



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

GLT 15  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

### GRUPO III

#### GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

#### RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO 138kV UTILIZANDO CABO DE ALUMÍNIO LIGA 6201

**Ricardo Santos Wiedmer (\*)  
Oswaldo Honorato de Souza Jr.  
Vinicius P. Silva  
João N. Hoffmann**

**COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A.  
LACTEC  
LACTEC  
COPEL TRANSMISSÃO S.A.**

#### RESUMO

Este trabalho mostra uma experiência na recapacitação de três linhas de transmissão 138kV, na região central do Estado do Paraná, totalizando 153,4km, com a substituição dos condutores CAA 266,8 kCM – Partridge por cabos de alumínio liga 6201, CAL 312,8 kCM – Butte, passando de uma temperatura de projeto de 55°C para 75°C.

Também se discorre sobre ensaios em bancada de vibrações, realizados sobre arranjos de suspensão com pesos adicionais, para determinação do melhor posicionamento dos amortecedores *stockbridge* nestas linhas de transmissão.

#### PALAVRAS-CHAVE

Recapacitação, Alumínio liga 6201, Linha de Transmissão, Condutor.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os cabos de alumínio liga 6201 tem sido aplicado com sucesso em novas linhas de transmissão [1]. O enfoque neste trabalho é a substituição de condutores em linhas existentes, visando o aumento de capacidade de transmissão e conseqüente revitalização das mesmas, com a substituição de cabos em operação há muitos anos. As linhas de transmissão 138 kV Irati – Sabará, Irati – Guarapuava e trecho final da LT 138 kV Vila Carli – Guarapuava foram construídas há 40 anos, originalmente para 69kV e, em 1985, foram reisoladas para 138kV. O cabo pára-raios tipo cordoalha de aço 5/16" original foi substituído por um cabo OPGW em duas das três linhas em questão.

As linhas estão situadas em áreas com predomínio de culturas, pastagens e trechos com remanescentes florestais. Devido à inserção de novas usinas no sistema 138kV do Médio Iguaçu, foram realizados estudos de fluxo de potência e carregamento, indicando a necessidade de reforço na capacidade dessas e de outras linhas da região.

#### 2.0 - ALTERNATIVAS ANALISADAS

Abaixo, relacionamos as demais alternativas analisadas (que não a substituição de condutores), mesmo aquelas que se apresentavam inviáveis à primeira vista.

#### 2.1 Construção de novas linhas de transmissão

A construção de 150 km de novas linhas não se mostrou viável economicamente, pois o aumento na capacidade de transmissão não justificava os gastos com a implantação de nova faixa de servidão. Consideramos também o

fato de que na região ocorrem remanescentes florestais de mata atlântica da Serra da Esperança e a Floresta Nacional de Irati, que configuram áreas de preservação.

## 2.2 Substituição das linhas existentes por outras de maior capacidade

Esta alternativa aproveitaria as mesmas faixas de servidão, porém apresentou-se muito onerosa, pois teríamos os custos de desmontagem e montagem das novas linhas de transmissão. Também havia o agravante de que as referidas linhas apresentassem restrições extremas quanto a viabilidade de desligamentos para serviços desta ordem.

## 2.3 Substituição por condutores de seção maior

Consideramos nesta análise o condutor CAA 397,5kCM – Ibis, o qual atenderia a nova carga a uma temperatura de 62°C, mantendo as alturas cabo-solo dentro da norma. No entanto, seria necessário efetuar um redimensionamento estrutural completo na série de estruturas utilizadas. Isto porque os parâmetros deste cabo, tais como peso unitário de 0,8134 Kg/m e diâmetro de 19,88 mm somado ao fato de haver cabo pára-raios OPGW em alguns trechos, causariam esforços verticais, transversais e longitudinais além dos limites de carregamento mecânico previstos no projeto original das estruturas. Esta alternativa também foi descartada.

