontro de uma frente fria vinda do Sul/Centro Oeste com uma massa de ar quente na região. Os danos na vizinhança da travessia, os registros de tornados e tempestades atmosféricas em localidades próximas e as análises meteorológicas dos dados coletados das estações anemométricas no entorno evidenciaram a ocorrência de ventos de alta intensidade numa trajetória bem definida.

Alguns registros dos colapsos nas estruturas são indicados nas figuras a seguir.



Figura 3 – Colapso da torre T09 (3/2).



Figura 4 – Colapso da torre T10 (4/1).

As fundações de ambas as torres também sofreram danos no fuste, sendo necessária a reparação e reforço de todos os pilaretes. Com relação à estrutura SOD/E - T 5/1 (T11), a mesma não sofreu qualquer avaria. Nas torres de ancoragem T3/1 (T8) e T6/1 (T12), tipo A2GTd, houve apenas danos leves em algumas cantoneiras das mísulas.

3 CONDIÇÕES DE PROJETO ORIGINAL vs. PROJETO DE RECOMPOSIÇÃO EMERGENCIAL

Devido às dimensões da travessia e impossibilidade de área para implantação de torres de emergência, a recomposição provisória com estas torres não se mostrara viável, o que agravou o desafio de reconstrução e logística, pois o restabelecimento precisou ser feito com torres definitivas. Contudo, somente havia 1 torre de travessia sobressalente, exigindo a fabricação de uma nova estrutura em regime de total urgência.

Além disso, o condutor aplicado na travessia era especial, CAL-A 900 MCM (Alumínio-liga com alma de aço), devido à sua menor relação Peso/C.Ruptura para atendimento ao critério de flecha e distância vertical de segurança ao Rio. Contudo, a reserva técnica deste cabo era insuficiente para cobrir os dois circuitos do tramo e, tampouco, havia disponibilidade para fabricação em tão curto espaço de tempo. Assim, o restabelecimento precisou então ser feito com o condutor convencional da LT, o CAA TERN. Apesar dos desafios, em apenas 65 dias corridos, todo o tramo foi reconstruído e a LT reenergizada.

Para viabilizar a recomposição emergencial da travessia, à época do evento, foi desenvolvido um estudo específico [2] onde foram avaliadas e definidas condições de projeto diferenciadas das originalmente adotadas, visando atender ao critério de distância mínima possível cabo-rio e limites de tração do condutor alternativo. As principais características do Projeto Original e da Recomposição, são apresentados na Tabela 1.

Importante destacar que o trecho de travessia apresenta configuração em circuito duplo horizontal, com feixe de 2 subcondutores por fase, em disposição vertical, com espaçamento entre eles de 0,457m.

Tabela 1 – Principais Características do Projeto Original [1] e de Recomposição [2]

Característica	CAL-A 900MCM Projeto Original [1]	CAA TERN-795MCM Projeto Recomposição [2]	PR CAA Dotterel Projeto Original [1]	OPGW SM 14,4 Recomposição [2]
Área Alumínio / Total (mm ²)	456,03 / 487,20	402,82 / 430,65	89,64 / 141,6	120
Peso (kgf/m)	1,510	1,333	0,657	0,700
C.Ruptura (kgf)	17.750	10.014	7.530	11.310
Diâmetro (mm)	28,74	27,01	15,42	14,40
Tração Horizontal EDS (kgf)	3.195 (18%)	2.504 (25%)	1.440 (19%)	1.540 (13,6%)
Flecha (m)	53,5 (EDS Final) 56,52 (T.Max)	60,6 (EDS Final) 62,11 (T.Max)	51,7 (EDS Final)	52,1 (EDS Final)

Como o cabo condutor CAA TERN apresenta uma flecha maior, o mesmo deveria ser aplicado com tração superior à tipicamente utilizada, o que seria aplicável naquele momento, considerando o caráter provisório da recomposição.

4 INVESTIGAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE PROJETO DA TRAVESSIA E ATUALIZAÇÃO DE CRITÉRIOS

O Edital ANEEL especificava um vento com período de retorno de 150 anos para as LTs 230kV. Contudo, como o trecho de travessia foi desenvolvido em circuito duplo, a concessionária desenvolveu o projeto da travessia com período de retorno de 500 anos, tanto para o cálculo mecânico dos condutores, como para o dimensionamento estrutural. O colapso estrutural precisava, então, ser minuciosamente investigado e analisado, mesmo porque, na recomposição, foi aplicada a mesma torre do projeto de travessia original.

Por estes aspectos, a concessionária desenvolveu uma extensiva e abrangente análise da travessia visando sua requalificação quando da recomposição definitiva. Neste estudo, foram considerados dados atualizados de mapeamentos e estatísticas de vento, reavaliação das pressões de vento atuantes, projeto eletromecânico, bem como a análise mecânica/estrutural com modelagem da torre e novas árvores de carregamentos.

Como o condutor aplicado na recomposição não era o original do projeto de travessia, resolveu-se incorporar ao estudo a avaliação da condição atual de campo. Para isto, foi utilizado o levantamento LiDAR, o que permitiu a

obtenção fidedigna das condições de tração e *clearance* dos cabos. Avaliou-se também a coordenação de isolamento e novo estudo de sistema de amortecimento.

