

## Comportamento da tensão no sistema do Mato Grosso do Sul, quando de defeitos na rede.

### Autores:

Eng° José Boaventura Sá Rosa - ENERSUL

Eng° Alexandro Alves Martins – ENERSUL

Engª Vera Lúcia Castro Soares - UFSC

### RESUMO

O sistema do Mato Grosso do Sul vem enfrentando problemas com o afundamento momentâneo e com a recuperação de tensão quando de ocorrências em linhas de distribuição de 138, 69, 34 kV e até mesmo em 13,8 kV. Os afundamentos de tensão aparecem em regiões próximas e geograficamente distantes do local do curto-circuito. Tem-se observado que antes que a tensão retorne a níveis aceitáveis de operação ocorre uma rejeição de carga de alguns clientes. A proposta deste trabalho é apresentar o problema e investigar, com base em ferramentas de simulação e com registros obtidos dos Registradores Digitais de Perturbações instalados no sistema, as causas da lenta recuperação da tensão no sistema do Mato Grosso do Sul e propor alternativas que melhorem a qualidade do fornecimento da energia, quanto a atenuação do afundamento e a velocidade do restabelecimento.

### 1 - INTRODUÇÃO

Atualmente os modelos utilizados para a simulação dos fenômenos e métodos de

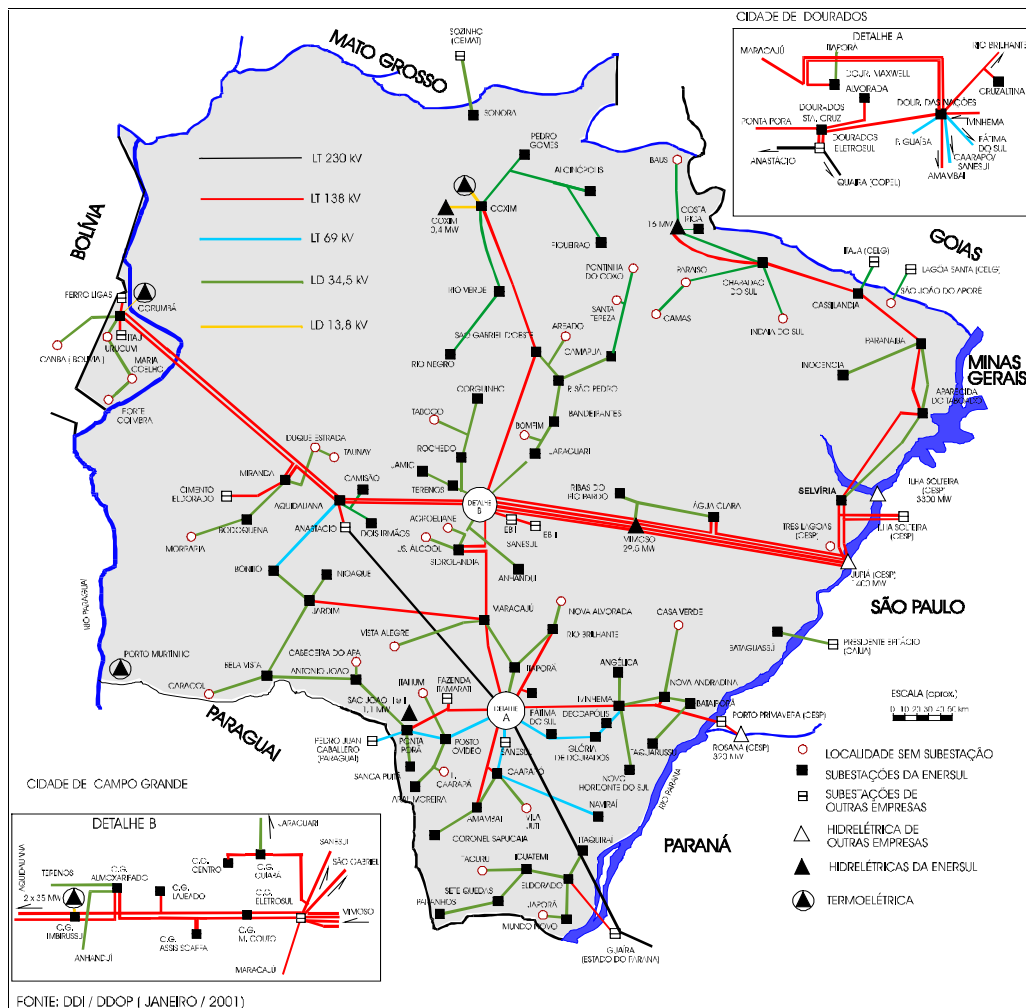
análise relacionados com a estabilidade de tensão são amplamente aceitáveis, sendo que alguns possuem um alto grau de sofisticação. O resultado destas ferramentas, confrontadas com casos reais monitorados pelos Registradores Digitais de Perturbação - RDP, fornecem uma confiabilidade nas conclusões apresentadas pelos engenheiros da área de planejamento e operação das concessionárias de energia elétrica.

