



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

GLT-03
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**LT 500 kV CACHOEIRA PAULISTA-ADRIANÓPOLIS
UMA ELEVADA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO EM UM CORREDOR CONGESTIONADO
ASPECTOS MECÂNICOS**

**André Pinto
João B. G. Ferreira da Silva
Rania Carla Peixoto Amaro*
Roberto Moreira Perona
Quintas & Quintas / SOLIKAP**

**Cláudia M. Fernandes de Oliveira
Jorge M. V. Viana
Paulo C. V. Esmeraldo
Victor Hugo C. Ricco
FURNAS**

RESUMO

Nos tempos atuais, é por demais conhecida a dificuldade de obtenção de corredores para a implantação de novas linhas de transmissão. Esta situação se agrava quando o corredor almejado se encontra na região sudeste, particularmente no congestionado eixo Rio-São Paulo. A sociedade, no entanto, continua a demandar mais e mais energia nesta região do Brasil obrigando as concessionárias da região a buscarem novos corredores para a transmissão de energia. Dentro deste contexto, surge o projeto da LT 500 kV Cachoeira Paulista - Adrianópolis. Os trabalhos para implantação desta LT, os aspectos e detalhes de projeto, os ensaios eletromecânicos executados e os resultados obtidos são o que se apresenta neste informe.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão. Feixe expandido. Estruturas autoportantes. Corredores congestionados.

1.0 - INTRODUÇÃO

A obtenção de novos corredores para transporte de energia tem-se tornado uma barreira quase intransponível para a maioria das empresas de energia elétrica do mundo. O nível crescente de exigências ambientais, aliados aos questionamentos e às disputas pelo direito de passagem, fazem com que as empresas tentem, hoje, otimizar ao máximo os novos corredores viabilizados ou mesmo os já existentes.

No que se refere às linhas existentes, recente pesquisa efetuada pelo grupo de trabalho WG08 do comitê de estudos B2 – Linhas Aéreas de Transmissão da Cigré, revelou que a maior necessidade apontada pelas mais de 60 empresas em todo o mundo que participaram da pesquisa, é o do aumento da potência transmitida no corredor (uprating). Por outro lado, as mesmas empresas revelaram sua maior preocupação como sendo a confiabilidade. A necessidade do aumento da confiabilidade tem exigido cada vez mais os tão chamados estudos de uprating.

No que diz respeito aos novos corredores uma vez viabilizados, os mesmos têm que ser otimizados ao extremo tanto eletro como mecanicamente. Em muitos casos, no entanto, isto não tem sido possível. Isto porque a otimização mecânica na maioria das vezes conduz à adoção de estruturas pouco compactas, do tipo estaiadas em “V” ou mais recentemente do tipo cross-rope suspension, que normalmente exigem uma maior faixa de servidão. Este é o caso da L.T. 500kV Cachoeira Paulista - Adrianópolis objeto do presente informe. Por se tratar de um dos corredores mais congestionados do Brasil, nos estudos de viabilidade tecno-econômica executados pelas equipes de Furnas, várias alternativas foram contempladas desde a otimização da tradicional solução com 3 condutores Ruddy por fase (série de torres A5/B5) a alternativas mais sofisticadas com elevada capacidade de transmissão (LPNE), através da expansão do feixe de condutores.

* Rua Desembargador Jorge Fontana, 428 - 15º andar - CEP 30320-670 - Belo Horizonte - MG - BRASIL
Tel.: (031) 3269-9841 - Fax: (031) 3269-9849 - E-MAIL: raniapeixoto@quintasequintas.com.br

Tendo em vista os aspectos ambientais e de direito de passagem acima mencionados, a solução adotada ao final foi o desenvolvimento de uma nova série de estruturas autoportantes acomodando um feixe expandido de 1200mm, com elevada capacidade de transmissão. Optou-se pois, por uma otimização do corredor através do aumento do seu gradiente de transmissão elétrica ao invés de uma simples otimização mecânica.

2.0 - DESCRIÇÃO DA LINHA

Em decorrência da necessidade identificada no âmbito da gestão da crise de energia elétrica do ano de 2001, surge o projeto emergencial da LT 500 kV Cachoeira Paulista - Adrianópolis (Figura 1), com o qual Furnas pretende disponibilizar cerca de 1200MW de potência, visando reduzir o risco de déficit de energia da região sudeste do Brasil.