4.1 VELOCIDADES DE VENTO E PRESSÕES DE VENTO ATUANTES

As velocidades de vento e as resultantes isotacas foram definidas considerando o modelo desenvolvido pelo CEPEL e modificado segundo as regras de homogeneização estabelecidas pelas agências competentes, visando resultados mais seguros. Desta forma, os principais mapeamentos de isotacas utilizados são indicados na Figura 5, sendo obtidas as seguintes velocidades básicas de vento referentes ao terreno Categoria B:

- 500 anos / 10 min – $V_b = 125 \text{ km/h}$
- 500 anos / 3 s – $V_b = 200 \text{ km/h}$

Os resultados do mapeamento correspondem tipicamente a terreno do tipo B. No entanto, o terreno local é caracterizadamente do tipo A. Vale observar que os resultados derivados dessa modificação produzem modesto efeito, quando a Norma IEC 60826 é normalmente aplicada - eleva-se a velocidade de 8%, mas os fatores de rajada são diminuídos em quase a mesma proporção. Assim, para o estudo em questão, aplicou-se o fator de correção K_R de 1,08 também no vento de rajada.

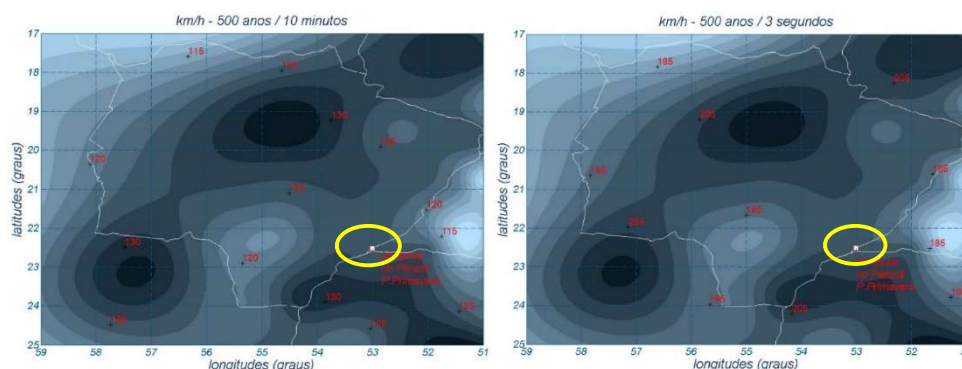


Figura 5 – Mapas de Isotacas do entorno da Travessia.

As velocidades de vento indicadas no Projeto Básico [1] e as novas obtidas nos mapeamentos são indicadas a seguir:

Período de Retorno	Tempo de Média das Leituras	Velocidades de Vento (V_B / V_R)* [km/h]	
		Projeto Básico [1]	Atualizado
500 anos	10 minutos	115 / 124	125 / 135
500 anos	3 segundos	210 / 231**	200 / 216

* V_B Velocidade Básica. V_R Velocidade corrigida para terreno Categoria A.

** No Projeto Básico [1], foi utilizado um fator de segurança de 10% para o vento de 3s, considerando a região como área de probabilidade de ocorrência de ventos de alta intensidade.

As tabelas a seguir apresentam as Pressões Dinâmicas de Referência e Pressões de Vento do Projeto Básico, os valores recalculados a partir das velocidades do Projeto Básico (mas considerando parâmetros reais) e os calculados a partir das velocidades de vento atualizadas, conforme IEC 60826 [4]:

Condição de Vento	Pressões Dinâmicas de Referência [kgf/m ²]		
	P. Básico	Recalculado	Atualizado
500 anos - 10 min (q_0)	74,3	72,3	85,4
500 anos - 3s (q)	257,3	250,1	218,7

Condição de Vento	Pressões de Vento Atuante [kgf/m ²]		
	Projeto Básico	Recalculado	Atualizado
Condutor - PV_C	126,3	130,4	154,2
Para-raios - PV_{PR}	130,3	134,0	158,5
Cadeia - PV_{CAD}	205,1	205,6	243,1

Importante destacar que para a definição do parâmetro G_c [4], associado à altura dos cabos condutores, foram consideradas as elevações de pilarete real com relação ao nível da cota Rio de 236,7m.

4.2 CONDIÇÕES DE PROJETO

4.2.1 Distância de Segurança

Condição de Nível do Rio *	CAL-A 900MCM (Projeto Original) [1]	CAA TERN 795MCM (Projeto Provisório) [2]	CAA TERN 795MCM (Condição Atual Campo)
<i>Clearance</i> Nível Cheia Normal (Cota= 237,8 m)	14,7 m	8,4 m	15,4 m
<i>Clearance</i> Nível Cheia Máxima (Cota= 241,5 m)	11,0 m	4,7 m	11,7 m

A cota de cheia "Normal" do Rio Paraná, de 237,8 m, obtida nos levantamentos de campo. Cota de Cheia Máxima, de 241,5m, correspondente ao maior nível altimétrico de acordo com os dados históricos da UHE Porto Primavera.

A distância de segurança do CAA TERN na temperatura máxima de 65°C, sob cheia máxima do Rio, é de 11,7 m, compatível com a condição original de projeto com CAL-A 900MCM, conforme [1]. Constata-se o atendimento para a condição de mastro de navegação com altura de até 8,6m (*clearance* H+3,1m), de acordo com a ABNT NBR-5422.