## 2.4 Recapitação com o condutor existente

A capacidade de condução de corrente do cabo Partridge original à 75°C, atenderia os níveis de capacidade solicitados nos estudos realizados no sistema 138kV. A restrição neste caso foi a redução na altura cabo-solo ocasionada pela flecha do condutor à esta nova temperatura. Para resolver este problema poderíamos optar pela montagem de estruturas adicionais no meio dos vãos críticos, para elevar a altura cabo-solo. Porém, para esta opção além dos altos custos (o problema de cabo baixo ocorria na maioria dos vãos), havia restrições para montagem de estruturas devido ao perfil topográfico acidentado.

A alternativa de retensionamento dos condutores foi descartada devido à falta de tempo suficiente para avaliação mecânica das torres e ao fato de haver cabo pára-raios OPGW em alguns trechos, já submetendo as estruturas à carregamentos mecânicos maiores do que os previstos originalmente.

## 3.0 - PROJETO DE RECAPITAÇÃO

O recurso de recapitação de linhas de transmissão vem sendo utilizado por diversas empresas transmissoras e distribuidoras de energia, principalmente pela relação custo-benefício apresentado.

Face às restrições citadas anteriormente, a alternativa adotada foi substituir os condutores CAA 266,8 kCM – Partridge por cabos CAL (ou AAAC), 312,8 kCM – Butte, constituído de um condutor homogêneo encordoado concêntricamente e formado por fios de alumínio liga 6201, sem alma de aço. Este cabo foi concebido com o mesmo diâmetro e praticamente a mesma ampacidade do cabo CAA Partridge (para mesma temperatura de operação), porém com peso unitário menor. Esta característica possibilita ganhos de altura cabo-solo, pois resulta em flechas menores em comparação com o cabo Partridge. A tabela 1 abaixo mostra as ampacidades determinadas para as linhas em questão.

CABO	Capacidade (A)	
	75°C	90°C
CAA 266,8 kCM – PARTRIDGE	402,6	472,9
CAL 312,8 kCM – BUTTE	405,3	477,4
método de cálculo: IEEE Std. 738-1993		
temperatura ambiente: 32°C, verão, durante o dia		

Tabela 1: Ampacidades calculadas

Com a opção da troca de condutores, procurou-se como premissa básica, evitar ao máximo a montagem de novas estruturas, minimizando os custos da recapitação. Esta é a primeira experiência da COPEL com este cabo em linhas de transmissão.

### 3.1 Utilização do software PLS CADD

Para iniciarmos os projetos, realizamos novos levantamentos topográficos planialtimétricos sob as linhas de transmissão, pois os originais já não traduziam a realidade dos perfis topográficos, dos obstáculos e ocorrências existentes.

Para este empreendimento, utilizou-se o software PLS\_CADD para projeto de plotação da estruturas, lançamento dos cabos e obtenção da catenária. Então, alimentando o PLS\_CADD, com os dados do levantamento topográfico, velocidades de vento, tipo de condutor, estruturas utilizadas e temperatura presumida do condutor, determinamos o tracionamento mecânico médio ao qual estavam submetidos os condutores Partridge, que na maior parte dos tramos foi na ordem de 20% da tração de ruptura na EDS. Com esta modelagem pode-se determinar que em alguns vãos, à temperatura de projeto original de 55°C, o condutor CAA existente, já não atendia as alturas cabo-solo pré-estabelecidas para este projeto.

A figura 1 mostra um trecho do perfil da LT 138kV Irati – Sabará. A catenária mais baixa (em vermelho) é a projeção do condutor Partridge para a temperatura de 75°C, nas mesmas condições originais de tracionamento, situação esta bem mais crítica quanto ao atendimento das alturas cabo-solo. A catenária mais alta (em azul) representa o cabo Butte à temperatura de 75°C e tracionamento de 20% da tração de ruptura na EDS. Nesta figura observa-se justamente o ganho de altura cabo-solo obtido na substituição dos cabos CAA tradicionais por cabos de alumínio liga 6201 tipo CAL (AAAC).

