



**GRUPO III
LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

**DIAGNÓSTICO DE DESEMPENHO SOB AÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE LT EM
PROJETO COM APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE ZnO**

Ana Cristina Guará Bezerra *
Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG

RESUMO

O objetivo deste informe é apresentar um diagnóstico, em fase de projeto, do desempenho da LT Itutinga-Três Corações 2, 138kv, sob descargas atmosféricas de modo que melhorias sob criteriosos enfoque técnico-econômico sejam executadas em seu projeto incluindo a instalação de pára-raios de óxido de zinco, tendo em vista a satisfação dos consumidores.

Através de análise de várias alternativas simuladas no Programa EMTP considerando os níveis de energia nos pára-raios e avaliadas no Programa FLASH para análise de desempenho, foram instalados de 3 pára-raios por estrutura em 48 estruturas e recomendados o uso de redutores de resistência de aterramento em 39 estruturas. A LT possui 87,04 km de extensão com 192 estruturas. A expectativa de melhoria de desempenho da LT caiu de 16,2 para 3,3 desligamentos/ 100km /ano.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão - Desempenho - Descarga atmosférica – Pára-raios de ZnO.

1.0 - INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são a causa principal dos desligamentos não programados dos sistemas elétricos. O sistema de transmissão da CEMIG apresenta índices superiores aos internacionais, uma vez que está inserido em região de alta atividade cerâmica e com altos valores de resistividade do solo, agravando o bom desempenho operativo das LTS. Estatisticamente o

número de religamentos automáticos com sucesso atinge cerca de 70 % dessas saídas sendo a maior causa dos desligamentos permanentes (aproximadamente 20%).

Em geral, através de uma proteção adequada oferecida pelos cabos pára-raios e um dimensionamento criterioso do aterramento é possível obter-se uma melhoria no número de desligamentos por descargas atmosféricas de uma LT. Recentemente, a utilização de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) tem permitido a obtenção de melhoria significativa de desempenho das linhas de transmissão especialmente em locais de alta diversidade operacional.

Atualmente, a análise de melhoria de desempenho sob descargas atmosféricas das LTS em operação na CEMIG vem sendo executada em duas etapas:

- aplicação de medidas convencionais que foram apresentadas detalhadamente no XIV SNPTEE – Belém- Pará (etapa a).
- aplicação de pára-raios de ZnO, quando as medidas convencionais não suficientes para obtenção da melhoria desejada, sob o enfoque da relação custo x benefício que o mesmo proporciona ao desempenho da LT (etapa b).

2.0 – CARACTERÍSTICAS DA LT

2.1- Adiversidade operacional da microregião

A LT Itutinga -Três Corações 2 está inserida em região de altas densidades de descargas (10descargas/km²/ano) agravando o seu desempenho por descargas atmosféricas. As curvas de probabilidades das correntes de descargas atmosféricas

descendentes negativas serem excedidas de acordo com a referência 1 estão na Figura 1.

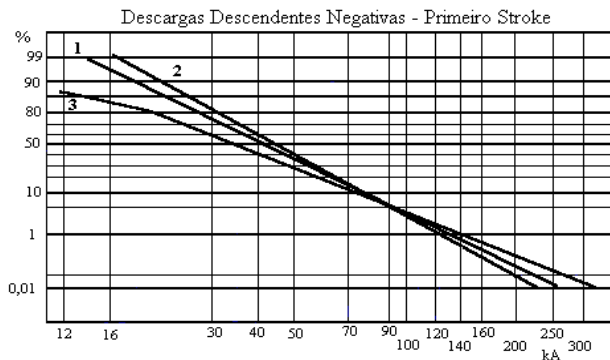


FIGURA 1-PROBABILIDADE DAS DESCARGAS DESCENDENTES NEGATIVAS SEREM EXCEDIDAS

NOTA:

- 1-CEMIG: 32 descargas obtidas no Cachimbo, como descendentes através de registros fotográficos e/ou pela forma de onda.
- 2- CEMIG: 56 descargas negativas registradas no topo de suportes de LTs de 138kV, através de elos Magnéticos.
- 3- CIGRÉ: curva de referência para descargas descendentes negativas (Ref. ELECTRA 69).

