

# Desenvolvimento de Condutores Compactos Aplicados a Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão

E. B. Giudice,\* – C. A. M. Nascimento – G. E. Guimarães – G. E. Braga – O.C. Filho – CEMIG  
J. O. S. Paulino – G. C. Miranda – A. Q. Bracarense – L. A. Costa - UFMG  
S. Ueda – Furukawa

## RESUMO

Este trabalho representa os esforços para o desenvolvimento de um cabo condutor compacto, que foi desenvolvido a custos reduzidos e com tecnologia alternativa, contando com a parceria entre CEMIG, FURUKAWA E UFMG. O objetivo principal foi reduzir as perdas elétricas e aumentar a eficiência dos cabos aéreos para os sistemas de transmissão e subtransmissão da CEMIG. A preocupação inicial foi com a geometria dos fios, de forma a conceber um protótipo que correspondesse com os anseios técnicos/econômicos e que viesse a trazer benefícios e manter a confiabilidade. O projeto contou com uma série de verificações de campo e simulações mecânicas e elétricas em laboratório, através de ensaios especiais em temperaturas elevadas de operação. Os resultados obtidos neste projeto de P&D serão apresentados, para demonstrar os ganhos advindos do desenvolvimento do primeiro cabo compacto brasileiro, destacando os principais pontos relevantes do projeto.

## PALAVRAS CHAVE

Ampacidade, Condutor Compacto, Redução de Perdas.

## I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de carregamento elétrico das Linhas Aéreas de Transmissão e Subtransmissão, associado a necessidade de aproveitamento otimizado das faixas de servidão, motivou o estudo de um condutor de performance elevada e custos otimizados. Diante de um mercado com um amplo desenvolvimento de novas ligas e

Este trabalho faz parte do programa de pesquisa e desenvolvimento ANEEL, ciclo 2000-2001, conduzido pela CEMIG, UFMG e FURUKAWA.

Este desenvolvimento contou com a participação de uma grande equipe, dedicação e empenho dos professores da UFMG ( Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino e-mail: josvaldo@eee.ufmg.br, Glássio Costa de Miranda – e-mail: glassio@cpdee.ufmg.br, Alexandre Queiroz Bracarense – e-mail: Queiroz@vesper.demec.ufmg.br.

Este trabalho contou ainda com a colaboração da Superintendência de Expansão das Rede de Transmissão e Subtransmissão - ER., e com o total apoio da Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão – ERLT- CEMIG

Este artigo foi elaborado pelos engenheiros: Edino Barbosa Giudice Filho (e-mail: edino@cemig.com.br) - (031) 3299 4256 e Carlos Alexandre Meireles Nascimento – e-mail: caxandre@cemig.com.br - (031) 3349 3382.

Belo Horizonte, 30/07/2002.

geometrias diversas, o emprego de condutores compactos [1] de alta performance, no sistema elétrico nacional, ainda são restritos. Sendo assim em um mercado cada vez mais exigente, torna-se necessário um melhor aproveitamento dos corredores das Linhas Aéreas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Neste sentido, o projeto concentrou esforços em desenvolver um modelo de condutor compacto tradicional e em Liga de Alumínio Termorresistente [2], com características bem próximas do desejado ou seja um cabo condutor capaz de inserir um ganho quando comparado com os tradicionais, permitindo a sua operação em altas temperaturas com ganhos de carregamento e redução de perdas, preservando as suas características mecânicas e elétricas.

## II. OBJETIVO

Desenvolver, com base no estado da arte, em parceria entre a CEMIG, Nexans (Ex-FURUKAWA do Brasil) e UFMG, um cabo condutor compacto, tradicional e em liga de alumínio termorresistente, a custos otimizados, que atendessem aos requisitos de um condutor compacto com desempenho elétrico e mecânico normalizado.

## III. DESENVOLVIMENTO

Após as visitas técnicas realizadas no início do projeto a vários institutos de pesquisa e fabricantes, foram verificadas técnicas e processos de fabricação destes condutores compactos, que diante dos elevados custos do processo de fabricação observado, tornou-se um desafio produzir um condutor compacto nacional com as características e performance que procurávamos.