4.2.2 Tração Cabo Condutor

Tabela 2 – Resumo das Trações Horizontais dos Cabos Condutores, condição final com creep

Condição	CAL-A 900MCM Projeto Original [1]	CAA TERN 795MCM Projeto Provisório [2]	CAA TERN 795MCM Condição Atual Campo
EDS	3.195 kgf (18% CR)	2.504 kgf (25% CR)	2.681 kgf (26,8% CR)
Vento Extremo (T=500anos)	7.759 kgf	6.491 kgf	6.647 kgf
Temp. Mín.	3.404 kgf	2.684 kgf	2.874 kgf

O cabo CAA TERN está aplicado em campo com $H_{EDS} = 2.681\text{kgf}$ (final com *creep*), superior à tração definida no Projeto de Recomposição [2] ($H_{EDS}=2.504\text{ kgf}$), mas, ainda assim, inferior ao cabo original CAL-A. Desta forma, com relação aos carregamentos aplicados às estruturas no tramo (torres de suspensão na condição de cabo rompido e torres de ancoragem), observa-se a redução das solicitações mecânicas com o uso do CAA TERN, se comparado à situação inicial da travessia.

A condição de tracionamento em EDS de 26,8% é superior à tipicamente utilizada em projetos com cabos ACSR. Contudo, isto não significa uma situação impeditiva de aplicação, considerando as recomendações CIGRÉ TASK FORCE B2.11.04 para cabos tipo ACSR, mas, sim, que requer a aplicação de um sistema de amortecimento especial e eficaz para esta situação, conforme apresentado no Item 4.2.4

4.2.3 Tração Cabo Para-Raios

Os cabos para-raios indicados no projeto original são CAA Dotterel. Contudo, na fase de operação, os mesmos haviam sido substituídos pelos cabos OPGW SM 14,4.

Tabela 3 – Resumo das trações horizontais do cabos para-raios, na condição final com creep

Condição	CAA Dotterel Projeto Original [1]	OPGW SM 14,4 Condição Atual Campo
EDS	1.440 kgf	1.540 kgf
Vento Extremo (T=500anos)	4.185 kgf	2.767 kgf
Temp. Mín.	1.496 kgf	1.544 kgf

O cabo OPGW implica em redução das solicitações mecânicas nas estruturas de ancoragem sob condição de vento e nas suspensões sob condição de rompimento.

4.2.4 Sistema de Amortecimento

Conforme indicado anteriormente o cabo apresenta uma condição de tração em EDS final de 26,8% C.R, acima da típica considerada nos projetos. O parâmetro H/W (sob tração inicial) obtido para esta tração é de 2.137 m e o fator LD/m é de 19,1 m³/kg, o que coloca esta travessia na "Zona Especial de Aplicação", ou seja, nível de severidade quanto aos riscos de fadiga do condutor associados a vibrações eólicas.

Desta forma, não obstante à condição especial de tração do condutor, tendo vista o vão de travessia de Rio, foi desenvolvido e aplicado sistema de amortecimento específico de modo a assegurar o adequado desempenho/performance quanto ao possível fenômeno de fadiga dos condutores associado a vibrações eólicas.

Conforme configuração indicada na Figura 6, o sistema aplicado consiste em 2 amortecedores do tipo *Stockbridge* junto às cadeias e aos 2 espaçadores poliméricos fase-fase instalados ao longo do vão (estes para evitar curto-circuito fase-fase devido ao balanço assíncrono entre fases). Destaca-se que dois vãos ainda estavam sem os amortecedores intermediários instalados. Portanto, os mesmos foram os selecionados devido à condição potencialmente mais crítica. Por oportuno, ressalta-se que todos amortecedores serão devidamente instalados.

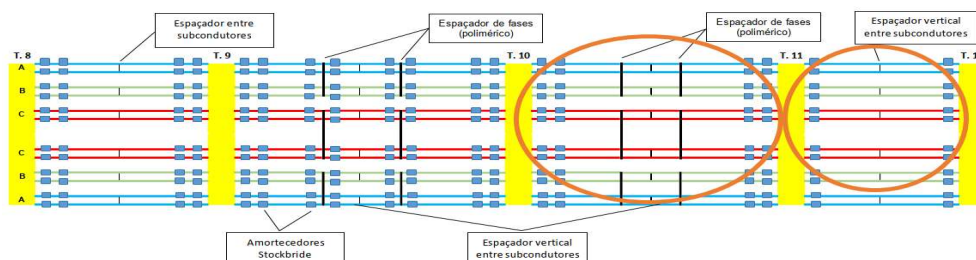


Figura 6 – Sistema de amortecimento do tramo de travessia.