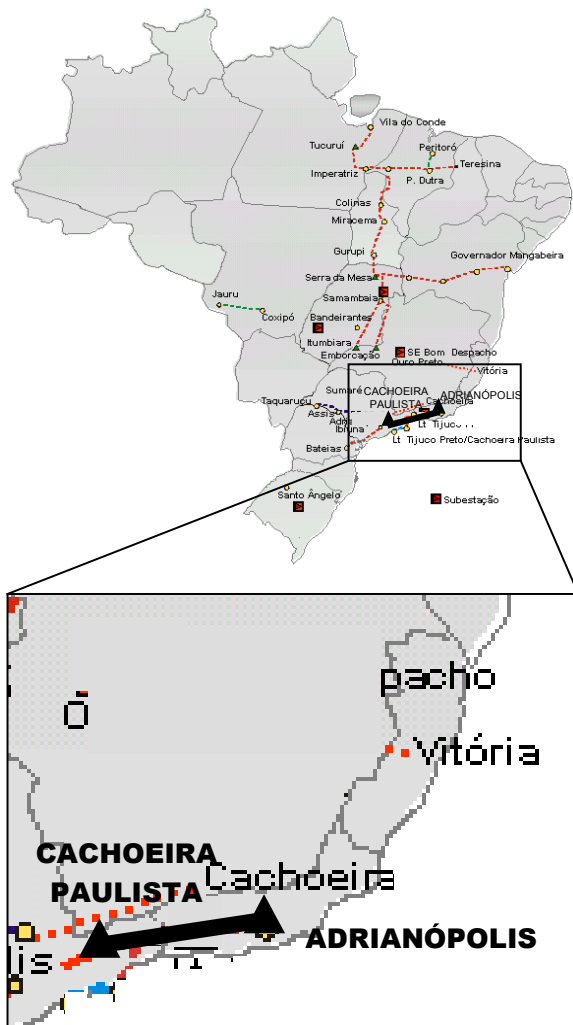


FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA LT

A linha de transmissão, que tem comprimento total de 178 km, apresenta um circuito simples trifásico, com

tensão nominal de 500 kV e com um feixe expandido de 4 condutores Rail (954kcmil) por fase.

Como já dito anteriormente, a solução estrutural adotada foi a de torres autoportantes, tipo “Cara de Gato” com configuração de condutores tipo delta, que melhor se adaptam em corredores estreitos como este entre Cachoeira Paulista e Adrianópolis.

3.0 - ASPECTOS ELÉTRICOS / DETALHES DAS CADEIAS

O feixe expandido foi desenvolvido para transmitir uma potência natural de 1200 MW, numa silhueta de torre autoportante compatível com o relevo do terreno a ser atravessado.

Furnas realizou a avaliação dos condutores, do espaçamento entre subcondutores e estudos de coordenação de isolamento visando à meta da potência de 1200 MW e para atender aos critérios de gradiente superficial dos condutores e efeitos eletromagnéticos ao nível do solo. O resultado foi um feixe de 4 subcondutores Rail (954kcmil) numa disposição quadrada, com espaçamento de 1200mm.

Para validar tal feixe de condutores, foram realizados, no laboratório de alta tensão do Cepel, ensaios de tensão de radio interferência, corona visual, distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores e tensão suportável de impulso atmosférico e de manobra, sendo extremamente satisfatório o desempenho da ferragem.

Os parâmetros elétricos de seqüência positiva gerados a partir desta configuração foram :

- Resistência = 0,0172 Ω /km
- Reatância = 0,2642 Ω /km
- Susceptância = 6,2583 μ S/km
- SIL = 1216 MW, referente à tensão de 500 kV

Para esta linha foram adotadas cadeias de isoladores compostas de 22 isoladores de 170mm de passo e 280mm de diâmetro, sendo nas torres de suspensão isoladores de 160 kN e nas de ancoragem isoladores de 240kN.

Preocupados não só com a qualidade e confiabilidade das ferragens eletromecânicas, mas também com o alto custo das matérias-primas, foi desenvolvido um projeto que permite-se um melhor aproveitamento dos materiais durante a fabricação. Chegou-se, assim, à concepção de um balancim construído com chapas de aço subdivididas em, braços superiores, braços inferiores e chapas centrais, que depois de aparafusadas garantissem o espaçamento desejado (1200mm x 1200mm), e permitindo através da

disposição de entalhes especiais a execução da manutenção em linha viva.

Na LT 500 kV Cachoeira Paulista–Adrianópolis adotou-se a configuração das cadeias conhecida como IVI, ou seja, fases laterais com cadeias de suspensão com uma única penca de isoladores e a fase central com cadeia de suspensão fixadas com duas pencas de isoladores separadas com um ângulo de 92° (Figura 2).