Os processos de fabricação observados no exterior, são complexos e compostos de várias etapas e máquinas especiais dedicadas, o que confere uma alta eficiência dos modelos disponíveis no mercado a um altíssimo custo.

Desta forma houve a necessidade de realizar estudos e adaptações nos processos de fabricação, confecções de ferramentas especiais e matrizes (fieiras) com formas trapezoidais dos fios da coroa interna como é mostrado na Figura 1. Sendo assim foi incorporado ao processo



FIGURA 1- Ferramentas incorporadas ao processo

produtivo tradicional juntamente com ajustes na trançadeira e técnicas alternativas desenvolvidas para a concepção dos protótipos testados.

Após uma série estudos [3,4], tentativas, adaptações de processo e ensaios, foram concebidos os condutores compactos de baixo custo onde a preocupação inicial foi com a geometria dos fios, de forma a conceber um protótipo de condutor, que correspondesse com as premissas técnicas e financeiras de otimização. Bem como trazer benefícios e confiabilidade ao setor elétrico. O projeto contou com uma série de verificações e análises mecânicas, elétricas e de campo, com o desenvolvimento de metodologia alternativa para realização de ensaios especiais em altas temperaturas.

Foram realizadas análises química, metalográfica, microdureza; ensaios de tração à ruptura dos fios; ensaios de tensão deformação do condutor, vibração eólica e outros. Os ensaios especiais para a análise de Corona Visual, sob chuva e temperaturas até 150 °C, foram realizados com equipamentos detectores de ruído direcionais e de visão noturna, caracterizando uma nova metodologia de testes. Os ensaios de ruído irradiado, conduzido e de campos eletromagnéticos foram realizados em espectros amplos de frequências.

Utilizando alguns dos dados construtivos do novo condutor desenvolvido, e trabalhando a temperaturas de projeto próximas de 150 °C, observa-se que estes cabos apresentam resistência elétrica igual aos cabos tradicionais, de mesmo diâmetro a 75 °C, o que lhes conferem uma melhor performance quanto a perdas e regulação. Estes resultados são apresentados no item seguinte através de tabelas, gráficos e alguns comentários.

#### IV. RESULTADOS

Mostraremos, de forma sintética, o resultado dos estudos e ensaios realizados, apresentando os pontos mais importantes observados.

##### A. Ensaios Mecânicos

Após a confecção dos primeiros de fios trapezoidais e a concepção dos primeiros protótipos de condutores

compactos, uma série de estudos e ensaios foram realizados. A análise metalográfica por microscopia ótica e eletrônica da seção dos fios, a análise química, a microdureza e tração mecânica foram aprovados em todos os testes realizados.

##### B. Ensaio de Tensão-Deformação do Cabo Conductor

O ensaio de tensão-deformação foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento do cabo condutor em diferentes solicitações.

As figuras 2 e 3 mostram respectivamente, uma bancada de 12 m, um sistema hidráulico digital de carregamento de medição das cargas e a região do rompimento do condutor. A medição dos alongamentos foram feitos por relógio comparador.



FIGURA 2- máquina de ensaio de Tensão-deformação



FIGURA 3- Rompimento do Cabo

O ensaio foi realizado conforme norma ABNT NBR 7302, apresentando resistência mecânica calculada (RMC) do condutor completo de 6.397 Kgf e da alma da aço de 3.940 Kgf, de acordo com norma ASTM para condutor tradicional [5]. O ensaio mostrou que cabo condutor compacto tem desempenho, sob o ponto de vista de resistência mecânica superior ao condutor tradicional.

##### C. Ensaios Elétricos - Análise do Efeito Corona e RIV nos protótipos

A Figura 4 mostra os resultados obtidos em laboratório. Os valores obtidos nesta medição foram bem abaixo do esperado para este tipo de condutor, esperava-se o início de corona entorno de 120kV, mas as medições apresentaram o Joelho de RIV em torno de 90kV, devido à característica física do condutor utilizado. Devido ao processo de

fabricação otimizado, algumas ranhuras foram observadas em sua superfície, o que levou a valores de início de corona a valores inferiores aos normalmente encontrados em medições de laboratório, sendo que, apesar disso, o condutor foi considerado em condições normais de uso.[6,7,8,9 e 10]