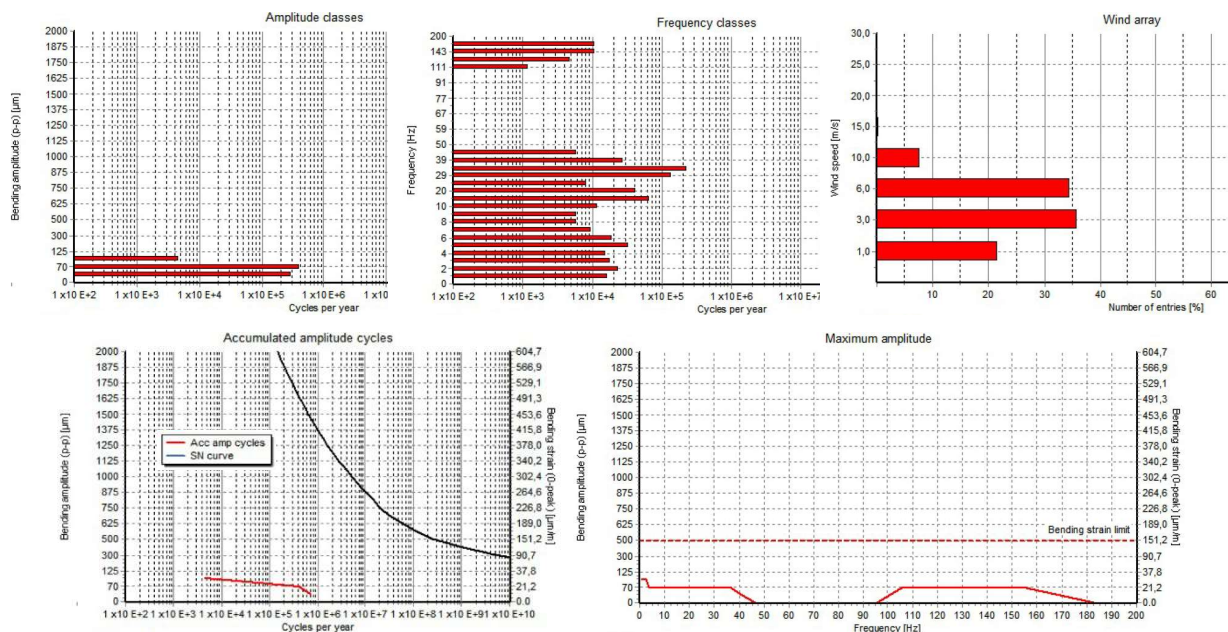


Figura 7 - Resultados das medições. Aplicação das metodologias CIGRE (Curva S-N) e EPRI/IEEE (amplitudes)

Com base nos resultados obtidos, foi possível estabelecer as seguintes análises:

- ✓ O sistema de amortecimento apresentou amplitudes com valores abaixo de 125 μm (pico a pico);
- ✓ Os ventos predominantes entre 3 e 6 m/s para 70% do tempo e 22% do tempo menores da ordem de 1 m/s.
- ✓ Com base na metodologia CIGRE curva S-N, tem-se uma expectativa de tempo de vida útil superior a 100 anos.
- ✓ Analisando a partir das metodologias EPRI e IEEE, tem-se uma situação sem risco, para as amplitudes medidas.
- ✓ Pela análise das 3 metodologias consideradas, o sistema de amortecimento é eficaz para controlar as vibrações eólicas no feixe de condutores. Portanto, a condição de tração não representa uma situação de risco para o tramo.

4.3 CARREGAMENTO MECÂNICO

Os carregamentos mecânicos das estruturas foram calculados considerando as aplicações reais em campo:

Característica	Projeto Original	T3/2	T4/1	T5/1
Vão Médio	950m	784m	944m	729m
Vão peso (com Vento)	1000m	Cond = 1067m PR = 988m	Cond = 1031m PR = 1022m	Cond = 1046m PR = 954m
Vão peso (sem Vento)	1000m	Cond/PR = 905m	Cond/PR = 985m	Cond/PR = 860m
Altura Nominal Torre	73,0m	67,0m	73,0m	67,0m
Altura útil real	Cond = 73,0m / PR=79,7m	Cond=72,1m / PR=78,4m	Cond=80,2m / PR=86,5m	Cond=74,3m / PR=80,6m
Elevação da Torre (cota Rio)	0	5,1m	7,3m	7,3m
Extensão / Pés	Ext 26,0m / Pés 13,5m	Ext 26,0m / Pés 7,5m	Ext 26,0m / Pés 13,5m	Ext 26,0m / Pés 7,5m

Foram desenvolvidas novas árvores de carregamento considerando os seguintes aspectos:

- ✓ Premissas e critérios de cálculo condizentes com as metodologias aplicadas nos projetos atuais;
- ✓ Condição real de esticamento dos cabos da travessia: CAA TERN e OPGW;
- ✓ Incluídas hipóteses de carga de vento Longitudinal, Vento de Alta Intensidade a 45° e Contenção de Cascata;
- ✓ Em todas as hipóteses, foram consideradas cargas longitudinais decorrentes de desbalanceamento de tração sob condição do respectivo vento atuando nos cabos, ou EDS no caso das hipóteses sem vento;
- ✓ Novas pressões de vento sobre condutor, PR e painéis das estruturas.
- ✓ As alturas dos painéis consideraram a elevação real das estruturas com relação à cota leito normal do Rio (ΔH).
- ✓ Foram desenvolvidos dois conjuntos de árvores de carregamento refletindo as diferentes aplicações das torres:
 - A - Correspondente à estrutura T4/1.
 - B - Representativa (cumulativamente) das estruturas T3/2 e T5/1.

De forma a permitir a análise estrutural da Torre SOD/E e a avaliação específica das possíveis violações e impactos das novas condições de carregamento, foram analisados os seguintes cenários de carga:

Condição 1 – Projeto Básico Original

Condição 2 - Condição Real (não considerada, devido aos resultados da Condição 3)

- Critérios de Cálculo do Projeto Básico
- Condição real de esticamento dos cabos (CAA TERN e OPGW)
- Pressões de Vento do Projeto Básico

Condição 3 - Condição Real com Critério de Cálculo Revisados

- Critérios de Cálculo dos esforços revisados
- Condição real de esticamento dos novos cabos (CAA TERN e OPGW)
- Pressões de Vento recalculadas, mas com mesmas Velocidades de Vento do Projeto Básico

Condição 4 - Condição Real com Dados de Vento Atualizados

- Critérios de Cálculo dos esforços revisados
- Condição real de esticamento dos novos cabos (CAA TERN e OPGW)
- Pressões de Vento recalculadas com novas Velocidades de Vento