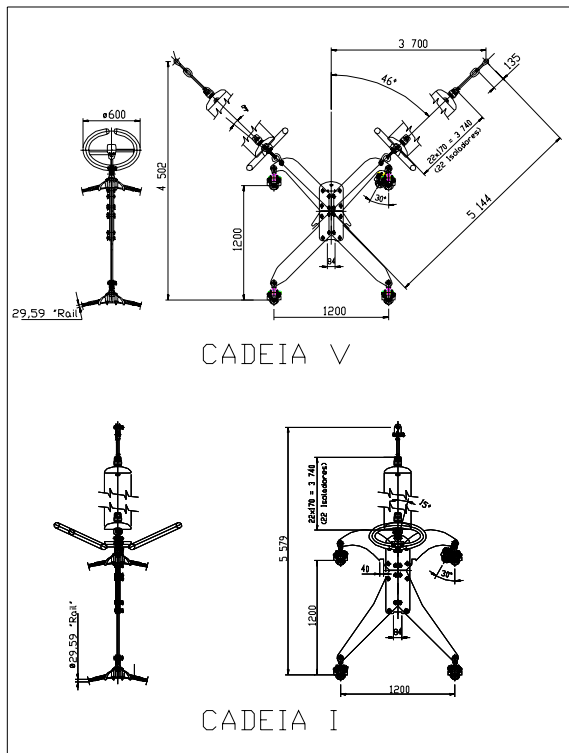


FIGURA 2 – CADEIAS DE ISOLADORES

4.0 - ASPECTOS MECÂNICOS

4.1 Confiabilidade Mecânica

O estudo de confiabilidade mecânica da linha foi desenvolvido levando em consideração a probabilidade de falhas mecânicas, conforme metodologia da IEC-60826 (1), correspondente a um período de retorno $T=250$ anos. A velocidade básica do vento extremo ($V_0=110$ km/h), definida como sendo a velocidade de vento de rajada de 10 minutos que ocorre a 10m sobre o nível do terreno, em lugar aberto e plano, com poucos obstáculos, foi obtida através de estudos desenvolvidos pelo Cepel.

A tabela 1 apresenta os valores das pressões de vento finais adotadas no projeto. Os valores apresentados levam em conta que a LT está localizada em terrenos com poucos obstáculos (categoria B) e para vão básico de 450 m. Neste projeto também foram consideradas hipóteses correspondentes às tormentas elétricas tipo "TS – Tunderstorms". As pressões de vento associadas

a estas tormentas são de alta intensidade e pequena dimensão, provocando nas estruturas, elevadas ações de vento, conforme apresentado na tabela 1.

TABELA 1: PRESSÕES DE VENTO

Vento	Aplicação	Pressão de Vento daN/m ²
Extremo	Cabo Condutor	116,7
	Cabo pára-raios	120,6
	Estrutura (a 10m)	58,8 x Cxt x Gt
Tormentas Elétricas	Cabo Condutor	48,1
	Cabo pára-raios	48,1
	Estrutura (a 10m)	192,2 x Cxt

4.2 Solução Estrutural

A solução estrutural desenvolvida foi uma família de torres autoportantes, projetada para acomodar o feixe expandido simétrico de 4 condutores por fase.

Esta família é composta por seis tipos de estruturas, sendo três de suspensão, uma de transposição, uma de ancoragem e uma de ancoragem/terminal. A tabela 2 apresenta as condições de utilização para estas estruturas.

TABELA 2: LIMITES DE UTILIZAÇÃO

Estrutura	Aplicação	Limite de Utilização		
		Vão Médio (m)	Vão Gravante (m)	Ângulo (graus)
A55	Suspensão	450	700	0 a 3
A56	Suspensão	550	800	0 a 5
B55	Suspensão	700	1050	0 a 10
BT55	Transposição	700	1050	0 a 15
D58	Ancoragem	400	1300	0 a 30
E58	Ancoragem	300	1300	0 a 60
	Terminal	400	1200	0 a 20

NOTA:

- Os vãos médios apresentados para as estruturas A55, A56, B55, BT55, E58(terminal) são para condição de ângulo de deflexão da linha igual a 0 grau.
- Os vãos médios apresentados para as estruturas D58 e E58 (ancoragem) são para condição de ângulo de deflexão máximo.