Neste trabalho, o desempenho de um sistema real foi investigado através de técnicas de simulação computacional e análise de registros de perturbações com vistas ao afundamento de tensão e recuperação de tensão no sistema de Mato Grosso do Sul.

O fornecimento de energia elétrica do Mato Grosso do Sul sob concessão da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul - ENERSUL é composto por uma rede de transmissão em alta tensão em 230 kV e distribuição em 138 kV, com transformação para 69, 34,5 e 13,8 kV. São linhas longas que atravessam várias centenas de quilômetros para atender centros de carga geograficamente distantes, conforme diagrama simplificado da figura 1. Esta área opera bem compensada, com pequena geração local, e recebendo potência, cerca de 80% sua demanda atual do Sistema Interligado

Brasileiro, a carga própria de demanda atual é de 565 MWh/h. Com relação à estabilidade de tensão, foram feitos estudos na área do Mato Grosso do Sul nos anos de 1997 e 1998, quando foi detectado que o sistema estava no seu limite de atendimento próximo ao ponto de colapso de tensão [1 e 2]. Na época, adotou-se como principal solução, a adição de compensação capacitiva shunt, super-compensando o sistema, sendo recomendada a instalação de

geração térmica local para o ano de 1999 [3]. Observou-se recentemente que ainda persiste uma excessiva sensibilidade de tensão em alguns pontos da área mais afastados do Sistema Interligado, o que faz com que neles a qualidade de atendimento seja prejudicada porque se acumulam efeitos de perturbações locais e de sensibilidades remotas [4]. Isto ocorre com mais gravidade na região de Corumbá.



**FIGURA 1 – Sistema do Mato Grosso do Sul.**

A ENERSUL tem registrado Afundamentos Momentâneos de Tensão acentuados tanto em regiões próximas quanto distantes do ponto de defeito. Após a eliminação do defeito, observa-se uma lenta recuperação da tensão aos patamares aceitáveis para operação do sistema. Entende-se que a demora na recuperação da tensão tem levado a rejeição maior de carga do que em outros sistemas, haja visto o montante de carga rejeitado quando dos eventos registrados.

Para melhorar a resposta do sistema quando da abertura de linhas de transmissão é necessário aumentar o nível de curto-circuito, ou seja, a capacidade do sistema.

Numa primeira análise do trabalho será feita a validação de resultados de simulações com registros reais dos Afundamentos Momentâneos de Tensão ocorridos no sistema ENERSUL. As simulações foram efetuadas utilizando os programas ATP (Análise de Transitórios Eletromagnéticos) e ANATEM (Análise de Transitórios Eletromagnéticos) confrontando com ocorrências reais do sistema em vários pontos, sendo observado o reflexo no extremo da região de Corumbá. Nas simulações objetiva-se representar o sistema o mais semelhante no momento da ocorrência. Verifica-se que os resultados de simulação se aproximam bem dos valores registrados.

Será apresentado um estudo de caso no qual é analisada a presença de geração próximo ao centro de carga a fim de determinar a melhor opção do ponto de vista da recuperação de tensão após aberturas das LT's Aquidauana - Campo Grande Imbirussu, circuitos 1 e 2. Esta análise é realizada com os registros do RDP

instalado na subestação Campo Grande Imbirussu em diferentes regimes de carga do sistema. Nesta subestação está conectada a UTE Willian Arjona, a qual possui duas unidades geradoras de 35 MW cada.