Tabela 4 – Comparativo das Principais Cargas Obtidas em cada Condição

Hipótese	Carregamento	Projeto Original	Condição 3	Condição 4
V. Máximo Transversal	Transversais Cond / PR	7047 / 1905 kgf	6894 / 1822 kgf	8152 / 2155 kgf
	Longitudinal Cond / PR	0	954 / 492 kgf	1436 / 597 kgf
	q0	74,3 kgf/m ²	72,3 kgf/m ²	85,4 kgf/m ²
V. Alta Intensidade Transversal	Transversais Cond / PR	0	3484 / 850 kgf	3049 / 744 kgf
	Longitudinal Cond / PR	0	90 / 177	100 / 180
	qi	257,3 kgf/m ²	250,1 kgf/m ²	218,7 kgf/m ²
Contenção Cascata	Longitudinal Cond / PR	-	6166 / 1771	6380 / 1848 kgf

4.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

A Memória de Cálculo estrutural original da torre SOD/E não constava da documentação de projeto original, inclusive não sendo obtida junto a fabricantes e projetistas que atuaram no projeto. Segundo informado no Projeto Básico, este foi um projeto estrutural aproveitado da torre tipo SOD, circuito simples 500kV conversível em c. duplo 230kV.

Desta forma, tornou-se de fundamental importância a análise/verificação estrutural considerando o desenvolvimento de hipóteses de carregamento baseadas em critérios atuais e árvores de carregamento condizentes com a realidade de aplicação da travessia, de forma a subsidiar uma avaliação estrutural completa.

A torre SOD/E foi modelada a partir dos desenhos originais da torre, bem como considerando as peças/cantoneiras efetivamente existentes em campo. A memória de cálculo estrutural foi desenvolvida considerando coeficientes de minoração de resistência atualmente empregados. Foram analisadas inicialmente as condições de carregamento 1, 3 e 4 e seus respectivos impactos em termos de quantidade de reforços necessários para alcançar a resistência necessária. Após a avaliação dos resultados optou-se pela adoção do carregamento 4, pois este apresentava uma relação entre aumento de confiabilidade e viabilidade mais atraente.

As análises estruturais realizadas mostraram que os montantes das torres SOD/E estavam perfeitamente adequados para suportar as cargas advindas do carregamento 4 (Condição real com dados de vento atualizados) sendo que os problemas de resistência da estrutura se concentravam em poucas diagonais da torre, uma barra de mísula e algumas peças de contraventamento. As análises também detectaram que o ponto crítico daquelas estruturas se concentrava em uma diagonal da base intermediária da torre (especificamente a barra B1DT/L mostrada na figura abaixo) que apresentou uma taxa de utilização superior a **350%** em relação à sua resistência mecânica para a Condição 4 de carregamento. Foi observado que esta barra constava na silhueta original da Torre SOD/E como um perfil duplo: 2 L 76x76x4.8 (aço ASTM A36), porém no desenho de detalhamento da estrutura a referida barra foi detalhada como perfil simples: 1 L 76 x76 x 4.8 (aço ASTM A36). Provavelmente durante o evento de tormenta ocorrido, a barra B1DT/L foi a primeira a falhar culminando com o colapso total das estruturas.

Esta hipótese é corroborada pela análise feita inicialmente pela equipe de O&M que atuou na recuperação, bem como pode ser observado na foto da Figura 3, onde se verifica a torre inteira na parte superior a esta posição.