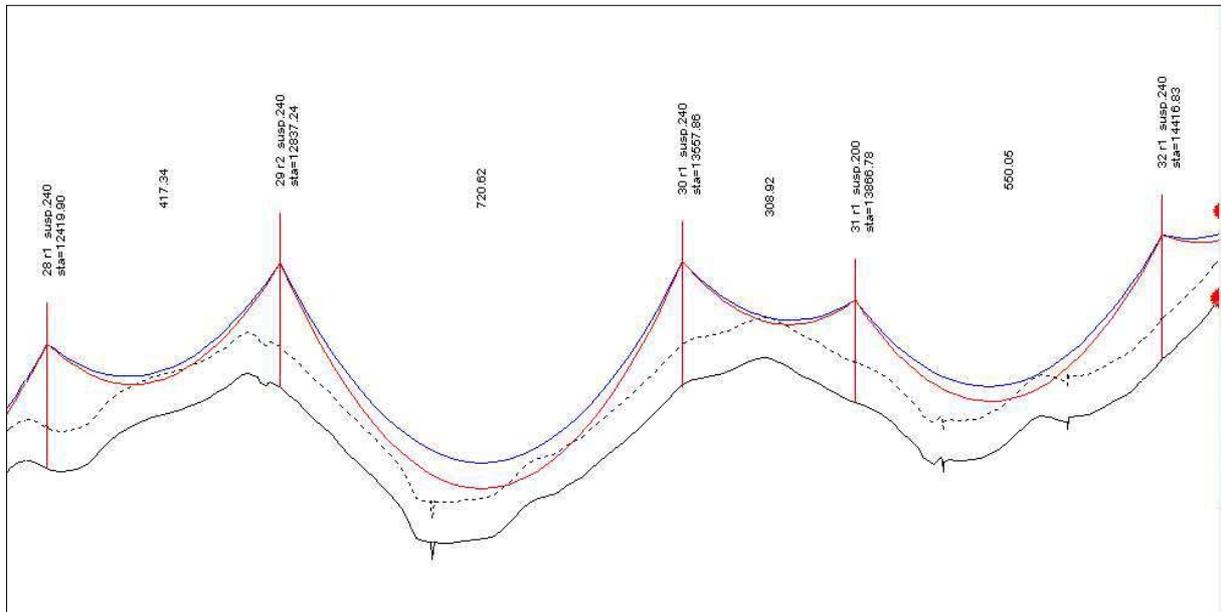


Figura 1: Perfil e catenárias de um trecho da LT 138 kV Irati - Sabará

### 3.2 Medidas complementares

Os cabos de alumínio liga 6201 apresentam maior coeficiente de dilatação térmica e portanto, apresentam maior variação de flecha para uma determinada faixa de temperatura, comparados aos cabos com alma de aço CAA. Em projetos de recapacitação deve-se dedicar atenção especial na verificação das distâncias entre os cabos condutores e os cabo pára-raios, caso não haja substituição deste último, principalmente em baixas temperaturas.

No caso da LT 138kV Irati-Sabará, em 1998 foi lançado um cabo OPGW em substituição à cordoalha de aço 5/16". A condição de lançamento naquela ocasião foi de igualdade de flecha entre OPGW e o cabo Partridge e como limitante foi considerada a distância mínima entre os estes cabos, na temperatura mínima de operação, bem como o limite de suportabilidade da mísula do pára-raios para cargas mecânicas. Ocorre que com o lançamento do cabo liga de alumínio à 20% da tração de ruptura, na condição EDS, a distância mínima entre pára-raios e condutores não foi observada em alguns vãos críticos (vãos maiores), devido a maior variação de flecha do cabo Butte.