## 2 - ANALISE DOS AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO - AMT

Foram analisados os efeitos dos curtos-circuitos nos Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMT) em regiões próximas e geograficamente distantes do ponto de defeito, através da simulação com o programa ATP e comparado com o registro do RDP, quando disponível, bem como analisada a influência da geração térmica na minimização dos efeitos citados.

As simulações foram feitas com base em ocorrências do sistema e medido o valor do afundamento máximo de tensão em algumas regiões.

A tabela 1 compara os resultados de simulação do ATP com os valores medidos a partir de registros obtidos de RDP's.

TABELA 1 – Comparação entre valores simulados e medidos.

CURTO-CIRCUITO	FERRAMENTA	
	ATP	RDP
LT 69 kV Dourados das Nações - SANESUL	25,1	23,0
LT 138 kV C. G. Eletrosul – C. G. Centro	71,0	74,0
LT 138 kV C. G. Eletrosul – São Gabriel D'Oeste	73,0	76,0

Observa-se pela tabela 1 uma boa aproximação dos valores simulados e medidos. A diferença dos valores se justifica por não se conhecer a localização exata do defeito para a

realização das simulações. No caso de um curto-circuito no início da LT 69 kV Dourados das Nações – SANESUL observa-se subtensões de até 25% nas barras de 13,8 kV da SE CG Miguel Couto (simulação pelo ATP), sendo que pelo RDP foi registrado 23% (curto em ponto indefinido da LT).

No caso de um curto circuito no meio da LT 138 kV Campo Grande Eletrosul – Campo Grande Centro observaram-se subtensões de até 71% nas barras de 13,8 kV da SE CG Miguel Couto (simulação pelo ATP), sendo que pelo RDP foi registrado 74%.

Já no caso de um curto-circuito a 39 km da SE Campo Grande Eletrosul na LT 138 kV Campo Grande Eletrosul – São Gabriel D'Oeste nota-se subtensões de até 73% nas barras de 13,8 kV da SE CG Miguel Couto (simulação pelo ATP), sendo que pelo RDP foi registrado 76% (curto em ponto indefinido da LT).

A fim de determinar o impacto da geração térmica quando de curtos-circuitos em linhas de distribuição realizou-se simulações no ATP.

A tabela 2 mostra a influência, na propagação do AMT, da geração existente e programada localizada nas cidades de Campo Grande e Corumbá quando de ocorrências no sistema.

TABELA 2 – Influência da geração em Campo Grande e Corumbá sobre o AMT.

<b>Curto na LT 69 kV DOURADOS DAS NAÇÕES - SANESUL</b>					
BARRAS	CONDIÇÃO DE GERAÇÃO				
	Sem geração	66 MW UTE W. Arjona	66 MW UTE W. Arjona / 88 MW UTE Corumbá	350 MW CG Imbirussu	350 MW CG Imbirussu / 132 MW UTE Corumbá
CG Miguel Couto 138 kV	34,6 %	19,2 %	-	10,2 %	-
CG Miguel Couto 13,8 kV	25,1 %	18,9 %	-	6,6 %	-
Dourados das Nações 69 kV	64,8 %	63,8 %	-	63,5 %	-

<b>Curto na LT 138 kV Campo Grande Eletrosul – Campo Grande Centro</b>					
BARRAS	CONDIÇÃO DE GERAÇÃO				
	Sem geração	66 MW UTE W. Arjona	66 MW UTE W. Arjona / 88 MW UTE Corumbá	350 MW CG Imbirussu	350 MW CG Imbirussu / 132 MW UTE Corumbá
CG Miguel Couto 138 kV	79 %	70 %	69 %	58 %	58 %
CG Miguel Couto 13,8 kV	71 %	59 %	59 %	54 %	54 %
Miranda 138 kV	92 %	41 %	41 %	25 %	18 %
Corumbá 138 kV	89 %	45 %	38 %	24 %	2 %
Corumbá 13,8 kV	93 %	45 %	38 %	28 %	5 %
Dourados das Nações 138 kV	52 %	45 %	43 %	33 %	28 %
Dourados das Nações 13,8 kV	28 %	18 %	18 %	14 %	14 %