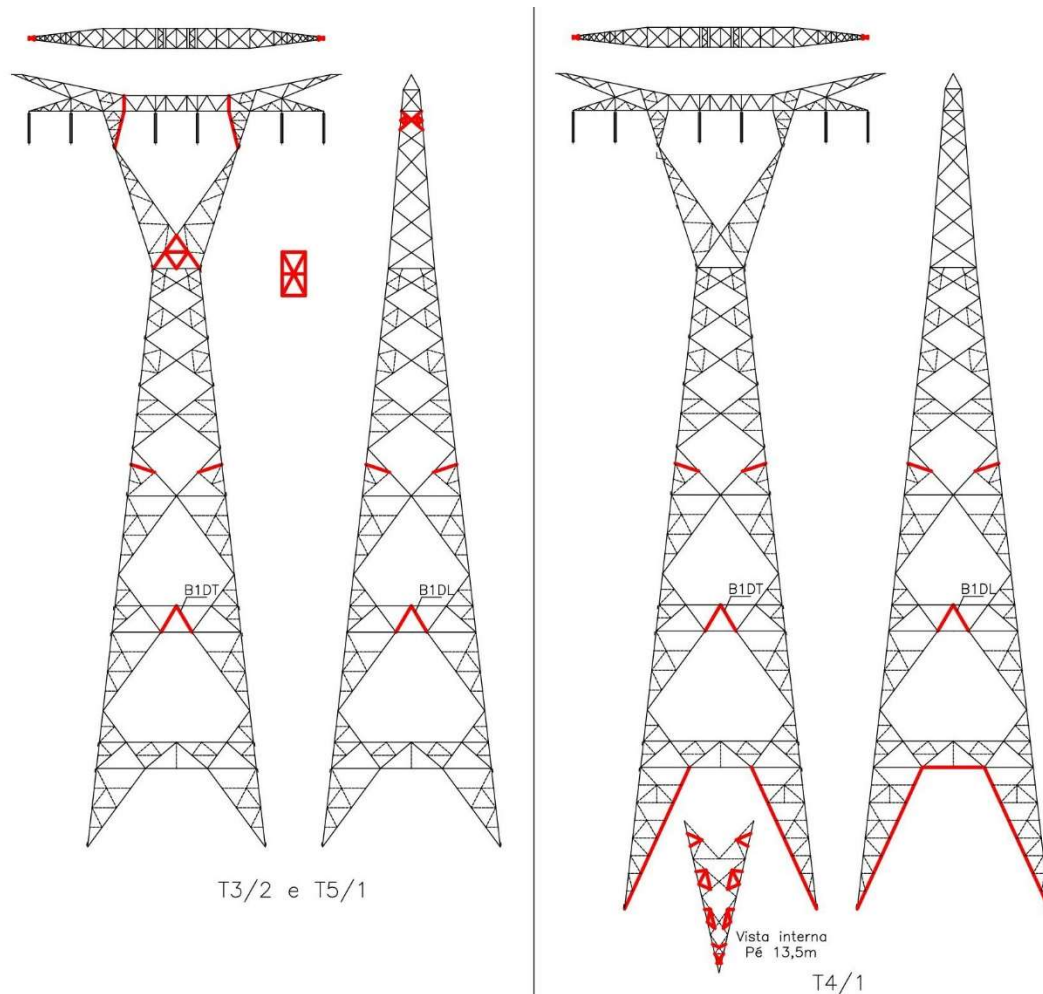


Figura 8 – Silhueta com Indicação dos Reforços nas torres T3/2+T5/1 e T4/1

A Figura 8 apresenta a localização dos principais reforços propostos e executados pela concessionária. Basicamente, os reforços consistiram em duplicação de perfis cantoneiras, adição de contraventamentos para redução do comprimento de flambagem, troca de alguns perfis de contraventamento e substituição de alguns parafusos de qualidade ASTM A394 tipo 0 por parafusos ASTM tipo 1, mais resistentes. Os reforços foram idealizados visando sempre a maior facilidade de sua montagem em campo. Nos desenhos de detalhamento foram também adicionadas instruções para montagem dos mesmos. Todos os perfis cantoneiras utilizados nos reforços foram em aço ASTM A572 grau 50, qualidade superior ao aço utilizado originalmente no projeto da estrutura.

Tabela 5 – Resumo das superações e Reforços para as Torres 3/2 + 5/1 e T 4/1

Barra	Torre	Perfilado	Limites Ultrapassados	Proposta de Reforço	% Ocupação	
					T3/2 e T5/1	T4/1
T17	T3/2 e T5/1	L 102 x 102 x 7,9 S	Comp. / Tração	Duplicação L 102 x 102 x 7,90 S + L 100 x 100 x 8,00 H	0,97	0,87
M12	T3/2 e T5/1, T4/1	L 51 x 51 x 4,8 S	Esmagamento	Substituição por L 75 x 75 x 6,00 H	1,52	1,52
G2	T3/2 e T5/1	L 102 x 102 x 7,9 S	Comp. / Tração	Duplicação L 102 x 102 x 7,90 S + L 100 x 100 x 8,00 H	1,00	1,00
G11L	T3/2 e T5/1	L 76 x 76 x 6,4 S	Comp.	Redução do comprimento de flambagem	1,03	1,01
V3T	T3/2 e T5/1	2L 102 x 102 x 9,5 S	Comp.	Redução do comprimento de flambagem	0,92	0,92
B1DT	T3/2 e T5/1, T4/1	L 76 x 76 x 4,8 S	Comp. / Tração / Esmagam.	Duplicação L 76 x 4,8 S + L 76 x 4,8 H	4,18	4,18
B1DL	T3/2 e T5/1, T4/1	L 76 x 76 x 4,8 S	Comp. / Tração (apenas 3/2 e 5/1) / Esmagam.	Duplicação L 76 x 4,8 S + L 76 x 4,8 H	4,07	4,07
R104	T3/2 e T5/1, T4/1	L 64 x 64 x 4,8 S	Comp. / Esmagam.	Substituição por L 64 x 64 x 6,40 H	1,13	1,11
B2FL	T4/1	L 102 x 102 x 7,9 H	Comp. / Cisalhamento	Redução do comprimento de flambagem	1,01	1,16
P135T	T4/1	L 102 x 102 x 9,5 H	Comp. / Cisalhamento	Redução do comprimento de flambagem	-	1,08
P135L	T4/1	L 102 x 102 x 9,5 H	Comp. / Cisalhamento	Redução do comprimento de flambagem	-	1,06

Após a definição dos reforços para as estruturas existentes na travessia e visando futuras utilizações daquela torre, foi também realizado uma atualização do projeto da Torre SOD/E para esta nova condição de carregamento. Nesta atualização de projeto foram incorporados todos os reforços necessários à estrutura, sendo utilizados perfis cantoneiras em aço ASTM A572 grau 50 disponíveis no mercado. O projeto da Torre SOD/ER (SOD/E reforçada) levou também em conta a intercambiabilidade entre as peças das duas versões de projeto da estrutura.

5 SOLUÇÕES DE MANUTENÇÃO EM CAMPO

As soluções de melhoria estrutural foram viabilizadas em campo através da aplicação de técnicas de manutenção para substituição/complementação de cantoneiras com a **LT em operação**. A equipe de O&M participou da definição dos reforços a serem projetados, bem como a metodologia de aplicação em campo, devido às condições específicas da instalação: estruturas de elevado porte, condição sob operação e acesso às torres exclusivamente por barco (exceto a da margem direita do Rio). Um desafio de logística e manutenção.

Neste sentido, os reforços foram planejados de modo a facilitar o trabalho e atender aos requisitos de segurança dos colaboradores, com a duplicação de barras, evitando-se a substituição de barras, a aplicação de parafusos adicionais onde necessário, sendo substituído apenas um por vez.

Em alguns pontos de reforço, foi necessário acoplar cantoneiras temporárias para equilibrar os esforços durante as movimentações, com o devido suporte de análise estrutural, para determinação da Tração/Compressão na barra a sofrer intervenção. Com a definição destes esforços, a equipe de O&M determinou a sequência de instalação dos mesmos, bem como a ordem de sua execução.