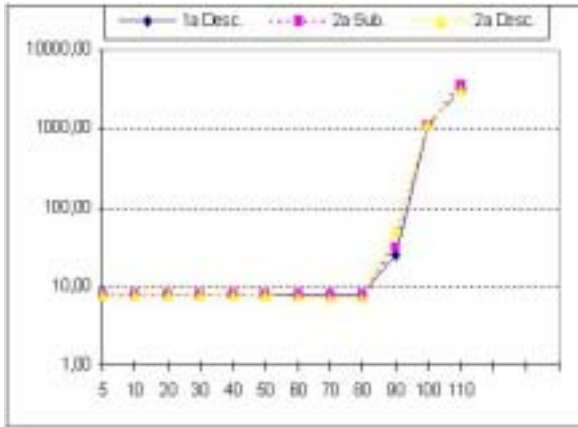


FIGURA 4 – variação riv (dbxkv)

#### D. Obtenção do Corona Visual Especial – Temperaturas elevadas

As Figuras 5 e 6 mostram os ensaios especiais realizados em laboratório.



FIGURA 5 – Condutor no Centro da Gaiola - Cabana

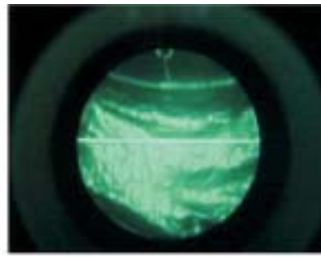


FIGURA 6 – Equipamento Visão Noturna

A Tabela I apresenta os valores de tensão de início de corona (kV) para o circuito de corona especial

TABELA 1

Tensão de Início de Corona (kV)			
	24°C	35°C	100°C
Esfera	35		
Normal	43	44	39
Gota D'água	29	23	23

Na configuração *normal*, ou seja, o condutor centrado na gaiola, em uma configuração coaxial, foram feitas medições em três valores de corrente tais como: corrente zero, 200A (correspondente a 30-35 °C) e 600 A (correspondente a 80-100 °C). A Tabela II apresenta a variação de temperatura na superfície do condutor para alguns valores de corrente, e o tempo no qual a corrente foi aplicada ao condutor.

Com a aplicação de água no condutor, em forma de gotejamento controlado, mostrado nas Figuras 7 e 8, nota-se que as tensões de início de corona são bem menores, variando sensivelmente com a temperatura do condutor. As gotas de água são maiores que a esfera utilizada anteriormente, levando a tensões de início de corona menores que as anteriormente medidas. Com o condutor quente, ocorre a evaporação da água, o que leva a tensões abaixo de 23kV.

TABELA 2

Relação Corrente x Temperatura

Corrente (A)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
0	23	
8	23	15
50	24	20
100	26	20
200	30-35	20
400	50-65	20
600	88-100	20
800	135-150	20

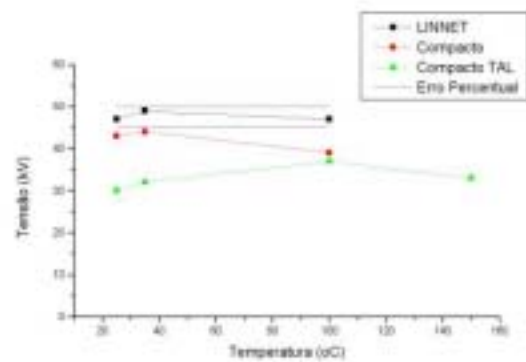


FIGURA 7 – Comparação do Início de Corona Comum

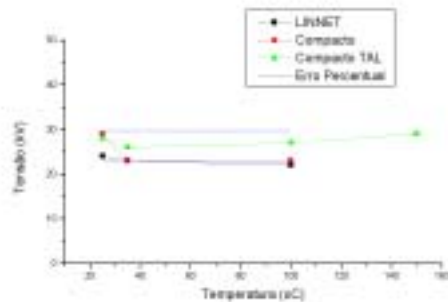


FIGURA 8 – Comparação do Início de Corona com Gota

As diferenças nos valores da tensão de início de corona para os condutores a quente foram mínimas com campo não-uniforme, mesmo para temperaturas muito elevadas.