2.2- Características elétricas da Lt

A LT Itutinga –Três Corações 138kV, possui cabo condutor Linnet, cabo pára-raios 5/16Hs (simples), 87,07 km de extensão, estrutura típica L6 totalizando 192 estruturas.

2.2.1- Resistência de aterramento dos suportes

A resistividade do solo foi medida em todos os pontos onde serão instalados os suportes e à partir do Programa MALTO , as resistências de aterramento foram calculadas . A distribuição de frequência de ocorrência de resistências de impulso estão apresentadas na Figura 2 tomando como base a referência 2.

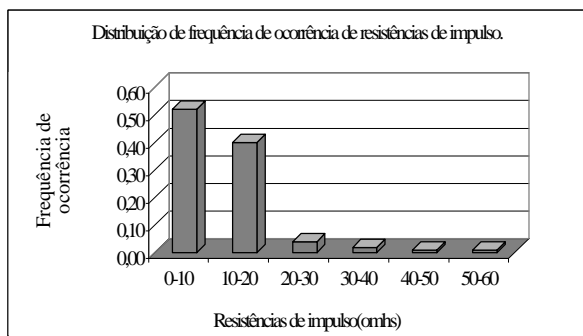


FIGURA 2- DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE RESISTÊNCIAS DE IMPULSO

3.0- ANÁLISE DE SOBRETENSÕES NAS CADEIAS DE ISOLADORES

Para uma cadeia de isoladores composta de 9 unidades ,a suportabilidade para descargas atmosféricas V50% (+) é 785 kV e V50% (-) é 760kV. De acordo com a referência 3, para um FCA de 0,9 e considerando apenas as sobretensões de polaridade negativa, foi assumido o valor V50% das cadeias de 685 kV.

A Figura 3 representa a análise de sobretensões através da cadeia de isoladores na torre de impacto utilizando o Programa EMTP para simular o impacto de uma descarga diretamente na estrutura, considerando todas as resistências iguais a R e uma descarga com 50 % de probabilidade de ser excedida conforme Figura 1.

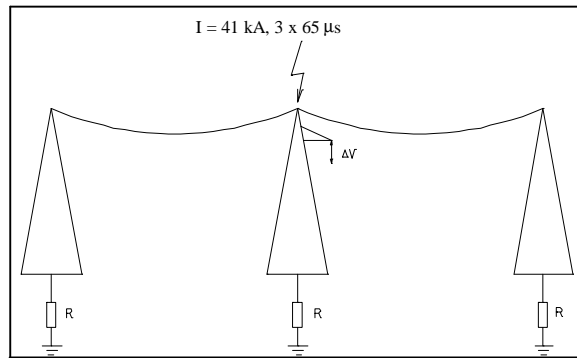


FIGURA 3- SIMULAÇÃO DE DESCARGA NO TOPO DA ESTRUTURA

Os resultados das simulações estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1- SOLICITAÇÕES NAS CADEIAS PARA 41KA TF = 3 X 65 μS, P(I > 41 KA) = 50%

R.aterramento de impulso(Ω)	ΔV (kV)	V50% cadeia(kV)
5	282	685
10	372	
15	512	
20	645	
30	916	
50	1387	

Pela Tabela 1 observa-se que o isolamento suporta sobretensões para resistências de impulso de até 20Ω, para correntes de descargas de até 41 KA (50%). Acima de 20Ω de resistência de impulso o isolamento não suporta e ocorre backflashover.

Para descargas de 100KA , P(I > 100 KA) = 4%, Tf = 3 x 65 μs ,a Tabela 2 apresenta as solicitações através dos isolamentos. Pela Tabela 2 apenas para

resistências de 5Ω de impulso o isolamento suportaria uma sobretensão causada por corrente de descarga de 100 KA.

