



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

GLT -05
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

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

**LT 500 kV TUCURUÍ – VILA DO CONDE II, SOLUÇÕES INOVADORAS DE PROJETO
E APLICAÇÃO DA IEC 60826**

João Félix Nolasco (*) - JFNolasco Consultoria

Camilo Machado Júnior – Eletronorte

Amaury Saliba – Eletronorte

Vanderlei Guimarães Machado – Eletronorte

Rogério Peixoto Guimarães – ABB

Edval de Oliveira Novaes – Marte Engenharia

José Eduardo Telles Villas – Marte Engenharia

José Henrique M. Fernandes - Eletronorte

RESUMO

Os estudos de planejamento da Eletronorte, realizados há muitos anos, já previam a implantação de um segundo circuito entre Tucuruí e Vila do Conde, visando prover adequada confiabilidade de fornecimento de energia elétrica à região de Belém (PA). Esses estudos contemplavam a utilização de uma potência natural (SIL) de 1200 MW e a utilização de torres tipos raquete e chaînette.

A concretização dos planos veio a se materializar entre o ano de 2000 e 2002, já dentro do novo ambiente de reestruturação do mercado brasileiro de energia elétrica. A ETEP Empresa Paraense de Transmissão de Energia S/A, detentora do contrato de concessão da LT 500 kV Tucuruí – Vila do Conde II, contratou a ABB Ltda em regime EPC para o desenvolvimento da engenharia e implantação do referido sistema de transmissão e a Eletronorte para o gerenciamento técnico. A solução proposta para a futura LT considerava a utilização de uma nova estrutura metálica compacta, tipo Cross-rope que, aliada a outros aspectos de projeto peculiares, viria a apresentar características técnicas inovadoras e avançadas, tanto em termos nacionais como internacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Compactação, Potência Natural, Estrutura compacta, Aterramento

1.0 - INTRODUÇÃO

O projeto e a construção da LT-500 kV Tucuruí-Vila do Conde II e outras similares na região norte do Brasil constituíram um marco expressivo em termos de soluções inovadoras em EAT. Com efeito, várias características pioneiras e importantes foram introduzidas no nível de tensão de 500 kV. Ressalte-se, em primeiro lugar, o grau avançado de

compactação que se conseguiu e, em conseqüência, a potência natural (SIL) da ordem de 1200 MW, aproximadamente 20% superior à de linhas congêneres da mesma tensão. Utilizou-se o feixe de 4 condutores Rail (954 MCM) por fase em lugar do feixe de 4 x Grosbeak (636 MCM) do 1º Circuito. Todavia, o maior desafio foi a utilização de um espaçamento entre fases extremamente reduzido, apenas 5,5 m, menor no gênero a nível mundial, com cadeias verticais situadas no interior de uma torre sem viga, tipo “cross rope”. Estudos elétricos e mecânicos efetuados, ao lado de uma criteriosa investigação a nível mundial, permitiram consolidar tal solução já na fase de projeto básico. Saliente-se também que a elaboração do cálculo estrutural e do carregamento mecânico das estruturas foi toda baseada na moderna IEC-60826, com algumas particularidades realmente interessantes e inovadoras. Assim, foi necessário considerar, por exemplo, a condição EDS e condições variadas de vento para a definição da geometria da estrutura típica “cross rope”, que é dotada de grande flexibilidade e movimentação, que podem afetar as distâncias elétricas mínimas necessárias.

Um dos expressivos marcos do projeto se constituiu no cálculo do desempenho sob descargas atmosféricas e na definição do aterramento almejado, já que não só a região da rota possui nível cerâmico elevado, mas também altas resistividades de solo em certos trechos. Para se obter o índice máximo de 1 falha/100 km/ano, foi desenvolvido um sistema especial de aterramento, levando em conta a necessidade de se baixarem as impedâncias de surto e se reduzir, conseqüentemente, o número de descargas inversas. Foram assim utilizados sistemas de contrapeso, dotados de múltiplas estrelas e menores extensões que os fios radiais convencionalmente empregados, obtendo-se expressivas reduções nas impedâncias de surto com a mesma extensão de contrapesos. A metodologia básica

(*) *Rua Rodrigues Caldas, 726 / 905 – Belo Horizonte, MG, CEP 30190-120
Tel.: +55 31 3275-1271, Fax: +55 31 3725-2411,
e-mail: jfnolasco@bis.com.br*

desta nova concepção filosófica do aterramento é aqui descrita.