A configuração final das estruturas (Figura 3) foi desenvolvida visando obter uma otimização nos pesos das mesmas, respeitando-se os requisitos básicos de projeto bem como as distâncias elétricas mínimas necessárias para o feixe expandido. O dimensionamento das estruturas seguiu as recomendações do "Guide for Design of Transmission Towers" (2), bem como a NBR8850-R14 (3).

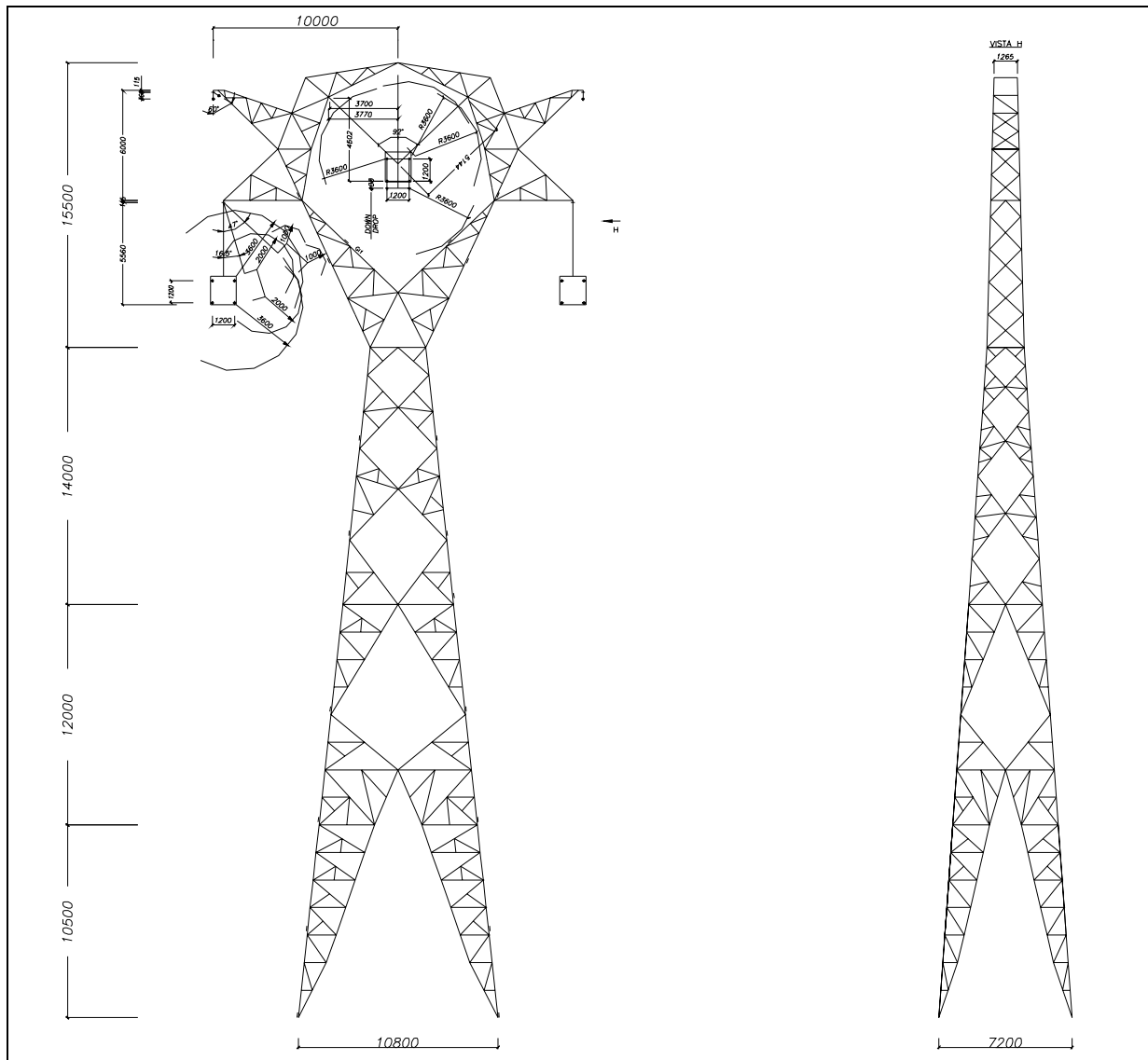


FIGURA 3 – SILHUETA DA ESTRUTURA A55

5.0 - ENSAIOS EXECUTADOS

5.1 Cadeias

As cadeias de suspensão foram inicialmente submetidas a uma bateria de ensaios (Figura 4), realizados no laboratório do Kema, em Arnhem na Holanda.