TABELA 2- SOLICITAÇÕES NAS CADEIAS PARA CORRENTE DE 100 KA, TF = 3 X 65 μS

R. aterramento impulso(Ω)	ΔV (kV)	V50% cadeia (kV)
5	620	685
10	908	
15	1261	
20	1573	
30	2208	
50	3404	

4.0 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LT

Para a etapa(a),o desempenho da LT Itutinga – Três Corações 2 foi avaliado por intervalo de classe de ocorrências de resistências de aterramento (Figura 2) através do Programa FLASH versão CEMIG, tendo uma expectativa de 16,2 desligamentos/100km/ano, já aplicando as medidas convencionais de melhoria de desempenho ,ou seja, melhoria das resistências de aterramento de alguns suportes.

5.0- APLICAÇÃO DE MEDIDAS NÃO CONVENCIONAIS PARA MELHORIA DESEMPENHO DA LT

Visando obter melhoria no desempenho esperado da LT, medidas não convencionais como a instalação de pára-raios ZnO foram analisadas sob o enfoque do custo x benefício que o mesmo proporciona ao desempenho da LT (etapa b).

5.1- Características preliminares do pára-raios ZnO

Pára-raios ZnO , invólucro polimérico, classe II de absorção de energia, com desconector de linha. MCOV = 98kV. Curva V x I de fabricante fornecedor do equipamento.

Capacidade de absorção de energia = 2,2 kJ/ kV ou seja 2,2 x 98 = 216kJ.

5.2- Definição dos níveis de energia do pára-raios ZnO

Foram simulados no programa EMTP alguns vãos da LT já com os pára-raios instalados nas fases ,variando-se o número de pára-raios por estrutura, porém mantendo-se o mesmo número por estrutura. O

objetivo desta simulação é definir os níveis de energia a serem absorvidos pelos pára-raios tendo em vista o limite de capacidade de absorção de energia do equipamento. A capacidade de absorção do pára-raios foi avaliada para descargas indiretas.

A Tabela 3 apresenta uma análise de aplicação de pára-raios ZnO para diversos valores de resistência de aterramento de impulso.

TABELA 3-NÍVEIS DE ENERGIA DO PÁRA-RAIOS ZNO PARA DESCARGAS INDIRETAS.

Nº ZnO/ estrut	I (ka)	Tf (μs)	Tc (μs)	R imp (Ω)	E (kJ)/ ZnO	ΔV (kV)	
1	40	2,6	62	5	487x10 ⁻⁴	278	
				10	234x10 ⁻³	370	
				15	981 x10 ⁻³	461	
				20	2,19	541	
				30	6,11	691	
				50	18,97	951	
	100	2,6	62	5	1,73	600	
				10	9,94	820	
				15	33,0	1031	
				20	64,50	1229	
				30	130 *	1596	
				50	232 *	2233	
	2	40	2,6	62	5	426x10 ⁻⁴	270
					10	197x10 ⁻³	350
15					825x10 ⁻³	422	
20					1,8	488	
30					4,84	605	
50					14,33	803	
100		2,6	62	5	1,42	540	
				10	8,04	717	
				15	26,14	884	
				20	49,14	1042	
				30	95,14 *	1327	
				50	164,14 *	1808	
3		40	2,6	62	5	399x10 ⁻⁴	—
					10	174x10 ⁻³	—
	15				723x10 ⁻³	—	
	20				1,54	—	
	30				4,1	—	
	50				11,88	—	
	100	2,6	62	5	1,22	—	
				10	6,89	—	
				15	22,31	—	
				20	40,84	—	
				30	76,6 *	—	
				50	127,87 *	—	

NOTA

Devido aos baixos valores de energia somente foram contabilizados a energia das descargas subsequentes para os casos marcados com * (0,30 do 1º stroke com a mesma Tf e Tc).

De acordo com a Tabela 3 observa-se que, para os valores de resistência de aterramento de impulso da

referida LT relativamente baixos, a instalação de um (1) pára-raio ZnO por estrutura é suficiente para correntes de aproximadamente 100KA sob o ponto de vista de energia. Entretanto as sobretensões nas cadeias de isoladores das outras fases sem ZnO atingem valores bastante elevados para resistências de impulso superiores a 5Ω . Com dois (2) pára-raios por estrutura

para correntes de até 40KA ,apenas para resistências superiores a 30Ω de impulso o isolamento da fase desprotegida não suportaria as sobretensões. Portanto, sob o ponto de vista de energia ,um (1) pára-raio por estrutura é suficiente . Sob o ponto de vista de melhoria de desempenho é necessário a aplicação de dois (2) ou três (3) pára-raios que serão definidos na análise de desempenho da LT.