As tensões de início de corona sob chuva, neste caso de gotejamento controlado, mostraram-se menores, como já era esperado, tanto para os campos uniforme quanto não-uniforme. As tensões de início de corona sob chuva a quente, mostraram diferenças mínimas, dentro do erro de medição do sistema utilizado, tanto para campos uniformes quanto não-uniformes.

As tensões de início de corona para o condutor compacto, foram menores que aquelas obtidas para o condutor LINNET tradicional. Já as tensões de início de corona para o condutor compacto liga TAL foram muito menores que as tensões obtidas para os outros condutores, valores estes, a princípio, creditados a ranhuras apresentadas pelo mesmo.

### E. Medições de Campo eletromagnético 5Hz – 3GHz medições de ruído e campo eletromagnético.

As Figuras de 9 a 11 mostram as medições de ruído conduzido, ruído irradiado e campo elétrico, na configuração de cabo monofásico próximo das condições encontradas em uma linha real serão obtidas somente com aplicação de tensão, devido aos resultados encontrados com os condutores a quente na tensão de início de corona – o comportamento dos mesmos é previsível, podendo ser analisado somente os valores de medição obtidos com a aplicação de tensões variando de zero a 200kV.

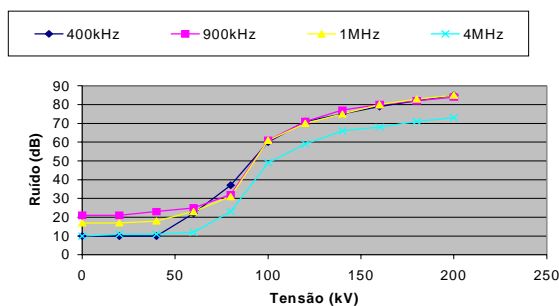


FIGURA 9 – Ruído conduzido (dB) - 9kHz – 30MHz

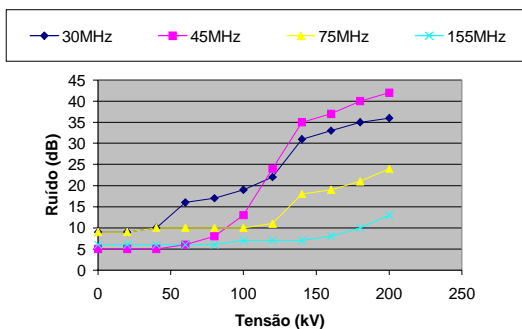


FIGURA 10 – Ruído Irradiado (dB) 30MHz – 3GHz

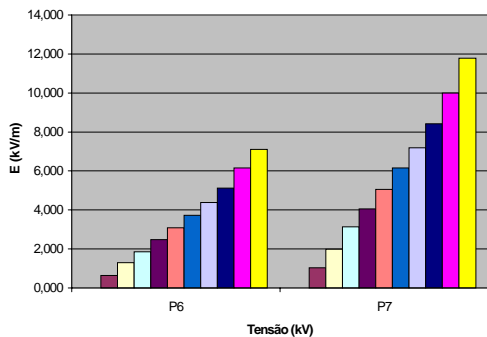


FIGURA 11 – Campo Elétrico 5Hz-30kHz

### F. LT Experimental e Medição de Vibração

Na Figura 12 é apresentado os resultados das medições de vibração eólicas comparando o novo modelo de condutor compacto desenvolvido com cabos tradicionais de mesma bitola instaladas em LT Experimental. O nível de vibração eólica medido nos equipamentos, apresentou valores muito baixos, em termos de amplitude de vibração, nos condutores da LT. A vida útil estimada dos condutores é muito elevada devido ao nível de vibração medido nos equipamentos Pavica.

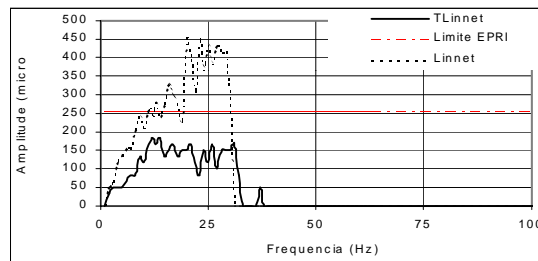


FIGURA 12 – Amplitude máxima por classe de frequência

### G. Propriedades dos Novos Condutores Compactos

Na Tabela III são apresentados algumas das propriedades elétricas dos condutores compactos desenvolvidos, Cabo Compacto em Alumínio 1350 (CC) e o Cabo Compacto em Liga de Alumínio Termorresistente (C TAL).