<b>Curto na LT 138 kV Campo Grande Eletrosul – São Gabriel D'Oeste</b>					
BARRAS	CONDIÇÃO DE GERAÇÃO				
	Sem geração	66 MW UTE W. Arjona	66 MW UTE W. Arjona / 88 MW UTE Corumbá	350 MW CG Imbirussu	350 MW CG Imbirussu / 132 MW UTE Corumbá
CG Miguel Couto 138 kV	71 %	57 %	56 %	36 %	35 %
CG Miguel Couto 13,8 kV	73 %	52 %	50 %	36 %	35 %
Miranda 138 kV	70 %	43 %	17 %	15 %	10 %
Corumbá 138 kV	69 %	38 %	18 %	15 %	2 %
Corumbá 13,8 kV	70 %	39 %	19 %	18 %	3 %
Dourados das Nações 138 kV	47 %	29 %	28 %	19 %	18 %
Dourados das Nações 13,8 kV	42 %	30 %	28 %	20 %	20 %

**Curto na barra de 13,8 kV da SE Campo Grande Miguel Couto**

BARRAS	CONDIÇÃO DE GERAÇÃO				
	Sem geração	66 MW UTE W. Arjona	66 MW UTE W. Arjona / 88 MW UTE Corumbá	350 MW CG Imbirussu	350 MW CG Imbirussu / 132 MW UTE Corumbá
CG Miguel Couto 138 kV	17,9 %	11,2 %	10,8 %	5,5 %	5,5 %
CG Miguel Couto 13,8 kV	11,0 %	4,3 %	4,0 %	1,9 %	1,9 %
Miranda 138 kV	17,8 5	9,0 5	8,1 %	2,1 %	1,1 %
Corumbá 138 kV	17,0 %	9,1 %	5,8 %	2,1 %	0,2 %
Corumbá 13,8 kV	10,6 %	8,3 %	2,8 %	2,9 %	0,6 %
Dourados das Nações 138 kV	14,0 %	10,0 %	7,4 %	2,6 %	2,3 %
Dourados das Nações 13,8 kV	11,2 %	8,2 %	3,6 %	1,9 %	0,9 %

Conforme mostrado na tabela 2, observou-se, ser eficaz a presença de geração em Campo Grande para a redução dos Afundamentos Momentâneos de Tensão nas regiões de Campo Grande, Corumbá e Dourados.

*A simulação indica, também, que a radial de Corumbá sem geração não tem os Afundamentos Momentâneos de Tensão atenuados à medida que se distancia do ponto de falta e sim propagando, ao contrário do esperado.*

#### 4 - RECUPERAÇÃO DA TENSÃO

Os efeitos dos Afundamentos Momentâneos de Tensão e da taxa de recuperação de tensão na barra de 138 kV da SE Campo Grande Imbirussu quando da abertura da LT 138 kV Aquidauana - Campo Grande Imbirussu foram analisados através de simulações com o ATP e ANATEM, devido a verificação destas ocorrências no sistema, bem como analisada a influência da geração térmica na minimização dos efeitos citados.

Foram comparados os resultados obtidos com os registros de RDP existentes e os relativos a

eventos com e sem geração térmica inserida no sistema.

Conforme mostrado nas tabelas 3 e 4, o AMT e taxa de recuperação do sistema é consideravelmente inferior quando a UTE Willian Arjona está inserida no sistema.

**TABELA 3 – Comparação das ocorrências com e sem a UTE Willian Arjona, com o RDP.**

Ocorrências	Tensão mínima atingida Fase-neutro (kV)	Afundamento Momentâneo de Tensão		Taxa de Recuperação da Tensão (kV/100)
		(%)	Duração (s)	
Sem UTE	21,15	74,71	25,46	9,05
Com UTE	33,65	51,49	4,35	210,71

**TABELA 4 – Simulações do programa ATP.**

Situações simuladas	Tensão pré curto-circuito fase-neutro (kV)	Tensão mínima durante o curto-circuito fase-neutro (kV)	Afundamento Momentâneo de Tensão (%)
Sem a Térmica	79,67	13,58	82,96
Com uma unidade geradora (33MW)	79,67	32,68	58,90
Com duas unidades geradoras (66MW)	79,67	39,03	51,01

A título de ilustração, as figuras 2, 3 e 4 mostram a tensão instantânea na barra de 138 kV da SE C. G. Imbirussu, simulado no ATP, para o caso do sistema sem unidades geradoras, com uma unidade e duas unidades despachadas da UTE Willian Arjona no sistema, respectivamente.