Como as estruturas são semelhantes, apesar da aplicação ser diferente, foi possível padronizar as manobras dentro de um Plano Específico de Trabalho (PET), com o detalhamento das condições de segurança, medidas de proteção, colaboradores, materiais e recursos, bem como a sequência e metodologia de execução dos trabalhos. Desta forma, foi possível executar todos os reforços indicados no projeto executivo, sem acidentes e de forma plenamente satisfatória.

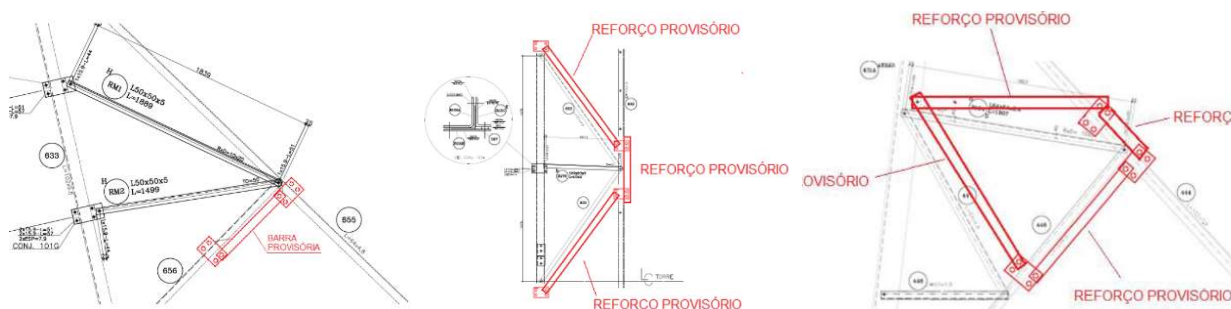


Figura 8 – Exemplos de aplicação de reforços provisórios.

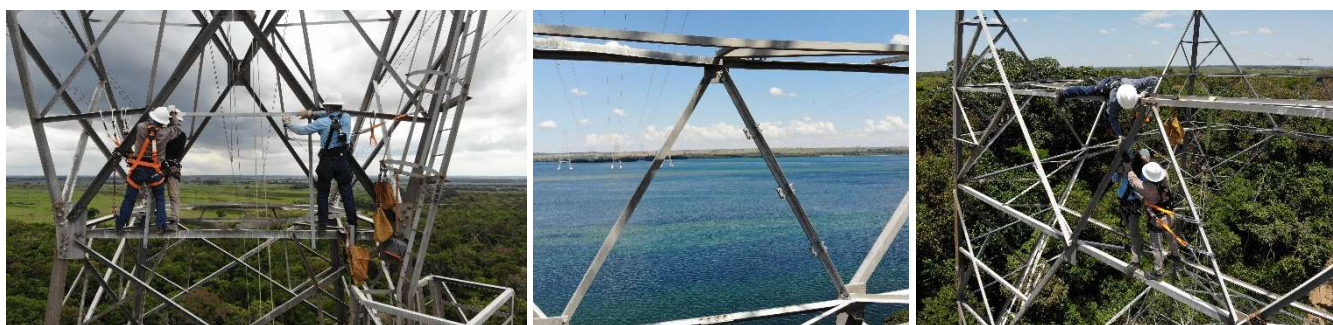


Figura 8 – Aplicação dos reforços estruturais.

Outro fator importante, foi o monitoramento das condições climáticas durante os trabalhos. A velocidade do vento foi limitada em 5 m/s, para manter o carregamento das barras em níveis baixos e aumentar a segurança durante as intervenções.

6 CONCLUSÕES

As novas condições e critérios de dimensionamento aplicados ao projeto eletromecânico e estrutural consolidaram importantes melhorias e aprimoramentos à Travessia, visando sua adequação quanto ao desempenho e suportabilidade frente aos fenômenos atmosféricos mapeados. Neste sentido, foram viabilizadas soluções especiais de manutenção para adequação de elementos estruturais específicos nas torres em campo, estando a LT em operação. Foram também avaliadas e monitoradas as condições reais de campo de forma a verificar o atendimento quanto aos parâmetros de projeto, bem como aos requisitos de confiabilidade operativa e segurança da instalação.

Destaca-se que sistemas de monitoramento de parâmetros meteorológicos e de vibração dos cabos estão previstos para serem implementados numa segunda fase, visando a certificação das grandezas e resultados obtidos.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] "Projeto de Utilização de Estruturas de Circuito Duplo em 230kV na Travessia do Rio Paraná", ref.: TACTA 101-4-009, Rev.04, 09/03/2006.
- [2] "Compatibilização de Estruturas", ref.: TD1067-0001, rev. 00, 09/12/2015. Desenvolvido por Marte Engenharia.
- [3] "Projeto Básico", ref. 101-4-005 - "Memorial do Projeto Básico Elétrico", Vol. A (230kV).
- [4] IEC 60826 - Design criteria of overhead transmission lines.
- [5] "Nota Técnica Engenharia SGBH - Avaliação da Travessia do Rio Paraná", ref.: PPTE SGBH-ENG-LT-RT-028 R2 - PPTE, Rev.2.
- [6] "Colapso Estrutural na Travessia do Rio Paraná - Velocidades de Vento e Demais Considerações", BATÁVIA Engenharia e Consultoria.
- [7] Torre Tipo SOD/E - Árvores de Carregamento Revisadas - Condição 3 e 4. Engenharia State Grid.
- [8] Torre Tipo SOD/E - Memórias de Cálculo para as Condição de Carregamento 1, 3, 4A e 4B, SAE TOWERS / VERSÁTIL Engenharia
- [9] "Avaliação do condutor "TERN" na travessia do rio Paraná (SP – MT)", Larroc Consultoria em Transmissão.