5.3- Análise de melhoria no desempenho com aplicação de pára-raios ZnO

Os índices de desligamentos / 100km/ano estão apresentados na Tabela 4 .

TABELA 4 –NÚMERO DE DESLIGAMENTOS / 100KM /ANO

Classes de R. (Ω)	0 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50	50 a 60	Desl/100 km/ano	%
	Média (Ω)	5	15	25	35	45		
Sem ZnO	2,41	10,2	2,30	0,37	0,41	0,51	16,2	1,00
1 ZnO/est	1,99	7,30	1,41	0,23	0,28	0,32	11,5	0,71
2 ZnO/est	0,99	3,04	0,56	0,09	0,11	0,13	4,92	0,30
3 ZnO/est	0	0	0	0	0	0	0	0,00

Pela Tabela 4 observa-se uma redução de 29% no n° de desl/100km/ano com a instalação de 1 pára-raios por estrutura em todas as estruturas. Com 2 pára-raios por estrutura a redução é de 70%. Acima desta expectativa somente a instalação de 3 pára-raios/estrutura reduziria a zero o n° de desligamentos. Neste caso a taxa de saídas da LT estaria associado às taxas de falha do equipamento. Entretanto os custos das alternativas apresentadas na Tabela 4 são bastante elevados e portanto novas alternativas foram estudadas para a LT que possui 192 estruturas.

A Tabela 5 apresenta as novas alternativas de instalação de pára-raios para a LT Itutinga- Três corações 2.

Novas simulações foram feitas no EMTP para o Caso 4 da Tabela 5 sob o ponto de vista de sobretensões nas cadeias de torres adjacentes considerando a torre de impacto aquela do final do trecho coberto pelos pára-raios. O Caso 4 além de ser mais vantajoso

economicamente quando comparado ao Caso 2 apresenta uma expectativa de desempenho muito melhor (2,41 desligamentos /100km /ano).

TABELA 5 – NÚMERO DE DESLIGAMENTOS/ 100 KM /ANO

Caso	N° de ZnO / estrut. por intervalo classe						Total ZnO na LT	Desl/ 100 km/ano
	0 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50	50 a 60		
1	0	2	2	2	2	2	168	6,33
2	2	2	2	2	2	2	370	4,92
3	0	2	3	3	3	3	178	5,45
4	0	3	3	3	3	3	252	2,41

A Tabela 6 apresenta para representação da Figura 4 as máximas solicitações (ΔV) nas torres adjacentes para possíveis situações de distribuição de pára-raios ZnO na LT.

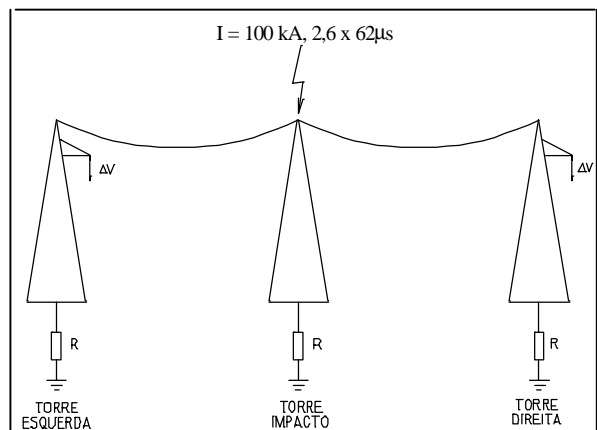


FIGURA 4 – SIMULAÇÃO DE DESCARGA NO TOPO DA TORRE

TABELA 6 - ANÁLISE DE SOLICITAÇÕES NAS CADEIAS DE ISOLADORES EM TORRES ADJACENTES À TORRE DE IMPACTO.