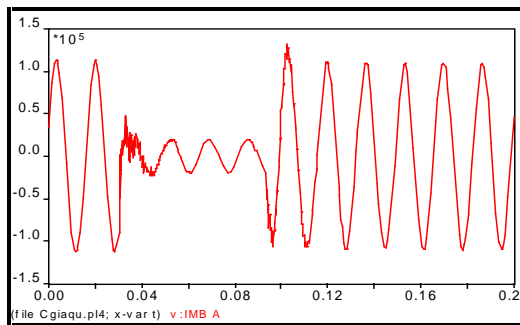


FIGURA 2 - Sem a presença de geração térmica.

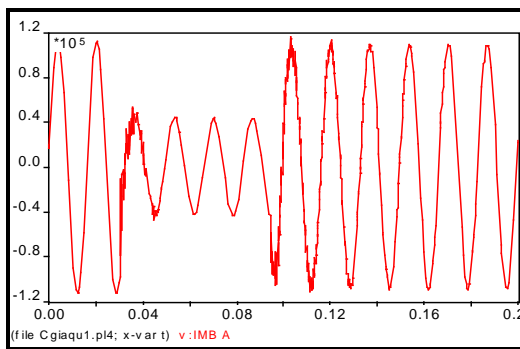


FIGURA 3 – Com 33 MW (um gerador) na UTE Willian Arjona.

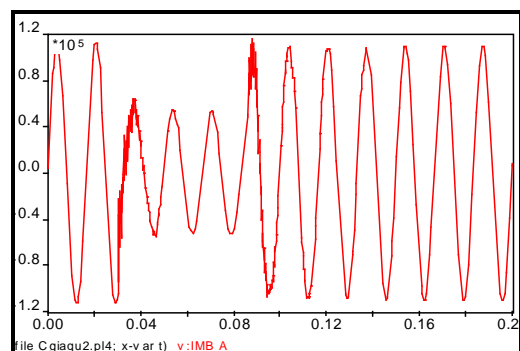


FIGURA 4 – Com 66 MW (dois geradores) na UTE Willian Arjona.

Da mesma forma, através do programa ANATEM pode-se observar o efeito da presença de uma ou duas unidades geradoras da UTE Willian Arjona, conforme mostrado na figura 5.

A curva em azul corresponde ao sistema sem a presença de unidades geradoras na Usina Térmica Willian Arjona, a curva em vermelho mostra como seria o comportamento se no momento desta ocorrência uma unidade geradora estivesse inserida no sistema e a curva em verde mostra o comportamento da tensão quando da inserção de duas unidades geradoras na UTE Willian Arjona.

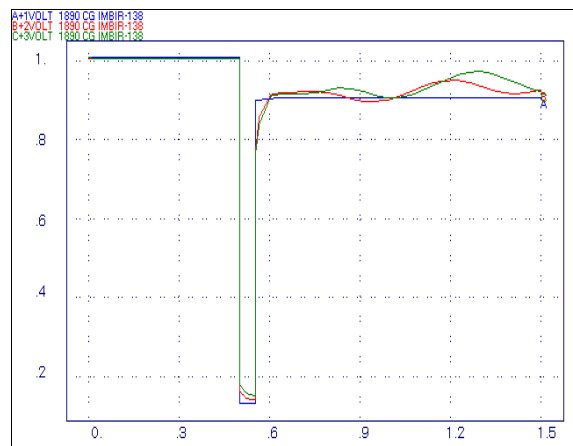


FIGURA 5 - Gráfico de tensão na barra de 138 kV na SE Campo Grande Imbirussu, com e sem a UTE W. Arjona.

Nas duas ferramentas computacionais utilizadas na simulação (ATP e ANATEM) foi possível visualizar o fenômeno do AMT, porém a taxa de recuperação da tensão não pode ser comprovada.