FIGURA 4 – CADEIA MONTADA PARA O TESTE

Os ensaios foram feitos para garantir, de forma satisfatória, o não aparecimento de corona visível, positivo e negativo, quando energizado a uma tensão que corresponda aos gradientes de potencial de 20,90 kV/cm, bem como, níveis de radio interferência menores que os valores indicados a seguir (conforme norma NEMA 107 (4)):

- Gradiente de potencial máximo 19,80 kV/cm,
- Tensão máxima de Radio Interferência 500 μ V.

Em seguida, as cadeias foram submetidas aos ensaios de impulso atmosférico (Figura 5) e arco de potência, divididos em dois tipos:

Ensaio tipo 1:

- Corrente de arco de 22 kA eficazes, simétrica, alimentação balanceada,
- Aplicação de uma corrente com duração de 0,08s, três vezes consecutivas,

- Imediatamente após esse primeiro ciclo, aplica-se uma corrente com duração de 0,33s.

Ensaio tipo 2:

- Corrente de arco de 30 kA eficazes, simétrica, alimentação balanceada,
- Aplicação de uma corrente com duração de 0,08s, três vezes consecutivas,
- Imediatamente após esse primeiro ciclo, aplica-se uma corrente com duração de 0,33s.

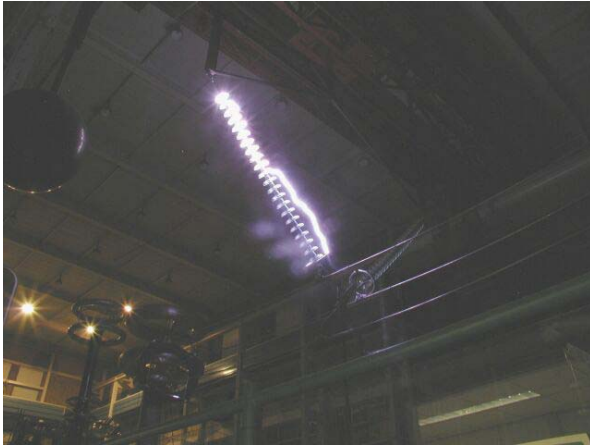


FIGURA 5: IMPULSO ATMOSFÉRICO

Terminados os ensaios de arco de potência, alguns componentes das cadeias foram submetidos a ensaios mecânicos de tração, também com resultados satisfatórios, de acordo com a norma NBR 7095 (5).

As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de tipo.

TABELA 3 – ENSAIO DE CORONA

Cadeia Tipo	Corona Positivo (kV)	Corona Negativo (kV)	Extinção de Corona (kV) *
I	403	395	368
V	359	354	340
Jumper	420	412	408

NOTA:

* valores correspondentes à tensão de ensaio referida ao gradiente de 20,90 kV/cm

TABELA 4 – ENSAIO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA

Cadeia Tipo	Valor de RIV (dB)	Valor máximo permitido (dB)
I	24	41
V	20	39
Jumper	39	48

Analisando os resultados, confirmou-se a necessidade de anéis anticorona para o bom desempenho das cadeias e que a configuração de 1200mm potencializou o ponto crítico para a extremidade das armaduras pré-formadas, uma vez que o feixe expandido se comporta como sendo 4 cabos isolados.

5.2 Torres

Como usual, foram realizados ensaios de carga nas estruturas, sendo as torres A55, A56 e B55 ensaiadas na estação de testes de Quintas & Quintas. Cada estrutura foi submetida, em média, a 20 hipóteses de carga apontadas como dimensionantes de uma ou mais barras pelo cálculo estrutural. O projeto das estruturas foi bastante otimizado, com várias barras sendo dimensionadas próximas de seus limites. Por isso, algumas falhas estruturais foram verificadas quando da realização dos ensaios de carga.

Na estrutura A55, por exemplo, durante a etapa de 100% da hipótese de vento longitudinal de tormentas elétricas, houve uma falha no tirante da face longitudinal do pé mais comprimido ocasionando a flambagem do montante, resultando no colapso total da estrutura. Já a estrutura A56 teve a flambagem de uma diagonal na parte superior quando se aplicava 100% da carga da hipótese de condutor rompido. No caso da estrutura B55, houve mais de uma falha, iniciando-se pela hipótese de condutor rompido (Figura 6), a seguir, vento longitudinal de tormentas elétricas e terminando com a hipótese de vento transversal extremo, quando também ocorreu o colapso total da estrutura.



FIGURA 6 – FALHA DA ESTRUTURA B55.