2.0 - ASPECTOS MECÂNICOS E ESTRUTURAIS

2.1 Confiabilidade Mecânica

Para a LT 500 kV Tucuruí – Vila do Conde II, a segurança do projeto mecânico estrutural da LT foi estabelecida com base em conceitos probabilísticos, com a estimativa do risco de falhas. Cada componente da LT, seja cabos, cadeias de isoladores, estruturas e suas fundações, teve um risco de falha coerentemente definido e compatibilizado em termos de coordenação de resistências.

De acordo com a metodologia equacionada no procedimento IEC 60826 [2], a variável período de retorno da velocidade do vento foi utilizada como referência no estabelecimento da confiabilidade da LT. Assim, seguindo o Edital da ANEEL, o Período de Retorno T(anos) para Estado Limite de Falha foi definido igual a 250 anos, enquanto para o Estado Limite de Danos, o Período de retorno adotado foi de 50 anos.

A velocidade de vento de referência (V_R), definida como sendo a velocidade de vento que ocorre a 10 metros sobre o nível do terreno, em lugar aberto e plano, com poucos obstáculos, com período de integração de 10 min. e para um Período de Retorno T= 50 anos, foi obtida a partir de séries coletadas do Ministério da Aeronáutica nas localidades de Carolina, Cachimbo, Belém, Porto Nacional, São Luiz e Teresina, com registro contínuo na faixa de 8 e 25 anos. O valor utilizado no projeto foi de 21,11 m/s.

Para cálculo de trações de cabos condutores e pára-raios, foram adotados ainda os seguintes critérios:

- Para condições EDS (sem vento, após creep): tração máxima axial limitada aos valores indicados na NBR 5422. No caso, adotou-se 18% como este limite. Independentemente disto, verificou-se que a tração do cabo não deveria ultrapassar o limite de 22% numa condição inicial, na mesma temperatura e sem vento;
- Para condições de temperatura mínima: tração máxima axial limitada em 33% da tração de ruptura do cabo;
- Para condições de vento nominal (T=50 anos): tração máxima axial limitada a 50% da tração de ruptura do cabo;
- Para condições de vento extremo (T=250 anos): tração máxima axial limitada a 70% da tração de ruptura do cabo;
- Além das limitações acima, o cabo pára-raios deveria atender à condição de que sua flecha em temperatura mínima fosse igual ou menor que 90% da flecha do cabo condutor, na condição final, após creep.

Adicionalmente, estudos de vibrações e projeto de sistemas de amortecimento foram realizados de modo a garantir ausência de danos e a limitar a fadiga dos cabos durante a vida útil da LT.

2.2 Solução Estrutural

Os riscos do desafio de se construir a LT Tucuruí-Vila

do Conde II no prazo de 14 meses foram minimizados, uma vez que se decidiu pelo desenvolvimento da torre de suspensão predominante tipo Cross-ropo, mesmo antes da assinatura do contrato EPC para implantação do referido sistema de transmissão. Além disso, para os demais tipos de estruturas da LT, foi utilizada a série de torres compactas da Eletronorte, cujos projetos foram atualizados e revistos para os novos carregamentos dentro da filosofia da IEC 60826. Assim, a família de estruturas é composta de 8 tipos de estruturas, incluindo a torre de travessia em suspensão sobre o Rio Moju.

A Tabela 1 mostra a aplicação dos diversos tipos de estruturas utilizadas no empreendimento.

TABELA1 – Tipos de estruturas e suas aplicações

Torre	Aplicação	Ângulo	Vão de Vento (m)	Vão de Peso (m)
CR52	Suspensão estaiada	0°	535	695
		2°	481	
SSM	Suspensão Raquete	0°	450	600
SCM	Suspensão Raquete	0°	550	700
		3°	469	
S15CM	Suspensão Raquete	6°	650	850
		15°	407	
TRM	Transp.	0°	420	675
A30M	Ancoragem	30°	380	900 (-380)
A55M	Terminal	20°SE	300	490
	Ancoragem	55°	290	950 (-200)
SODM	Suspensão	0°	500	1000

A estrutura compacta de suspensão Cross-Rope tipo CR-52 foi projetada para uma aplicação superior à da torre Raquete de suspensão SSM. Isto possibilitou uma maior incidência de torre estaiada na LT (70 %), já que a primeira suspensão autoportante foi prevista somente para aplicação a 0°.