N° ZnO	Torre Impacto		Torre esquerda		Torre direita	
	R. imp. (Ω)	N° ZnO	R. imp. (Ω)	N° ZnO	R. imp. (Ω)	ΔV (kV)
3	5	3	20	0	5	424
	10	3	10	0	5	693
	10	3	15	0	5	693
	10	3	20	0	5	693

Pode ser observado pela Tabela 6 que as solicitações impostas às cadeias de isoladores adjacentes à torre de

impacto (à direita) não são elevadas (V 50% cadeias = 685 kV). Considerando que na simulação não está incluindo o efeito corona, espera-se que as solicitações sejam inferiores e portanto suportadas pelas cadeias de isoladores.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 6, foram levantados os trechos para instalação de 3 pára-raios por estrutura finalizando-se o trecho em torre cuja resistência de impulso esteja no intervalo de classe de 0 – 10 Ω (média de 5 Ω).

6.0 – APLICAÇÃO DE REDUTORES PARA REDUÇÃO DE RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO

Pesquisas realizadas na CEMIG indicam que a utilização de redutores através da bentonita aplicada ao contrapeso reduz em 50% o valor final da resistência de aterramento da estrutura.

Foram propostos a aplicação de redutores em 39 estruturas além do lançamento de contrapeso no restante das estruturas à partir de medições de resistividade conforme apresentado no item 2.2-1. Com o uso dos redutores foi possível propor uma solução mista técnico-economicamente mais viável reduzindo para o Caso 4 o número total de pára-raios na LT de 252 para 148.

A frequência de ocorrência de resistências de aterramento no intervalo de classe de 0 – 10 Ω passou de 0,548 para 0,756.

A Tabela 7 apresenta a relação de estruturas para a instalação de três (3) pára-raios por estrutura.

TABELA 7 – RELAÇÃO DE TRECHOS PARA INSTALAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZNO

Trecho	Torres	Total torres	Total ZnO
1	7 a 13	7	144
2	22 a 25	4	
3	28 a 36	9	
4	41 a 53	13	
5	58 a 64	7	
6	116 a 123	8	

A expectativa de desempenho da LT após a instalação dos pára-raios ZnO nos trechos apresentados na Tabela 7 e o uso de redutores nas 39 estruturas é de 3,3 desligamentos / 100 km /ano, correspondendo a uma melhoria de 80% no seu desempenho.

7.0- ARRANJO PARA INSTALAÇÃO DO PÁRA-RAIOS ZnO

Para a definição da localização de instalação dos pára-raios ZnO nas fases da LT foram estudadas à partir das séries de estruturas aplicadas no projeto da LT várias alternativas de fixação do equipamento. A

definição do arranjo tomou como base o balanço extremo do cabo condutor pela ação de vento extremo na região, a janela da estrutura e as distâncias elétricas para manutenção em linha viva. O arranjo que melhor apresentou, neste caso, facilidades para a instalação e ajuste nas distâncias elétricas para a janela da estrutura estão apresentados nas Figura 5 e 6 para torres de suspensão e ancoragem respectivamente.