8 DADOS BIOGRÁFICOS



(1) ROBERTO L. S. NOGUEIRA

Engenheiro Eletricista, graduado em 1999 pela UFRJ, com M.Sc. em 2006 pela COPPE/UFRJ em Sistemas de Potência. Atuou no desenvolvimento de Projetos Básico/Executivo e Estudos de importantes LTs no Brasil e exterior e participação em P&Ds, na Fluxo Engenharia e SNC-Lavalin/Marte Engenharia. Gerência Técnica e de Implantação de Projetos de Transmissão 500kV na Isolux Concessionaries. Como Gerente de Engenharia na StateGrid, participou do projeto da LT UHVDC ± 800 kV Xingu-Rio e das LTs/SEs Sistema 230/500kV Teles Pires II. É sócio da empresa PowerSys Engenharia e, no presente, atua na Engenharia de LTs na ENEL.

(2) DANIEL MOURA

Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, atuando há 11 anos no Setor Elétrico de Transmissão de Energia, tendo participado na implantação de diversas Linhas de Transmissão pelo Brasil. Atualmente, ocupa o cargo de Engenheiro de Manutenção de Linhas de Transmissão da State Grid. Possui experiência em projetos básico e executivo de linhas de transmissão, bem como na manutenção de linhas em 138 a 500 kV, incluindo HVDC.

(3) VICTOR PRANGIEL DE MENEZES

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, com atuação ao longo de 8 anos nas áreas de ofertas e de projetos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica. Experiência em projetos HVAC e HVDC atuando nas etapas de pré-leilão, construção e apoio às equipes de operação e manutenção. Ocupação atual como engenheiro eletricista na equipe de Engenharia do Proprietário da empresa State Grid Brazil Holding.

(4) ROGERIO PEIXOTO GUIMARÃES

Engenheiro Civil, pós-graduado em Estruturas pela UFMG, tendo sólida carreira desenvolvida ao longo de mais de 35 anos de mercado com forte atuação na área de Estruturas Metálicas para Linhas de Transmissão e Subestações. Ocupa atualmente o cargo de Gerente de Engenharia de Estruturas e Estação de Testes da SAE Towers Brasil. Possui ampla experiência em projeto e testes de torres metálicas treliçadas, tendo projetado estruturas para os principais sistemas de transmissão em HVAC e HVDC do Brasil. Atua de forma ativa no Cigré Brasil e é atualmente o Coordenador nacional do Grupo GT-B2.08 Estruturas do Comitê de Linhas Aéreas.

(5) AMAURI ALVES MENEZES JR

Formação: Engenharia Elétrica UFRJ /1968, Mestrado Rensselaer Polytechnic Institute/1969, Pós-mestrado, Curso de Especialização de Administração de Empresas (PUC - RJ, 1972). Empresas onde trabalhou: CHESF 1967 - 1975, ELETROBRÁS 1975 - 1978, CEPEL 1978 - 1993 e BATÁVIA Engenharia e Consultoria 2000 - até hoje

(6) ANTONIO DE PADUA VIANA

Engenheiro Civil, Diretor e Fundador da Versátil Engenharia de Torres, especialista em estruturas de aço pela UFMG com mais de 40 anos de atuação no mercado. Trabalhou como Engenheiro Especialista e Gerente de Projetos por 18 (dezoito) anos na SBE -ABB - ASEA BROWN BOVERI, atual SAE Towers e maior fabricante de torres do mundo na época. Possui mais de 15.000 (quinze mil) torres de Linhas de Transmissão Elétrica com projetos de sua autoria construídas (fábricas e montadas) em mais de 20 países.

(7) WALLACE SILVA CASTRO

Engenheiro Civil, graduado pelo Centro Universitário Newton Paiva, atuando ao longo de 10 anos na área de Estruturas Metálicas para Linhas de Transmissão e Galpões Industriais. Ocupa atualmente o cargo de Engenheiro Especialista na Versátil Engenharia de Torres desenvolvendo projetos e soluções para Torres de Transmissão e Subestações.

(8) KELLY CHAN LAM

Engenheira Eletricista, 1999 pelo CEFET/RJ. MBA Executivo em Gestão de Negócios do Setor Elétrico, 2019 pela FGV/RJ. Atualmente na Coordenação de Engenharia Eletromecânica de projetos de Linhas de Transmissão na Elecnor. Possui experiência profissional nas áreas de Implantação e Engenharia de Linhas de Transmissão em HVDC e HVAC, tendo atuado na State Grid nas Gerências de Engenharia e O&M; em Projetos Eletromecânicos de LTs em 230 a 750 kV, no Brasil e Canadá na Fluxo Engenharia e SNC-Lavalin/Marte Engenharia e; projetos "Luz para Todos" e "DianE - Sistema de Análise e Diagnóstico de Equipamentos" no CEPEL.

(9) RANDER ANTONIO DE ALMEIDA

Técnico em Eletrotécnica no Senai, tendo sólida carreira em manutenção preventiva e corretiva em Linhas de Transmissão de 138 a 500 kV, ocupando o cargo de Supervisor de Manutenção de Linhas de Transmissão há 13 anos. Trabalhando nas empresas PPTE, ITATIM e atualmente, BTE e JTE.