Em vários registros de abertura da LT 138 kV Aquidauana – Campo Grande Imbirussu verifica-se que a tensão leva um tempo relativamente elevado para retornar a patamares aceitáveis de operação. A tabela 7 relaciona as aberturas da referida linha com o afundamento de tensão observado na barra de 138 kV da SE Campo Grande Imbirussu e a taxa de recuperação de tensão.

**TABELA 7 – Relação das aberturas e taxa de recuperação da tensão.**

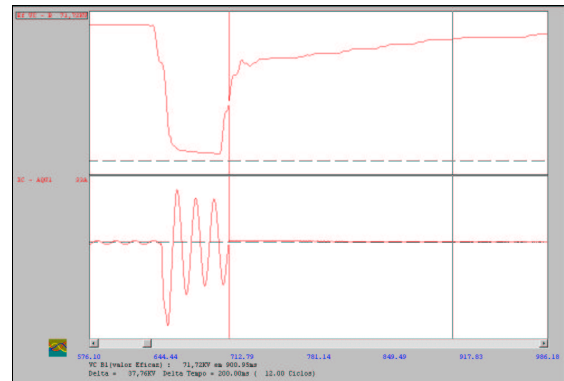
ITEM	DATA	HORA	TAXA DE RECUPERAÇÃO (kV por cada 100ms)	UNIDADE DA UTE NO SISTEMA	REGIME DE CARGA
1	28/11/00	05:44	191,11	00	Leve
2	09/02/01	00:06	18,88	00	Leve
3	19/02/01	02:42	157,45	00	Leve
4	01/03/01	12:57	9,05	00	Média
5	06/03/01	13:57	210,71	01	Média
6	16/03/01	16:50	248,12	01	Média
7	25/03/01	15:43	125,39	00	Leve

Nota-se, pela tabela 7, que a resposta da tensão é relativamente maior quando há uma unidade geradora da UTE W. Arjona no sistema (itens 05 e 06). No caso em que há unidade geradora inserida no sistema, regime de carga média, a taxa de recuperação do sistema é bem inferior (item 04).

Do ponto de vista da recuperação de tensão é relevante conhecer o regime de carga, por consequência, a característica de reativos chaveadas. Uma carga menor significa uma menor quantidade de unidades capacitivas no sistema. Nos itens 01, 03 e 07 a taxa de recuperação foi satisfatória. Contudo no item 02, com o mesmo regime de carga isto não ocorreu. Este fato se deve que neste houve a perda da interligação com o 230 kV em Aquidauana.

Nota-se que para a condição de geração próximo do centro de carga a recuperação de tensão é satisfatoriamente rápida, levando menos de 1 (um) ciclo para atingir níveis aceitáveis.

A título de ilustração, a figura 6 mostra uma abertura no qual a tensão levou 200 ms (12 ciclos) para retornar a 0,90 pu após a eliminação do defeito.


**FIGURA 6 – Recuperação da tensão.**

Dois defeitos com características semelhantes ocorreram na LT 138 kV Aquidauana – Campo Grande Imbirussu. Ambos tiveram a abertura da linha em aproximadamente três ciclos. Estes curtos-circuitos ocorreram quando o sistema se encontrava com configurações semelhantes apenas que em uma das situações, havia uma unidade da UTE Willian Arjona no sistema. A figura 7 mostra a forma de onda da tensão para o sistema sem a térmica (item 4 – tabela 7) enquanto que a figura 8 mostra a tensão para a condição da térmica inserida no sistema (item 5 – tabela 7).

Pode-se verificar que na situação em que no sistema há pelo menos uma unidade geradora despachada a tensão atinge mais rapidamente seu valor aceitável de operação bem como o Afundamento Momentâneo de Tensão é menos severo.

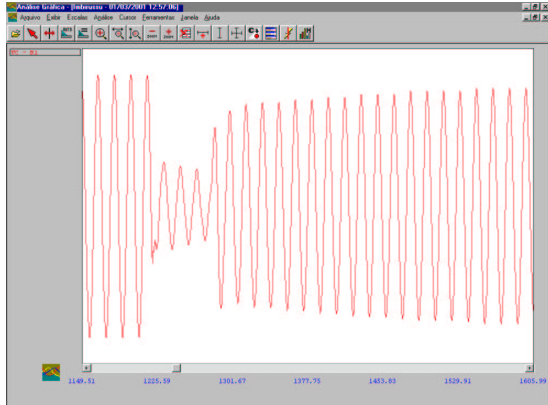


FIGURA 7 – Registro da abertura da LT 138 kV AQU – CGI (sem a térmica no sistema).