Para contornar esta situação, foram tomadas as seguintes providências, aplicadas isoladamente ou em conjunto, dependendo da necessidade:

- Em alguns tramos (onde a altura cabo-solo permitia), as três fases foram reguladas à taxa de 19% da tração de ruptura;
- Nos casos onde havia restrição de altura cabo-solo, foi aplicado tracionamento diferenciado nas três fases, atendendo aos dois critérios;
- Em casos extremos, onde as duas providências acima não foram suficientes, o cabo OPGW foi retensionado.

#### 4.0 - ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS

Foram especificados, além do condutor alumínio liga 6201, ferragens próprias para este condutor, tais como grampo de ancoragem a compressão e luvas de emenda. Alguns tiveram suas características reavaliadas pelos fabricantes, tal como o grampo de suspensão armado, luva de reparo e amortecedor *stockbridge*.

Tabela 2: Materiais e ferragens especificados

Código COPEL	Descrição	Situação
016818-1	Luva de emenda a compressão para cabo CAL 312,8 kCM (BUTTE), NTC 870480	Nova especificação
016819-0	Grampo de ancoragem a compressão para cabo CAL 312,8 kCM (BUTTE);NTC 870480	Nova especificação
016825-4	Cabo de alumínio liga termorresistente CAL BUTTE 312,8 kCM	Nova especificação
733060-0	Grampo de suspensão armado; CAA 266,8 kCM; NTC 870301	Reavaliação
303070-9	Luva de reparo à compressão para cabo CAA 266,8 kCM; NTC 870422	Reavaliação
303041-5	Amortecedor de Vibração Stockbridge; CAA 266,8 kCM	Reavaliação

A especificação do novo cabo e suas ferragens constituíram-se na principal diferença deste projeto para as tradicionais recapitações realizadas pela COPEL.

#### 5.0 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Mesmo adotando-se a premissa de não implantarmos torres adicionais nas linhas, foi necessária a substituição de 10 estruturas, de um total de 353 existentes, devido à condições críticas de altura cabo-solo verificadas.

As cadeias de isoladores de vidro existentes foram mantidas, sendo substituídas somente as ferragens em contato direto com o novo cabo, tais como grampo de suspensão AGS e amortecedores *stockbridge* e as cadeias danificadas. Alguns arranjos em ancoragem-suspensa (semi-ancoragem) existentes puderam ser convertidos em suspensão, conforme projeto original das torres.

As obras de substituição dos condutores foram executadas durante desligamentos programados, de acordo com a contingência do sistema, em 2 contratos com 3 meses de duração cada um.

Uma das particularidade deste projeto é que, devido ao projeto original das torres ser para tensão de 69kV, com mísulas menores do que nas séries para 138kV, os limites para ângulos de balanço das cadeias tornaram-se bem restritivos. Aliando-se estes limites ao fato de que o menor peso unitário do cabo Butte resulta em um maior balanço em relação ao verificado para o cabo Partridge, os ângulos de balanço ultrapassaram estes limites em grande parte das estruturas. A solução foi utilizar um arranjo com pesos adicionais, instalados próximos aos grampos de suspensão, com vistas a minorar os ângulos de balanço verificados, conforme fotos a seguir.



Figura 2 – Torre com amortecedores e pesos adicionais



Figura 3 - Pesos adicionais e amortecedor

#### 6.0 - ENSAIOS DE VIBRAÇÃO

A colocação de pesos adicionais significativos não na parte inferior da cadeia, como comumente utilizado, e sim no próprio cabo, poderia interferir nas condições vibracionais do conjunto de modo a que não se respeitasse a condição de vibração próxima a suspensão ou próxima ao peso. Portanto, o melhor posicionamento dos amortecedores que normalmente são colocados dentro de critérios estabelecidos pela concessionária juntamente com fabricantes, para novos projetos e projetos de recapitação, através de métodos como o Russo, Americano

do CIGRÉ, pudessem ser prejudicados ou colocados em dúvida quanto a este melhor posicionamento em função principalmente do número de pesos variavelmente colocados nos vãos de peso, conforme a necessidade. Visto não haver na literatura estudos e uma definição sobre deste posicionamento ótimo para cabos CAL, que leve em conta a influência dos pesos adicionais, resolveu-se sobre a realização de ensaios em vão de teste, em bancada de vibrações do Lactec com vãos de 31 metros e de 54 metros.

