



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco – Brasil

### Geração Distribuída no Atendimento a Cargas Conectadas em um Sistema Ilhado

<b>Marcel Rocha</b>	<b>Dalton Pereira Dias</b>	
<b>CPFL Energia</b>	<b>CPFL Energia</b>	
marcelrocha@cpfl.com.br	dpdias@cpfl.com.br	

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Atendimento  
Estabilidade  
Indicadores  
Sistema Ilhado  
Tensão

#### **RESUMO**

O fornecimento de energia elétrica com alto padrão de qualidade e com menores índices de desligamentos/interrupções tem sido objeto de dedicação das diversas concessionárias de distribuição de energia do Brasil.

Em situações de manutenções programadas ou de emergência pode ser necessária a interrupção no fornecimento de energia para diversos clientes, podendo atingir períodos extensos, afetando diretamente a satisfação dos consumidores e também os indicadores de qualidade FEC (Frequência Equivalente de Interrupção), DEC (Duração Equivalente de Interrupção), FIC (Frequência de Interrupção Individual), DIC (Duração de Interrupção Individual) e DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua).

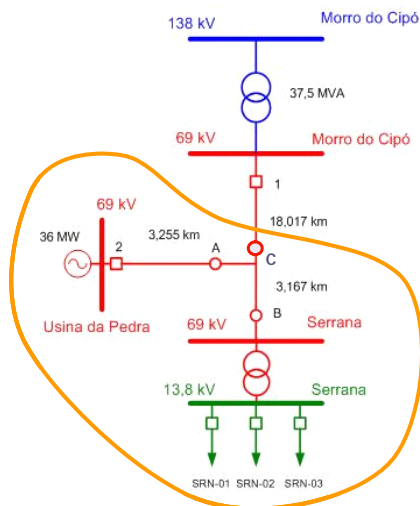
A utilização da Geração Distribuída como um Sistema Ilhado, ou seja, sem conexão com o SIN (Sistema Interligado Nacional) pode ser uma maneira de se evitar alguns desligamentos indesejáveis.

Este trabalho mostra os procedimentos e resultados obtidos pela CPFL no atendimento à carga de um sistema de 69 kV por um Cogrador de Biomassa (cana de açúcar) sem conexão com o Sistema Interligado.

A princípio foram realizadas simulações dinâmicas com modelos implementados pela CPFL (regulador de tensão, regulador de velocidade e modelos de turbinas) e depois realizados testes reais para eliminação de problemas e validação destes estudos, com instalação de equipamentos de medição.

## 1. INTRODUÇÃO

O trabalho surgiu a partir da necessidade de obras no trecho de aproximadamente 18 km, entre a subestação de 69 kV de Morro do Cipó e o tap que interliga as subestações de 69 kV Serrana e Usina da Pedra, conforme figura 1. A obra correspondia ao alteamento de alguns trechos de linha em função da duplicação da rodovia Abrão Assed, que interliga os municípios de Ribeirão Preto e Serrana. Desta forma não houve a possibilidade de execução da obra em regime de “linha viva”, gerando a necessidade de interrupção de 9,0 MW de carga, a 15.441 unidades consumidoras por um período de 10 horas, que por sua vez ocasionaria um CHI (Consumidor-Hora Interrompido) igual a 154.441.



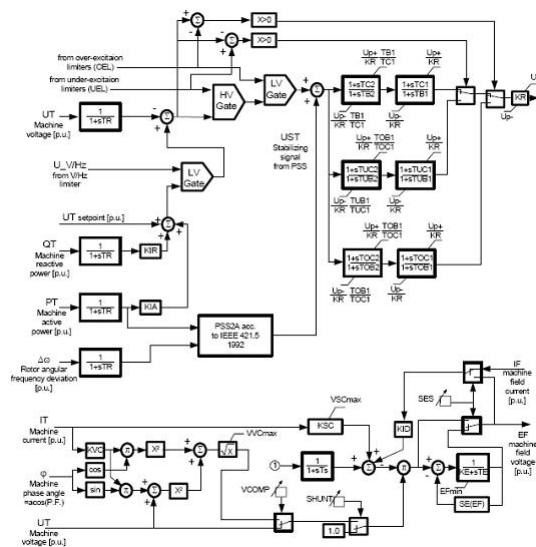
**Figura 1** – Diagrama Unifilar do Sistema Ilhado

Como o trecho a ser desligado foi entre o disjuntor 1 e a seccionadora C, foram realizados estudos de Estabilidade Eletromecânica buscando analisar o comportamento da Usina da Pedra alimentando radialmente a SE 69 kV Serrana, sem conexão com o Sistema Interligado, para que o sistema ilhado operasse obedecendo-se os limites de frequência e tensão estabelecidos pela legislação

Como o sistema mudaria sua configuração, foi tomado o cuidado de rever as proteções dos equipamentos. A proteção da SE Serrana foi reajustada pela equipe da CPFL e a proteção da Usina foi reajustada por uma consultoria externa contratada, que já prestava serviços técnicos à própria Usina. De forma preventiva foi desabilitado o religamento automático dos alimentadores da SE Serrana.