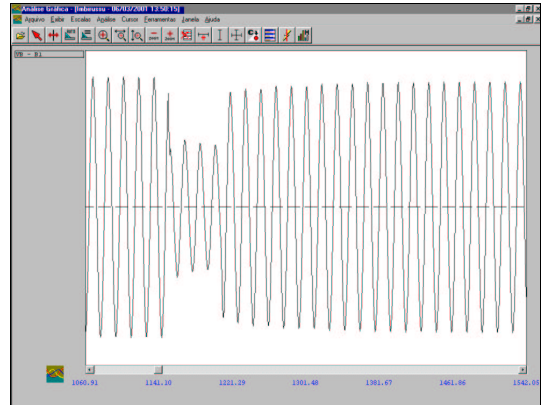


FIGURA 8 - Registro da abertura da LT 138 kV AQU – CGI (com térmica no sistema).

Um parâmetro que pode indicar a resposta do sistema quando de um transitório é a relação  $R/X$  do sistema. A tabela 8 mostra essa relação para o sistema ENERSUL para as condições de carga leve, média e pesada, respectivamente.

TABELA 9 – Relação  $X/R$  para diferentes condições de carga.

Carga	Relação $X/R$ ( $\times 10^{-6}$ )
Leve	51,26
Média	42,03
Pesada	35,11

Quanto menor a relação  $X/R$  maior deverá ser o reatância capacitiva do sistema o que poderia prejudicar a resposta da tensão do sistema quando de AMT's.

## 5 - CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo de um sistema real com vistas aos AMT e a taxa de recuperação da tensão quando da abertura de linhas de transmissão causadas por curtos-circuitos.

Constatou-se a eficácia dos modelos utilizados nas simulações para os valores dos Afundamentos Momentâneos de Tensão tanto para as simulações do ATP como para o ANATEM. Contudo estas ferramentas não se mostram eficazes para a visualização da recuperação da tensão após eliminado o curto-circuito devido ao seu modelo matemático e/ou ao sistema não ter a representação adequada. Constatou-se que o efeito no afundamento da tensão, quando de curto circuito, é tanto menor quando está presente geração térmica no sistema, sendo este afundamento tão menor a medida que se insere um montante maior de geração térmica e que a taxa de recuperação da tensão é melhor a medida que se insere um montante cada vez maior de geração térmica no sistema.

Observa-se que a região de Corumbá é afetada mesmo para defeitos em pontos distantes do sistema. A rede desta radial propaga o AMT. Fato este que provoca saídas de clientes. Ressalta-se que nesta região está localizada a maioria destes clientes.



Verifica-se que quando da eliminação do curto-circuito, nas ocorrências em que a UTE Willian Arjona não está inserida no sistema, uma lenta taxa de recuperação da tensão na barra de 138 kV da SE Campo Grande Imbirussu, sendo que em alguns casos, a tensão leva em torno de 360 ms para retornar a valores aceitáveis de operação. Provocando, neste caso, uma maior rejeição de carga.

Isto leva a concluir que para melhorar a resposta da tensão para o sistema do Mato Grosso do Sul é necessário aumentar o nível de curto-circuito do sistema, ou seja, ter pelo menos uma unidade geradora da UTE Willian Arjona despachada.

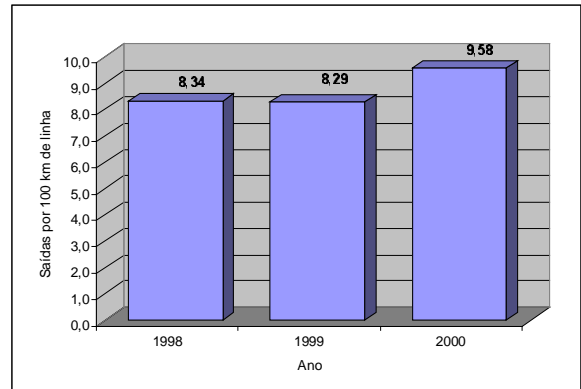
Conclui-se, também, que a taxa de recuperação da tensão independe do nível do AMT, sendo relacionado diretamente com a capacidade do sistema frente a carga.