### 6.1 Descrição do Estudo

O estudo compreendeu diversas medições nos dois comprimentos de vão, medições essas simulando-se no início do vão, a suspensão com isolador e sua respectiva alça pré-formada (Figura 4). Os pesos adicionais foram instalados com sua respectiva alça pré-formada na distância recomendada pelo projeto, variando de 10 a 80kgf conforme determinação do projeto (Figura 5) e os amortecedores *stockbridges* utilizados, foram o simétrico do tipo “*dogbone*” e o assimétrico (que acabou sendo adquirido pela Copel e instalado conforme visto nas Figuras 2 e 3).



Figura 4 – Ancoragem vertical simulando isolador de suspensão



Figura 5 – Pesos adicionais instalados com grampo e alças

Os ensaios desenvolveram-se inicialmente, com a configuração de cabo livre, com a cadeia de isolador e alça pré-formada, sem pesos adicionais e sem *stockbridges*, visando avaliar as condições de cabo livre sem amortecimento adicional conforme Figura 4. Numa segunda etapa foi avaliada esta mesma configuração com a colocação de *stockbridges*, pesquisando-se sobre o melhor posicionamento para esta configuração para as situações de vão de peso sem a necessidade de colocação desses. Na seqüência, foram colocadas as alças pré-formadas de conexão com os pesos adicionais, iniciando-se com as avaliações com os pesos de 10kgf, até 80kgf conforme a Figura 5 e com os amortecedores colocados a partir do grampo de suspensão dos pesos adicionais. Os amortecedores, tanto o *dogbone* simétrico quanto o assimétrico, foram instalados e avaliados a partir do critério Copel para varias posições no entorno buscando suas otimizações, sendo que o assimétrico também foi avaliado com as massas sendo invertidas, hora massa maior do lado ancoragem ou hora do lado da parte central do vão de teste. O

excitador, para o vão de 31 metros, foi colocado do outro lado, próximo a segunda ancoragem. Já para o vão de 54 metros, o excitador ficou próximo à ancoragem de tração, onde estão nas fotos acima o isolador suspenso. As diferentes configurações montadas foram comparadas através dos resultados das funções em resposta em frequência (FRF) das medições de vibração em diversos pontos do conjunto. As medições de vibração foram realizadas com o auxílio de dois acelerômetros localizados a 250mm de cada um dos lados do amortecedor. Em seguida são apresentados os resultados destas avaliações e uma configuração "peso, posição e tipo de amortecedor" que se obteve para um desempenho mais adequado visando minimizar as vibrações eólicas na linha de transmissão.

## 6.2 Resultados das Medições

6.2.1 Resultados da comparação entre as medições sem peso e variando o tipo de amortecedor *stockbridge* na mesma posição

Na figura 6 são mostrados os resultados das medições das Funções de Resposta em Frequência para essa condição.

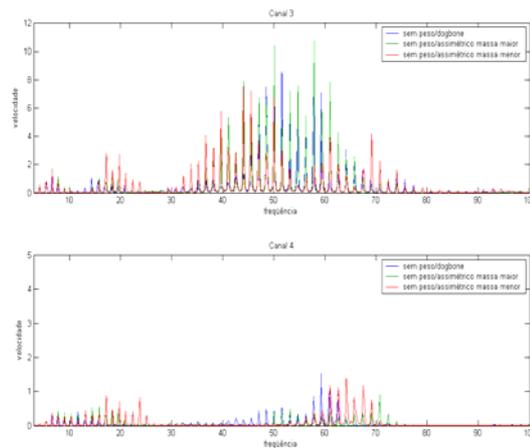


Figura 6 – Gráfico comparativo das medições com os amortecedores no vão de 54m, com ancoragem vertical e sem pesos adicionais

Nota-se que para baixas frequências entre 11 e 30 Hz, o amortecedor tipo *dogbone* atingiu menores amplitudes do que o assimétrico. Entre 30 e 60 Hz, o assimétrico, tanto com a massa menor como com a massa maior virada para a ancoragem, conseguiu diminuir mais a amplitude de vibração do que o *dogbone*, que volta a reduzir os níveis de vibração mais do que o assimétrico acima de 60 Hz.