O projeto estrutural das estruturas foi elaborado utilizando-se a metodologia dos estados limites. Todos os componentes foram dimensionados e/ou verificados para atender tanto condições específicas do Estado Limite Último (falha), quanto do Estado Limite de Utilização (danos). As cargas foram estabelecidas de forma compatível para cada Estado Limite e de acordo com a confiabilidade requerida no Edital.

Os critérios de projeto utilizados constam de [6] e [7].

Foram montadas árvores de carregamento que representam as principais possibilidades de cargas a que as estruturas podem estar submetidas na LT durante sua vida útil (ações de vento, principalmente, incluindo os ventos de alta intensidade oriundos de tormentas elétricas) e ações correspondentes a fases de construção, montagem e manutenção. Cargas especiais nas estruturas de suspensão também foram previstas para situações excepcionais, como para evitar efeito cascata e absorver eventuais efeitos de desequilíbrio longitudinal ou de torção (cabo rompido). Para ajustar o risco de falha da estrutura ao nível de confiabilidade estabelecido para a LT, de acordo com [2], foi utilizado fator de resistência das torres igual a

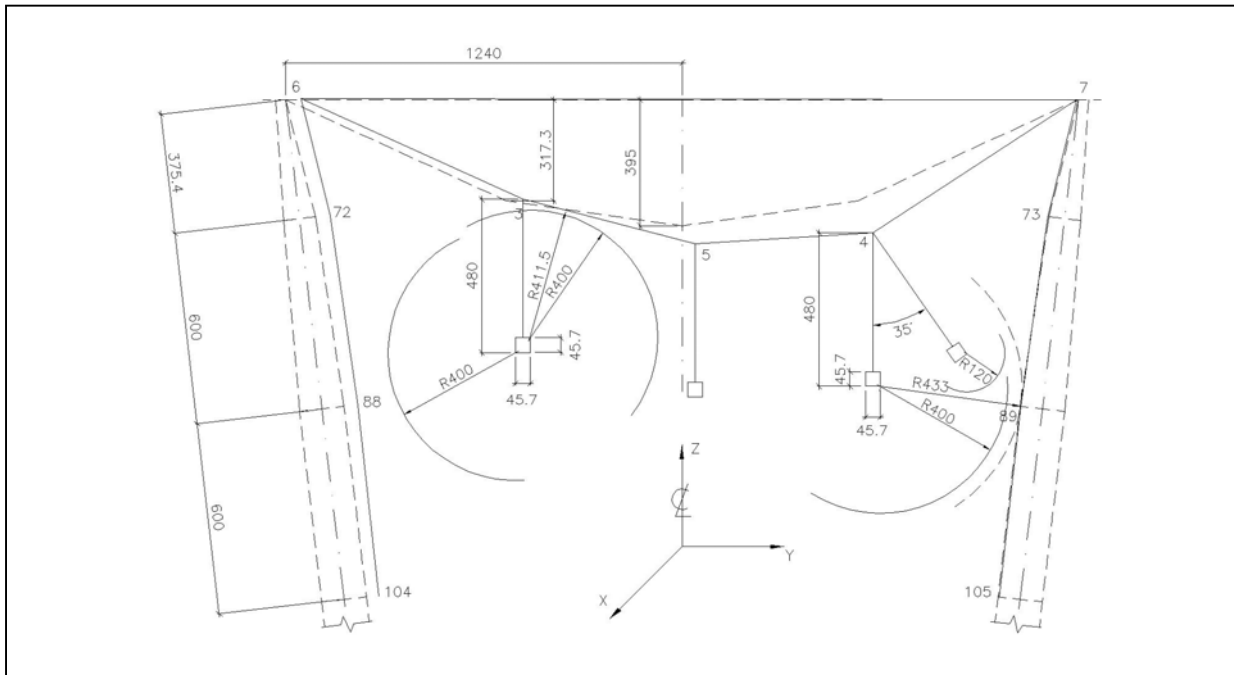


FIGURA 1: Distâncias Críticas para Condição de Frequência Industrial (Vento Nominal)

carregamento originadas da ação de ventos. Nas demais hipóteses, onde as cargas foram estabelecidas de forma não probabilística, o fator utilizado foi 1,00.