TABELA 3  
Relação Correntex Temperatura

Cód.	RESISTÊNCIA C.A. (Ohm/km) REATINDUT. (Ohm/km)			
	75 °C	90 °C	125 °C	150 °C
C.C	0,1702	0,1786	0,1983	0,2113
C.TAL	0,1724	0,1810	0,2010	0,2141

### H. Perdas e Regulação

Com os condutores compactos TAL trabalhando a uma temperatura de Projeto de 150 °C obteve uma Resistência Elétrica CA igual ao Linnet Tradicional a 75 °C. Alguns valores comparativos são apresentados para uma rápida avaliação de Perdas e Regulação:

- Linnet Tradicional a 75 °C: 0.20773 Û/km
- Linnet TAL a 75 °C: 0.21154 Û/km
- Linnet TAL a 150 °C: 0.2700 Û/km
- Linnet TAL Compacto a 150 °C: 0.21419 Û/km

Com base nestes valores fizemos uma breve simulação das possíveis perdas e regulação, conforme o exemplo a seguir:

LT com 100MVA – 75 °C e 50 km utilizando :

- Linnet Tradicional:  
Perdas: 6.50 % // Regulação: 12.15 %
- Linnet TAL :  
Perdas: 6.85 % // Regulação: 12.54 %
- Linnet TAL compacto :  
Perdas: 5.47 % // Regulação: 11.01 %

## V. ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLIFICADA

Observa-se que para distâncias maiores do que 50 Km e dependendo do carregamento requerido, deve-se atuar na compensação/regulação de tensão. Os ganhos computados comparando o condutor tradicional Al 1350 a 75°C Linnet e a liga TAL, Liga de Alumínio Termorresistente - Linnet, trabalhando à temperaturas acima de 120°C, já subtraídas as perdas, é em torno de aproximadamente 40 MW. Com o desenvolvimento da geometria compacta aplicada aos condutores tradicionais e à liga TAL, conseguiu-se através da redução da resistência elétrica, mostrada na Tabela III, é possível alcançar distâncias maiores e/ou a redução das perdas elétricas, melhorando também a regulação.

Fazendo uma estimativa para cada MWh transmitido por mês, computada uma tarifa média entre compra e venda na faixa aproximada de R\$ 5.256,00, verifica-se que um ponto ótimo de aplicação do novo modelo de condutor compacto desenvolvido. Desta forma fizemos uma breve avaliação econômica, comparando a evolução alcançada com o desenvolvimento da geometria compacta, aplicado a uma Linha de Transmissão com carregamento de 100 MVA, temperatura de projeto de 75 °C e comprimento de 50 km obtendo os valores quantificados para as perdas conforme é mostrado abaixo:

- *Linnet Tradicional:*  
 $100 \text{ MVA} \times \text{R\$ } 5.256,00 = \text{R\$ } 525.600,00$  – (Perdas de R\$ 34.164,00)
- *Linnet TAL:*  
 $100 \text{ MVA} \times \text{R\$ } 5.256,00 = \text{R\$ } 525.600,00$  – (Perdas de R\$ 36.003,60)
- *Linnet TAL compacto :*  
 $100 \text{ MVA} \times \text{R\$ } 5.256,00 = \text{R\$ } 525.600,00$  – (Perdas de R\$ 28.750,32)

## VI. CONCLUSÕES

No desenvolvimento construtivo da superfície externa foi observado uma melhora no perfil de troca de calor e espera-se uma diminuição do arrasto do condutor compacto em relação ao tradicional. Como isso, conseguiu-se a redução das perdas elétricas desejadas, que viabilizaram o protótipo.