Uma consideração relevante pode ser a relação  $X/R$  do sistema, no qual apresenta valores relativamente altos quando de condição de carga pesada. Sendo esta condição de carga apresenta uma taxa de recuperação da tensão do sistema lenta. Recomenda-se que sejam realizados estudos a fim de determinar que valores de  $X/R$  seriam melhores do ponto de vista da taxa de recuperação da tensão do sistema.

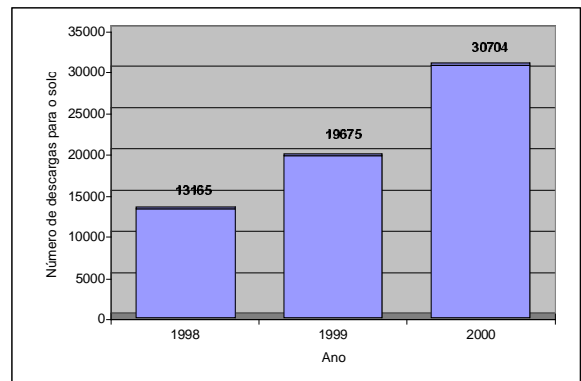
Verifica-se a necessidade da realização de investigações a respeito da resposta da carga (incluindo-se banco de capacitores) quando da análise da recuperação da tensão do sistema.

Em relação à frequência dos eventos de AMT, tem sido executado programas de manutenção preventiva, nas linhas e equipamentos do sistema, no sentido de reduzir e minimizar as

ocorrências cuja demonstração é mostrada pelas figuras 9 e 10 a seguir que indicam o número de saídas das linhas por cada 100 km e o número de descargas atmosféricas ao solo na região de Campo Grande, respectivamente.



**FIGURA 9 – Saídas de linhas por cada 100 km.**



**FIGURA 10 – descargas atmosféricas ao solo na região de Campo Grande.**

Como pode ser facilmente notado pelos gráficos das figuras 9 e 10 houve um aumento considerável no número de descargas atmosféricas ao solo, maior causador de saídas de linhas de distribuição de 138 kV. Contudo o número de saídas de linhas de 138 kV por cada 100 km permaneceu relativamente constante. Isto significa o empenho da ENERSUL em melhorar o desempenho de suas linhas de distribuição.

A ENERSUL vem constantemente realizando estudos objetivando a tomada de ações para a melhoria do atendimento a seus clientes, por exemplo abrindo a interligação de algumas barras de 13,8 kV para que a impedância de falta até os consumidores seja maior, reduzindo os efeitos dos Afundamentos Momentâneos de Tensão. E realizando estudos de consultoria junto a seus clientes com o objetivo de redefinir ajustes internos, sempre que possível sob o aspecto de suportabilidade de equipamentos e comprometimento do processo de produção, com vistas a reduzir as interrupções do fornecimento de energia durante os eventos transitórios dos AMT's [5, 6 e 7].

do Consumidor Cimento Eldorado, Bodoquena/MS – Dezembro de 1999.

[6] – ENERSUL / RT ECOPOWER – Análise dos Distúrbios Monitorados no Sistema elétrico do Consumidor Cimento Itaú, Corumbá/MS – Dezembro de 1999.

[7] – ENERSUL – Análise dos Distúrbios Monitorados no Sistema elétrico do Consumidor Shopping Campo Grande, julho de 2000.

[8] – ONS - Procedimento de rede – Módulo 2, Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica, outubro de 2000.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] – Suprimento ao Estado do Mato Grosso do Sul no ano de 1998, sem a geração térmica de Corumbá (SCEL/CASM-001/97)

[2] – Estudo de atualização de Esquemas de Corte de carga por Risco de Colapso de Tensão no Sistema Sul (ELETROSUL/DOS)

[3] - SCEL/CTST/ELETROSUL/GERASUL e ENERSUL (28/07/98)

[4] – Análise do Comportamento da tensão quando de defeito em Linhas de Transmissão no Sistema Enersul (Enersul/Março 2001)

[5] – ENERSUL / RT ECOPOWER – Análise dos Distúrbios Monitorados no Sistema elétrico