No caso específico da torre tipo cross-roped, também foram definidas hipóteses para Definição da Geometria da estrutura. Sendo a estrutura flexível, sujeita a grandes deformações, as distâncias elétricas devem ser verificadas e respeitadas na condição de estrutura deformada. Assim, foram definidas hipóteses correspondentes aos Estados Limites de Utilização para as condições: EDS, Surto de Manobra com Vento Reduzido e Frequência Industrial com Vento Nominal (T=50 anos). A Figura 1 mostra as distâncias críticas e os deslocamentos da estrutura cross-roped e respectivos cabos para condição de Frequência Industrial.

No projeto das fundações, para atender o critério de coordenação de falha, as solicitações transmitidas pela estrutura foram majoradas pelo fator de 1,10 (torres de suspensão) e 1,20 (torres de ancoragem). Estas solicitações, calculadas com as cargas de projeto da torre, passaram a ser consideradas como cargas de projeto das fundações. Com esta providência, de acordo com [2], o risco de falha das fundações torna-se menor que o das estruturas.

3.0 - ESTUDOS ELÉTRICOS E DE ISOLAMENTO

3.1 Características Elétricas Finais

O resumo dos principais parâmetros elétricos da linha é mostrado na Tabela 2, devendo-se destacar:

- Estudando-se a distribuição dos gradientes com o programa EMTP, conforme Tabela 2, chega-se ao valor máximo na periferia dos feixes igual a 17,8 kV/cm, considerando-se a tensão operativa máxima

de 550 kV. Há suficiente folga em relação ao gradiente disruptivo do condutor no ar (20,23 kV/cm). O valor médio é designado por E. Os dados de regulação e perdas se referem à transmissão do SIL.

- Os níveis de RI e RA são aceitáveis. Esses efeitos são acrescidos à medida que o grau de compactação aumenta, ou seja, nesse caso, os ganhos na redução da reatância indutiva e no acréscimo da potência natural não tornam a compactação inviável. Testes de laboratório efetuados confirmaram os valores dos cálculos.

TABELA 2: Parâmetros de desempenho elétrico do trecho de LT Tucuruí- Vila do Conde II 500 kV

L(km)	Faixa(m)	RA(db)	SIL(MW)
325	65	44,7	1200
Vr(kV)	Vg(kV)	RI(db)	Pg(MW)
500	514,0	36,6	1233,12
Reg(%)	E _{oc} (kVef/cm)	E(kV/cm)	Em(kV/cm)
2,81	20,23	15,95	17,819

3.2 Estudos de Isolamento e de balanço das Cadeias e Condutores

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, período de integração 30 segundos (27,0 m/s).
- Sobretensões de manobra, com vento reduzido, 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.

As distâncias elétricas críticas foram calculadas de acordo com a Fórmula de Paris e verificadas conforme metodologia moderna descrita em [3] e [5]. A título de ilustração, tratando-se de uma linha compacta, mostra-se a seguir a determinação da distância entre fases prescrita em [3] e [5].

$$D_{ff} = 2,17 \left(e^{\frac{1,4 * K_{cs} * U_{e2\% - st}}{1080 * K_a * K_{z-st} * K_{g-st}}} - 1 \right)$$

Onde:

K_a é o fator de altitude conforme Tabela E.4 de [3].

K_{g-st} é o fator de espaçamento para impulso de manobra, ou seja: $K_{g-st} = K_g$,

K_{z-st} é o fator de desvio do espaçamento da distribuição de surtos de manobra, igual a **0,922**.

$K_{cs} = 1,05$ é o fator de coordenação estatística

$U_{e2\% - st}$ é a sobretensão fase – terra de frente lenta, com probabilidade 2% de ser excedida.

Para o caso em questão se tem:

$K_a = 0,946$ (Para 1000 m de altitude)

$K_{g-st} = 1,6$ (Tabela E.2 de [3])

$U_{e2\% - st}$ = tomado conservativamente igual a 990 kV Substituindo, chega-se a $D_{ff} = 3,94$ m

O cálculo dos ângulos de balanço foi elaborado de acordo com o Método de Hornisgrinde [1] ou, alternativamente, com a metodologia apresentada em [5]. A referência [10] apresenta gráficos com a distância fase/fase mínima necessária em função da tensão, do vão e da possível ocorrência de balanços assíncronos. A geometria da torre típica “cross rope” foi então definida conforme apresentado na Tabela 3, enquanto a Tabela 4 mostra o máximo ângulo de balanço assíncrono possível entre as fases para que o risco de falha permaneça dentro dos critérios adotados.