Nesse projeto de P&D, embora a redução das perdas elétricas com o novo modelo foi significativa, 16% de redução em comparação ao condutor tradicional de mesma bitola, não conseguindo-se uma superfície externa homogênea que fornecesse um desempenho ótimo nos aspectos, gradiente superficial [11], RIV e Corona.[12]

Desta forma é importante a continuidade dos trabalhos, na busca da melhoria destes pontos observados. Outro aspecto importante que deve ser dada atenção às ferragens, emendas à compressão e grampos de ancoragem.

## VII. PERSPECTIVAS FUTURAS

Alternativas poderão ser utilizadas para melhorar alguns aspectos do cabo condutor, que até o momento não foi conseguido, tais como: superfícies mais polidas e homogêneas. Com a redução das perdas elétricas do novo modelo de condutor compacto, será possível melhorar a sua superfície, podendo trabalhar também com faixas e estruturas mais reduzidas.

Os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de condutores aéreos nus, utilizando ligas de altas temperaturas e geometrias mais adequadas é vasto e pouco aplicado. Apesar do largo campo de pesquisa e desenvolvimento disponíveis.

Tecnologias novas estão em pleno desenvolvimento, como exemplo citamos a utilização de tecnologias para aliar alta condutividade em altas temperaturas, para utilizar e explorar mais as ligas disponíveis, resultando em condutores de menor peso e mais eficientes.

De um modo geral os resultados mostram-se promissores, com indicativos de se poder trabalhar mais alguns aspectos observados, que podem permitir além da maior eficiência dos condutores compactos desenvolvidos no Brasil.

## VIII. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado do esforço e dedicação, compartilhado entre vários colegas de trabalho, professores, com os quais continuamos a aprender e desenvolver.

Um agradecimento em especial a Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão da ER/LT – CEMIG e UFMG, que nos deram o suporte necessário para que este trabalho se realizasse.

Em especial, agradecemos as parcerias desse P&D.

- **FURUKAWA**  
Eng. Sidnei Massami Ueda
- **Professores ( UFMG):**  
*Depto. Elétrica:*  
José Osvaldo Saldanha Paulino  
Gláscio Costa de Miranda  
Eng. José Luiz Cerqueira Lima  
Wallace do Couto Boaventura  
*Depto. Mecânica:*  
Alexandre Queiroz Bracarense
- **PARTICIPANTES DOS ÓRGÃOS –CEMIG:**  
Gerência de Engenharia de Linhas de Transmissão e Subtransmissão –ER/LT  
José Milton da Costa Brito  
Gernan Edson Gimarães  
Giovani Eduardo Braga  
Osvaldo Campos Filho  
Toda a equipe técnica e administrativa que trabalhou no projeto

Aos demais companheiros CEMIG que participaram indiretamente deste trabalho, os nossos agradecimentos.

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] EDF – ELECTRICITÉ DE FRANCE - Project Conjoint de de Recherche et D'Essais sur les conducteurs Compacts . Hydro Québec - Joint Research and Testing Project on Compact Conductors
- [2] Nascimento, Carlos Alexandre M. – Metodologia Experimental para a Utilização de Cabos Termorresistentes (TAL) em Linhas e Redes de Distribuição – Dissertação de Mestrado – UFMG – Dpto. de Eng. Mecânica – Out/1999
- [3] Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above 2nd ed. Electric Power Research Institute
- [4] Rubens Dario Fuchs “Transmissão de Energia Elétrica : Teoria das Linhas em Regime Permanente – vol. 2”.
- [5] ABNT NBR 7302 – Condutores Elétricos de Alumínio tensão –deformação em condutores de alumínio – Método de ensaio
- [6] NBR 7876 – Linhas e Equipamentos de alta tensão – Medição de Radiointerferência na faixa de 0.15 a 30 mhz
- [7] ABNT NBR 7302 – Condutores Elétricos de Alumínio tensão –deformação em condutores de alumínio – Método de ensaio
- [9] NEMA 107 – Methods of Measurement of Radio Influence Voltage ( riv ) of high –voltage apparatus
- [10] NBR 6936 – Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta tensão
- [11] Safe Engineering Services & Technologies ltd. “ CDEGS – Current Distribution Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure Analysis” .
- [12] NBR 7875 – Instrumentos de Medição de Rádiointerferência na faixa de 0.15 a 30 mhz Belo Horizonte, 30/07/2002.