6.2.2 Resultados da comparação entre as medições com o mesmo tipo de amortecedor ( o assimétrico) posicionado em diferentes posições e com pesos adicionais:

Para a condição de colocação de pesos adicionais, o canal 3 ficou entre o amortecedor e os pesos adicionais, e o canal 4 ficou entre os pesos adicionais e a ancoragem grampo-isolador.

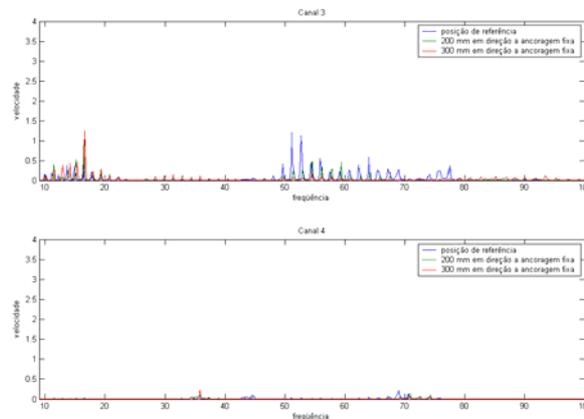


Figura 7 – Gráfico comparativo para várias posições, no vão de 54m, com peso de 10kg.

Com o peso de 10kg, o nível de vibração foi reduzido em quase todas as freqüências no canal 4. No canal 3, nota-se que o amortecedor colocado na 200mm já apresenta um melhor resultado para maiores freqüências, compatível com o resultado em 300mm. Como não houve grandes alterações, optou-se pela posição 200mm.

6.2.3 Resultados da comparação entre as medições com o mesmo tipo de amortecedor (o assimétrico) posicionado a 200mm e com pesos adicionais diferentes:

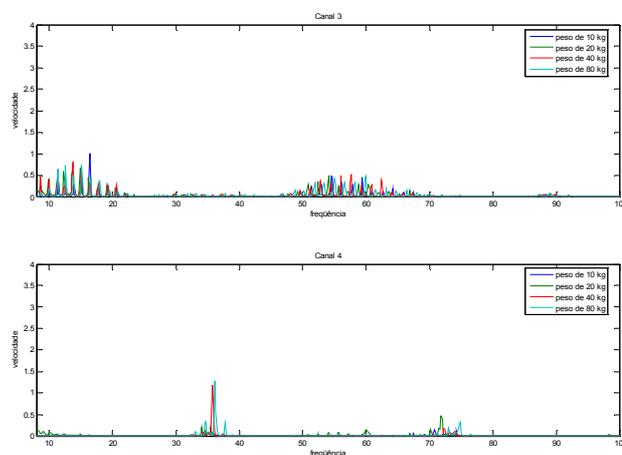


Figura 8 – Gráfico comparativo com amortecedor a 200mm, no vão de 54m com pesos adicionais de 10 a 80kg

Com o amortecedor posicionado a 200mm da posição padrão em direção a ancoragem, ocorre um aumento nas amplitudes de vibração no canal 4, entre os pesos e o grampo de suspensão, quando colocados os pesos de 40kg e 80kg. Isso ocorreu devido a ressonâncias observadas com os pesos adicionais, fazendo com que os níveis de vibração fossem maiores para estas freqüências. Por outro lado, esses níveis são praticamente os mesmos observados entre os amortecedores e os pesos adicionais, ou seja baixos em relação aos níveis vibracionais sem os amortecedores para cabo livre.