TABELA 3: Sumário das Distâncias Críticas (m) Fase-Terra e Ângulos de Balanço Cadeias III (Torre Estaiada tipo “cross-rope”)

Condição	Ângulo de Balanço (°)	Fases(Centrais) (I)	
		Normal	Em até 5%
Surto Manobra	15	2,90	2,76
Freq.Industrial	35	1,20	1,05
D. Atmosférica	0	4,00	4,00
	9	3,60	3,32

TABELA 4: Sumário das Distâncias Críticas (m) entre Fases e Ângulos de Assincronismo Torre cross-rope”

Condição	Ângulo de Assincronismo Possível (°)	Entre Fases (m)
Surto Manobra	10	3,94
Frequência Industrial	35	1,79
Descarga Atmosférica	0	4,00
	9	3,32

3.3 Cálculo do Desempenho sob Surtos de Manobra para Sobretensões fase-fase e fase-terra

Foi calculado o desempenho previsto da LT 500kV com relação à ocorrência de sobretensões oriundas de surtos de manobra, de energização e de religamento,

que são os dois tipos mais intensos e comuns. Os valores das sobretensões, tanto fase – terra como fase –fase, foram extraídos dos estudos específicos de sobretensões realizados. Foram considerados os casos mais críticos de todas as LT’s da Interligação Norte-Nordeste, sendo as distribuições de frequência resultantes aplicadas à LT 500 kV Tucuruí - Vila do Conde II. Ao demais, se avaliou o desempenho considerando a torre de suspensão típica (Cross rope), como representativa da série de torres aplicada a toda a linha. Este procedimento é conservativo, uma vez que as demais torres geralmente têm dimensões maiores, havendo folga nas distâncias elétricas, principalmente em condições de vento reduzido. Assim se definiram as distribuições de sobretensões.

O efeito da polaridade de onda foi simulado através do fator α , conforme [1], aqui tomado igual 0,41 por apresentar resultados mais do lado da segurança.

No cálculo estatístico desenvolvido, foram consideradas as distribuições de Tensões Críticas e de Suportabilidades, de Fatores de Clima (RIS) e de Vento com os respectivos Ângulos de Balanço. Por simplificação, utilizou-se um ângulo de balanço fixo, correspondente a um vento reduzido com probabilidade menor que 2% de ser excedido.

Calculou-se inicialmente o risco de falha (PFO), para uma torre típica ou média, utilizando a conhecida fórmula estatística para o cálculo de probabilidades:

$P_t = 1 - (1 - P_1) * (1 - P_2) * (1 - P_3) * \dots$ etc, sendo P_1, P_2, P_3 etc as probabilidades de falha para cada superfície, cabo de sustentação superior ou estai, e P_t o risco de falha de uma torre típica. No caso do isolamento entre fases, foram consideradas, para cada torre tipo “cross rope”, as sobretensões atingindo dois “gaps”, entre as fases A-B e B-C, simultaneamente. O “gap” A-C tem probabilidade de descarga desprezível. Foi também avaliado um caso mais crítico onde ocorre um balanço assíncrono entre as fases, reduzindo a distância entre elas, havendo ao mesmo tempo surtos de manobra entre fases.

Como etapa final, calculou-se o Risco de Falha ou PFO para n torres, utilizando-se a fórmula: $PFO = 1 - (1 - P_t)^n$. Devido ao grau de compactação existente, os riscos de falha entre fases passaram a ser significativos, ao contrário do que ocorre com as linhas convencionais. Os riscos de falha reais (PFO), tomando-se os resultados da locação final da linha e os ângulos de balanço resultantes., para 50 (100) torres resultaram em:

PFO fase-fase resultante: $1,72 \cdot 10^{-6}$ ($3,44 \cdot 10^{-6}$)
PFO fase-terra resultante: $1,58 \cdot 10^{-10}$ ($3,16 \cdot 10^{-10}$)

4.0 - SISTEMA DE ATERRAMENTO

4.1 Premissas e metodologia consideradas

A necessidade de grandes extensões de contrapesos para o aterramento das torres da linha em estudo, consoante os elevados valores de resistividade do solo medidos ao longo da diretriz da LT e as metodologias clássicas que tratam do tema, determinaram a análise de soluções distintas daquelas convencionalmente empregadas para os sistemas de aterramento.