FIGURA 5 – ARRANJO PARA INSTALAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZNO PARA SUSPENSÃO

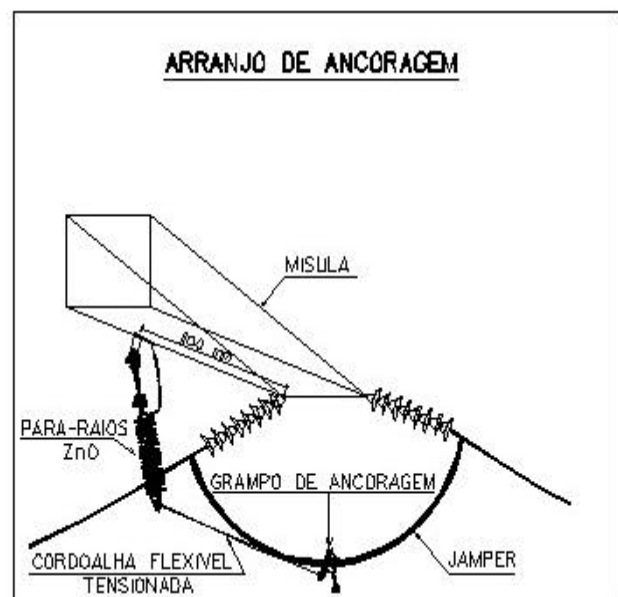
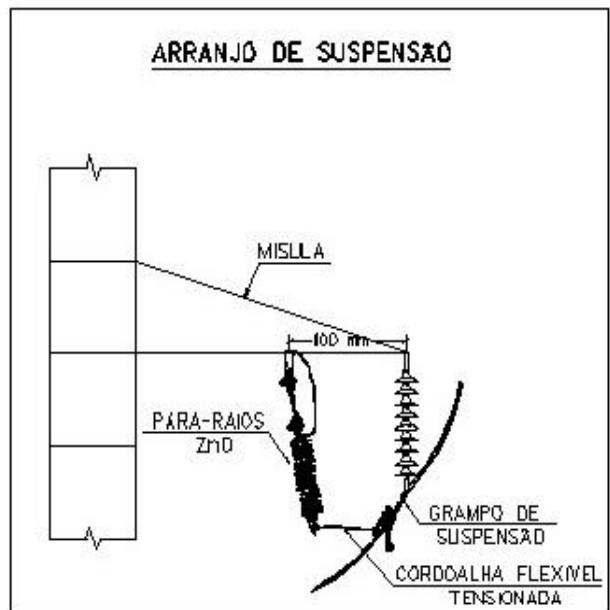


FIGURA 6- ARRANJO PARA INSTALAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZNO PARA TORRES DE ANCORAGEM

8.0 – CONCLUSÕES

O Diagnóstico de desempenho de LTs executado em duas etapas, a primeira convencional utilizando-se de artifícios de melhoria de resistência de aterramento e proteção da LT e a segunda, não convencional aplicando-se pára-raios de ZnO tem se mostrado uma solução eficaz na melhoria da qualidade da energia ofertada ao consumidor através de técnica criteriosa onde a relação custo x benefício ganha tônica na decisão da melhor solução.

Através de várias simulações executadas no Programa EMTP e avaliadas através do Programa FLASH concluiu-se que:

- O Caso 4, aplicação de três (3) pára-raios ZnO por estrutura, além de ser mais vantajoso economicamente quando comparado ao Caso 2 apresenta uma expectativa de desempenho muito melhor (2,41 desligamentos /100km /ano).
- Economicamente, três pára-raios por estrutura em toda a LT onera bastante o custo final do projeto.
- Uma solução mista, ou seja, aplicação de pára-raios ZnO através de exaustivas simulações de trechos críticos da LT juntamente com melhoria de resistência de aterramento dos suportes, através do uso de bentonita onde se justifica a melhoria desejada é economicamente viável e se mostrou como uma boa solução técnica.
- A LT Itutinga –Três Corações 2, 138kV, totalizando 192 estruturas apresentou uma expectativa de melhoria de 80% no seu desempenho com a aplicação de três pára-raios

por estrutura em 48 estruturas e melhoria de resistência de aterramento em 39 suportes com a aplicação de bentonita. A expectativa do desempenho caiu de 16,2 para 3,3 desligamentos / 100 km / ano.

9.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) TRIGINELLI, W.A.C ; CARVALHO A.M.;DINIZ, J.H; CHERCHIGLIA, L.C.L –Descargas atmosféricas – Principais Parâmetros Aplicáveis a Estudos de Engenharia, III SIPDA, SP, 1994.

(2) VISACRO, S.F.,SOARES – Representação simplificada da impedância de pé de torre de linhas de transmissão associados a descargas atmosféricas- XIII SNPTEE –Camburiú – out / 95.

(3) Aplicação de pára-raios ZnO em cadeias de isoladores da LT 138kV Mariana- Ouro Preto 2- USP/97

(4) EMTP- eletromagnetical Transients Program

10.0 – GRUPO PARA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE ZNO

Este trabalho é resultado de pesquisa aplicada ao projeto de linhas de transmissão à partir do estado da arte explorado pelo grupo interno da CEMIG para Aplicação de Pára-raios de ZnO em Linhas de Transmissão, composto pelos seguintes representantes:

- Ana Cristina Guará Bezerra
- Angélica de Oliveira Costa
- Luis Carlos Leal Cherchiglia