## 7.0 - CONCLUSÃO

A substituição dos condutores CAA por cabos CAL (alumínio liga 6201) foi realizada com sucesso, com as linhas operando comercialmente há cerca de 2 anos. Para a recapacitação de outras linhas já existe a previsão de se utilizar este cabo. Conforme mostrado neste trabalho, os projetos de recapacitação, sejam com cabos tradicionais ou novas tecnologias, exigem cuidados especiais quando comparados à implantação de novas linhas.

Os ensaios de vibração foram importantes na determinação do melhor posicionamento dos amortecedores, primeiramente sem a utilização de pesos adicionais, e principalmente com a colocação de pesos, com os amortecedores colocados a frente dos pesos na distância recomendada pela Copel, mostrou que o melhor posicionamento seria a 200 mm em direção à ancoragem fixa a partir da recomendação (referência em 992 mm dos pesos adicionais), ou seja os amortecedores ficaram a 792 mm dos pesos adicionais. Esta posição garante níveis vibracionais dentro dos limites de norma para que não se tenha processo de fadiga acelerado entre o cabo e o pré-formado dos pesos adicionais. Verificou-se também que, mesmo assim, com os níveis de vibração bem baixos entre os pesos e a ancoragem ou suspensão cabo-isolador, em determinadas freqüências aparecem amplitudes razoáveis nesta região.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Utilização de Cabos de Alumínio Liga 6201 em Linhas de Transmissão 230kV – Casos Práticos” – Airton Eustáquio B. Jr, André Luiz G. da Silva, Gustavo M. Lauria e Monalisa L. B. Lourençoni – XVIII SNPTEE – Curitiba, 2005.
- [2] Barbieri, N. ; Souza Júnior., Oswaldo Honorato de ; Barbieri, Renato . Dynamical analysis of transmission line cables. Part 1 - Linear Theory. Mechanical Systems And Signal Processing, UK, v. 18, n. 3, p. 659-669, 2004.
- [3] Barbieri, N. ; Souza Júnior, Oswaldo Honorato de ; Barbieri, Renato . Dynamical analysis of transmission line cables. Part 2. Damping estimation . Mechanical Systems And Signal Processing, UK, v. 18, n. 3, p. 671-681, 2004.
- [4] Barbieri, N. ; Barbieri, Renato ; Souza Júnior, Oswaldo Honorato de . ANÁLISE DINÂMICA DE CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO. In: Décimo Congresso Chileno de Ingeniería Mecánica - COCIM 2002, 2002, Santiago, 2002.
- [5] Barbieri, N. ; Barbieri, Renato ; Souza Júnior, Oswaldo Honorato de . ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMAS MECÂNICOS ATRAVÉS DE MODELOS REDUZIDOS. In: Décimo Congresso Chileno de Ingeniería Mecánica - COCIM 2002, 2002, Santiago, 2002.
- [6] Barbieri, N. ; Souza Jr., O. H. ; Barbieri, Renato . Análise dinâmica de cabos.. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001, Uberlândia - MG. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001.
- [7] J. J. Espíndola, J. M. Silva Neto, Identification of Flexural Stiffness Parameters of Beams, J. Braz. Soc. Mech. Sci. 23(4) 2001
- [8] P. Hagedorn, N. Mitra, T. Hadulla, Vortex-excited vibrations in bundled conductors: a mathematical model, Journal of Fluids and Structures 16(7) (2002) 843-854.
- [9] D. Sauter, P. Hagedorn, On the hysteresis of wire cables in Stockbridge dampers, International Journal of Non-Linear Mechanics 37 (2002) 1453-1459.
- [10] H. Verma, The stockbridge damper as a continuous hysteric system in single overhead transmission lines, Master Dissertation, Indian Institute of Technology Bombay, (2002) 81p.