Nesse sentido, foram investigadas alternativas que utilizassem as projeções das fases externas da linha como fronteiras para lançamento dos contrapesos,

bem como o uso de um maior número de contrapesos radiais por ponto de aterramento e, finalmente, uma combinação desses com o emprego de hastes, nos solos com resistividades elevadas, de forma que o desempenho da linha, quando da ocorrência de descargas atmosféricas, se situasse abaixo da taxa de 1,0 desligamento/100 km.ano.

Além dos cuidados tradicionais para a segurança da vida humana, o estudo dedicou especial atenção ao desempenho da linha sob surtos atmosféricos.

O estudo do sistema de aterramento de torres de linhas de transmissão deve ser diferenciado no que se refere ao comportamento para impulso e a 60 Hz. Para este último, o valor da resistividade do solo na região de instalação, a profundidade de enterramento e a extensão dos contrapesos são fatores preponderantes no valor final da resistência de aterramento a 60 Hz, parâmetro este que, aliado ao valor da parcela da corrente de defeito à terra que escoar através desse sistema de aterramento, permite avaliar a existência de regiões equipotenciais críticas para a segurança de seres humanos, ou mesmo de animais, nas imediações da torre sob defeito e nas adjacentes.

Já para o aterramento a impulso, deve ser levada em conta a natureza do fenômeno. Para avaliação da taxa de desligamento, os fenômenos envolvidos são de natureza atmosférica. O mecanismo fundamental é o da incidência de raios por descargas indiretas na torre ("back-flashover"). De acordo com a literatura sobre o assunto, as solicitações no topo da torre, advindas das ondas trafegantes causadas pela descarga, atingem o sistema formado pelos cabos pára-raios/torre/sistema de aterramento e conduzem a uma sobretensão de surto com duração de cerca de 1,5 μ s. Aplicada sobre as cadeias de isoladores, esta sobretensão poderá acarretar uma descarga, propiciando condição para a ocorrência de um defeito, seguido do desligamento da linha. Desta forma, é de fundamental importância que o valor a ser considerado para o sistema de aterramento, no modelo do circuito para as ondas trafegantes, seja determinado para um tempo da ordem de 1,5 μ s.

Conforme [8, 9], os contrapesos (eletrodos horizontais) apresentam um comportamento distinto das hastes verticais. Os primeiros apresentam valores elevados para fenômenos associados a impulsos (tempos da ordem de microssegundos) e baixos (função da resistividade), para fenômenos a 60 Hz (tempos da ordem de milissegundos). Já as hastes (eletrodos verticais) apresentam um comportamento oposto ao dos contrapesos. O valor de impedância a impulso de um contrapeso horizontal é da ordem de 150 Ω , independente de sua extensão, cabendo ressaltar que a velocidade de propagação do surto pelo mesmo reduz-se a 1/3 da velocidade da luz.

Assim, o uso de arranjos que combinem a utilização de contrapesos e hastes, como o do tipo "Crow-Foot", afigura-se o mais indicado para situações em que prevaleçam restrições de ordem física e inexistência de observância do critério de segurança.

Cabe assinalar que os programas existentes no setor elétrico para as simulações de cálculo de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, utilizam modelagens simplificadas, tanto para as torres, como para os sistemas de aterramento destas, como para o tratamento do solo e da resistividade. É o caso por exemplo das fórmulas para o cálculo das impedâncias de aterramento de torres, que não tratam corretamente os fenômenos de propagação eletromagnética no solo.

4.2 Processamento

Os estudos e cálculos efetuados se basearam nas resistividades elétricas medidas para cerca de 1/3 das torres da linha. A partir desses dados, foi possível:

- estratificar o solo em 2 camadas para cada torre;
- efetuar um levantamento preliminar do número de estruturas por faixas de resistividades elétricas;
- idealizar uma distribuição de faixas de resistividades elétricas ao longo da diretriz da linha.