Em todos os casos, as falhas se deram entre 95% a 100% das respectivas cargas. Conforme previsto na IEC 60826 (1), foram adotados coeficientes de minoração da resistência para as estruturas. O valor utilizado neste projeto foi de $\phi_r = 0.94$, valor este que está perfeitamente de acordo com a pesquisa publicada pela Cigré conforme o documento "Evaluation of the Probability Distribution of the Strength of Transmission Lines Steel Towers Based on Tower Test Results" (6).

As estruturas de suspensão A55, A56 e B55 da LT cachoeira Paulista - Adrianópolis tiveram uma performance global muito similar, apresentando um comportamento "pós-falha" com tendência de queda muito interessante. Foi possível, durante estes ensaios, perceber com bastante clareza a influência da

modelagem isostática (pórticos de saídas das extensões de corpo) no modo de ruptura das estruturas.

De certa forma, pode-se dizer que, o comportamento estrutural verificado, foi bastante coerente com os resultados preliminares dos estudos conduzidos pelo grupo de trabalho WG08, força tarefa 4, do comitê de estudos B2 – Linhas Aéreas de Transmissão da Cigré internacional. O efeito de uma modelagem mais isostática torna o comportamento mais previsível, a estrutura ligeiramente mais leve, as fundações com cargas mais reduzidas e estruturas com maior probabilidade de colapso total no estágio “pós-falha”, devido à dificuldade de rearranjo estrutural. Sob o ponto de vista de investigação, os ensaios das estruturas foram pois, muito interessantes

6.0 - RESULTADOS OBTIDOS

A solução, com feixe expandido, desenvolvida para a LT Cachoeira Paulista – Adrianópolis, se mostrou bastante interessante e adequada para o corredor viabilizado.

Obteve-se um acréscimo de cerca de 20% na capacidade de transmissão em comparação às linhas, também em 500kV, já instaladas em corredores paralelos.

No que diz respeito à otimização mecânica, não foi possível atingir valores de consumo de aço (toneladas de aço por quilômetro) como já obtido por Furnas em outras linhas, devido a não adoção de torres estaiadas. A tabela 5 mostra uma comparação de pesos de aço por quilômetro da LT Cachoeira Paulista-Adrianópolis, comparada com outros projetos em 500kV no Brasil.

TABELA 5: PESO/KM E EFICIÊNCIA DA FAIXA

Linha de Transmissão 500 kV	Peso Médio t/km	Eficiência da faixa MW/m
LT's estaiadas *	16,5	17,2
LT's raquete compacta	23,0	20,0
LT cross-rope *	15,6	20,0
LT Cachoeira Paulista- Adrianópolis**	27,5	24,0

NOTA:

* Pesos sem estais e ferragens.

** Peso esperado

A eficiência da faixa, se assim o definimos como a capacidade transmissão em MW pela largura da faixa de passagem, ficou em 24 MW/m, valor este superior ao das linhas citadas na tabela 5, o que comprova a adequação do projeto para a LT 500kV Cachoeira Paulista-Adrianópolis.

7.0 - CONCLUSÃO

Do ponto de vista técnico, os resultados se mostraram bastante satisfatórios. Do ponto de vista econômico, os resultados também foram muito interessantes já que a solução de elevada capacidade de transmissão mostrou-se percentualmente mais econômica que as LT's de 500kV convencionais de Furnas já construídas nesta região (Tabela 6).

TABELA 6: LINHA CONVENCIONAL / LINHA HSILL

Linha de Transmissão 500 Kv - Furnas	Peso Médio t/km	Capacidade Transmissão MW	Peso/MW %
LT Convencional *	22,0	900	2,44
LT HSILL	27,5	1200	2,29

NOTA:

* Solução com torres autoportantes do tipo “cara de gato”.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC 60826. Loading and Strenght of Overhead Transmission Line. Second edition, 1991-04;
- (2) ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practise nº 52. Guide for Design of Steel Transmission Lines. Second Edition, 1988.
- (3) NBR 5422-R14. Execução de Suportes Treliçados para Linhas de Transmissão, Revisão 14.
- (4) NEMA 107. Methods of Measurement of Radio Influence Voltage (RIV) oh High Voltage Apparatus.
- (5) NBR 7095. Ferragens Eletrotécnicas para linhas de Transmissão e subestação de Alta e extra-alta Tensão.
- (6) Cigré Working Group 22. Evaluation of the Probability Distribution of the Strength of Transmission Lines Steel Towers Based on Tower Test Results. Paris, 1990.