A partir das resistividades medidas (ou estimadas) para cada uma das torres e utilizando programa especialmente desenvolvido para tal fim, foram calculados os comprimentos de contrapesos para que fosse atingido o valor médio de 20 Ω , valor esse inferior aos 25 Ω adotados para a resistência de aterramento a 60 Hz (regime quase estacionário) na fase de projeto básico da linha. Os dados obtidos permitiram que fossem definidas 6 faixas para a resistividade do solo, às quais foram associados 6 esquemas de instalação de contrapesos, denominados fases, para torres autoportantes e estaiadas.

Ainda nessa etapa, verificou-se que nas Fases 5 e 6, correspondentes a resistividades elétricas do solo mais elevadas (acima de 2500 Ω .m), seria necessário adotar um valor médio de 40 Ω para a resistência de aterramento a 60 Hz, tendo em vista as grandes extensões de contrapesos radiais necessárias para atingir-se o valor médio inicial de 20 Ω . Em adição, na Fase 6, foi considerado o uso adicional de hastes.

Na etapa seguinte, foram efetuadas simulações com outro programa desenvolvido especificamente para esta finalidade. Utilizando como dados de entrada as configurações de aterramento (definidas na fase anterior) e a resistividade do solo em cada torre, esse programa calcula o desempenho da LT (taxa de saída média) quando da ocorrência de surtos atmosféricos.

A análise dos resultados obtidos na primeira rodada do programa apontou para a necessidade de implementação de algumas medidas adicionais, com vista ao atendimento do critério de 1,0 desligamentos/100 km/ano, estabelecido pela ANEEL. Como resultado dos ajustes efetuados, foi estabelecido que, para as torres situadas em solos com resistividades acima de 2.500 Ω .m, deveriam ser instaladas 4 hastes de terra, uma por perna ou estai.

4.3 Esquemas utilizados e resultados de campo

Os esquemas de aterramento utilizados na linha são apresentados nas Figuras 2 e 3.

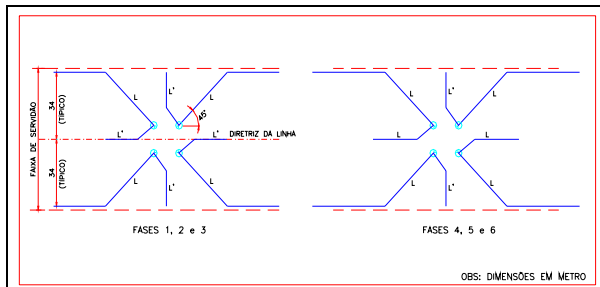


Figura 2 – Torre Autoportante – Sistema de Aterramento Proposto.

Critério: 20 Ω					
FASE	RT (Ω)	L (m)	L' (m)	LTOTAL (m)	
Fase 1: $\rho < 500 \Omega.m$	15,3	10	-	40	
Fase 2: $500 \Omega.m < \rho < 1000 \Omega.m$	19,5	25	-	100	
Fase 3: $1000 \Omega.m < \rho < 1500 \Omega.m$	23,3	25	20	180	
Fase 4: $1500 \Omega.m < \rho < 2500 \Omega.m$	21,0	60	20	400	
Critério: 40 Ω					
FASE	RT (Ω)	L (m)	L' (m)	Haste	LTOTAL (m)
Fase 5: $2500 \Omega.m < \rho < 3500 \Omega.m$	33,0	50	25	4	350
Fase 6: $\rho > 3500 \Omega.m$	41,4	60	25	4	410
Fases de Aterramento e Extensões de Contrapesos.					

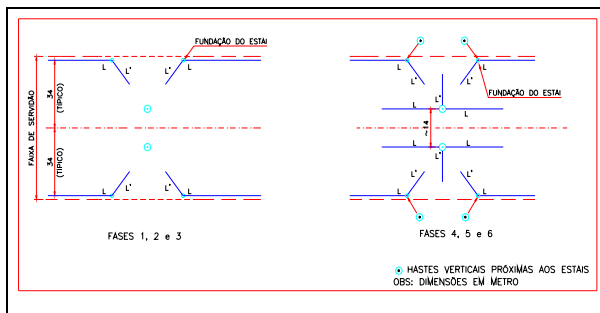


Figura 3 – Torre Estaiada – Sistema de Aterramento Proposto.

Critério: 20 Ω					
FASE	RT (Ω)	L (m)	L' (m)	LTOTAL (m)	
Fase 1: $\rho < 500 \Omega.m$	15,0	15	-	60	
Fase 2: $500 \Omega.m < \rho < 1000 \Omega.m$	18,1	15	15	120	
Fase 3: $1000 \Omega.m < \rho < 1500 \Omega.m$	16,0	40	20	240	
Fase 4: $1500 \Omega.m < \rho < 2500 \Omega.m$	23,9	30	15	330	
Critério: 40 Ω					
FASE	RT (Ω)	L (m)	L' (m)	Haste	LTOTAL (m)
Fase 5: $2500 \Omega.m < \rho < 3500 \Omega.m$	34,1	25	25	4	350
Fase 6: $\rho > 3500 \Omega.m$	44,4	25	25	4	350
Fases de Aterramento e Extensões de Contrapesos.					

Nestes arranjos, além de um maior número de ramais por ponto de aterramento, os comprimentos dos ramais são inferiores aos normalmente utilizados em sistemas de aterramento convencionais, ainda mais se forem levados em conta os elevados valores de resistividade do solo e do nível cerâmico da região da linha.

Indicam-se a seguir os valores finais das resistências de aterramento a 60 Hz medidos para a linha:

torres com $R_{at} < 5 \Omega$	146	20,7 %
torres com R_{at} de 5 a 10 Ω	355	50,3 %
torres com R_{at} de 10 a 15 Ω	148	20,9 %
torres com R_{at} de 15 a 20 Ω	40	5,7 %
torres com R_{at} de 20 a 25 Ω	7	1,0 %
torres com R_{at} de 25 a 30 Ω	4	0,6 %
torres com $R_{at} > 30 \Omega$	6	0,8 %

5.0 - CONCLUSÕES

- Atingiu-se a potência natural (SIL) almejada para o 2º circuito Tucuruí – Vila do Conde, de 1200 MW com um elevado grau de compactação ($D_{ff} = 5,5 \text{ m}$), valor recorde a nível mundial nessa tensão.
- O aprofundamento do conhecimento disponível na literatura sobre balanço assíncrono de condutores propiciou segurança quanto ao elevado grau de compactação utilizado.
- O valor do Risco de Falha (PFO) Fase-Fase para a LT atingiu $1,72 \cdot 10^{-6}$, mais alto do que de outras linhas convencionais, mas satisfatório para o nível de confiabilidade projetado. Pelo método determinístico de coordenação de isolamento, a sobretensão máxima presumível atinge 1435 kV, enquanto a suportabilidade mínima absoluta em relação a qualquer parte estrutural é de 1508 kV. Quanto ao Risco de Falha para sobretensões fase-terra, o cálculo resultou em valor muito mais baixo.
- No que se refere ao índice de desligamentos devidos a descargas atmosféricas, o valor calculado e previsto para a LT foi de 0,74 desligamento/100 km/ano para um nível cerâmico de 80, melhor portanto do que o valor garantido.
- A estrutura compacta cross-ropo se mostrou uma alternativa tecno-econômica bastante vantajosa para as linhas de EAT da região. O conhecimento técnico adquirido e os resultados alcançados na LT 500 kV Tucuruí - Vila do Conde II possibilitam a aplicação dessa solução nos próximos circuitos de 500 kV a serem implantados no sistema elétrico brasileiro.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] EPRI -EHV Reference Book 345kV and Above,1982.
- [2] IEC-826: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines.
- [3] EN – 50341-1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV.
- [4] GUIMARÃES, R.P. et al :XVI SNPTEE: Grupo III – Estrutura compacta tipo cross-ropo para linha de transmissão em 500 kV –XVI SNPTEE, Campinas, 2001.
- [5] KIESSLING, F., NOLASCO, J.F.: Overhead Power Lines, Berlin, 2003.
- [6] CIGRÉ-CE22/GT22.08: Procedimento de Projeto de Torres Metálicas Treliçadas para Linhas de Transmissão.
- [7] Manual ASCE nº 52 : Guide for Design of Steel Transmission Towers.
- [8] ALDERTON, J.R., ANDERSON, P.C., CAKEBREAD, R.J. – Calculation and Measurement of the Earth Impedance of an E.H.V. Substation. Proc. IEE – dec 1978.
- [9] DIESENDÖRF, W. – Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems– London– Butterworths – Book.
- [10] United States. Department of Energy EHV and UHV Transmission Lines: Electrical, Structural and Environmental Design Concepts and Evaluations. DOE/ET/29236-2. 1982