Após a validação dos estudos de estabilidade foram realizados testes em campo, simulando o caso real com o objetivo de antecipar os possíveis problemas, ajustar os detalhes de comunicação entre os diversos agentes envolvidos na operação, verificar o comportamento dos geradores nas tomadas e rejeição de carga, fornecer subsídios para o dia da realização da obra na LT, proporcionando maior segurança nas manobras e confiança aos profissionais envolvidos. Caso algo viesse a falhar o sistema poderia restabelecer imediatamente a sua configuração interligada ao SIN, condição esta que não seria possível no dia da obra. Com os testes aprovados o serviço foi liberado para execução.

O objetivo era ilhar o sistema conforme destacado na figura 1, liberando sem tensão o trecho de 18 km entre a seccionadora C e o disjuntor 1. A estratégia da equipe era que a SE Serrana não sofresse nenhum pisca ou qualquer variação mais grave que afetasse a qualidade da energia entregue. Assim, com o sistema operando em condições normais e com a Usina exportando energia para o SIN através de Morro do Cipó, foram iniciadas as manobras. Primeiramente reduziu-se a geração da Usina da Pedra de modo a igualar com a carga da SE Serrana, zerando o fluxo de potência ativa para Morro do Cipó. Após, o disjuntor 1 foi aberto e o sistema passou a ficar ilhado. O sistema se comportou normalmente. Logo em seguida foi aberta, sem carga a seccionadora C, liberando efetivamente o trecho para as obras.



**Figura 2 - Regulador de Tensão UNITROL F**

**Tabela 1 - Dados da Turbina e Gerador**

VAR	Descrição	Dados
Vn	Tensão terminal nominal	13,8 kV
Pmax	Potência ativa máxima	35,0 MW
Qmax	Potência reativa máxima	18,8 Mvar
n	Rotação da máquina	1800 rpm
f	Frequência nominal	60 Hz
xd	Reatância síncrona de eixo direto	153 %
xq	Reatância síncrona de eixo em quadratura	149 %
x'd	Reatância transitória de eixo direto	22,3 %
x''d	Reatância subtransitória de eixo direto	19,7 %
xt	Reatância de dispersão da armadura	12,4 %
T'd0	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto	3,3 s
T''d0	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto	0,042 s
T''q0	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto	0,23 s
Ra	Resistência do enrolamento de armadura	0,0016 %
Hg	Constante de tempo de inércia	1,02 s
D	Constante de amortecimento	2,95 N.m.s/rad

Durante as 10 horas em que o sistema operou ilhado foi registrada apenas uma ocorrência que ocasionou interrupção da carga da SE Serrana por 1 hora e 45 minutos. Houve o desligamento do disjuntor 2 por meio da atuação do relé 50 Vab da Usina. Após inspeção na rede foi constatado que houve uma falta no alimentador SRN-03. O relé da SE Serrana partiu, porém não atuou. Desta forma as proteções atuaram coordenadamente de forma correta, pois a proteção da Usina deveria atuar antes da proteção da SE Serrana, o que efetivamente aconteceu. Às 11:45 h o sistema ilhado foi restabelecido e manteve a normalidade até às 16:45 h quando houve manobras para retornar à configuração interligada ao SIN. A manobra de retorno foi realizada com pisca.

Apesar da interrupção ocasionada pela falta no alimentador SRN-03 o saldo apresentou-se positivo já que foi evitada uma interrupção de aproximadamente oito horas e verificou-se que as proteções atuaram.

## 2. DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de se viabilizar o ilhamento da Usina da Pedra com a SE Serrana, diversas etapas tiveram que ser executadas.

### 2.1 Simulações de Transitórios Eletromecânicos

Para verificar se a Usina da Pedra poderia suprir a carga da SE Serrana de forma ilhada, ou seja, isolado do SIN (Sistema Interligado Nacional), com limites de frequência e tensão estabelecidos pela legislação foram feitas simulações de estabilidade eletromecânica por meio do programa computacional ANATEM (V10-11/06), do Cepel. Para tal foi necessário implementar os modelos de turbina, do regulador de tensão e do regulador de velocidade, com base em dados cedidos pela Usina da Pedra (Figura 2 e Tabela 3).

#### 2.1.1 Desligamento do disjuntor 1, com a usina exportando 18 MW

O gerador Usina da Pedra exporta normalmente 18 MW para o sistema. A primeira simulação foi o teste de rejeição de carga com o desligamento do disjuntor 1. Considerando que a SE Serrana consome 9 MW e o restante é exportado para Morro do Cipó, haverá uma rejeição de carga de 9 MW no momento do início do ilhamento.

Por meio das figuras 3 e 4, obtidas das simulações, pode-se notar uma variação de aproximadamente 9 MW e 7 Mvar durante o transitório da manobra de ilhamento. Nota-se, também, observando as figuras 5 e 6, que a frequência da Usina atingiu um máximo de 61,7 Hz e uma variação de tensão na subestação Serrana de aproximadamente 8,9 kV.

#### 2.1.2 Desligamento do disjuntor 1, com a usina exportando 8 MW

De forma análoga foi realizada uma segunda simulação. No entanto foi considerada a geração da Usina igual à carga da SE Serrana. Assim o fluxo no disjuntor 1 ficaria próximo a zero, com rejeição muito pequena de carga.

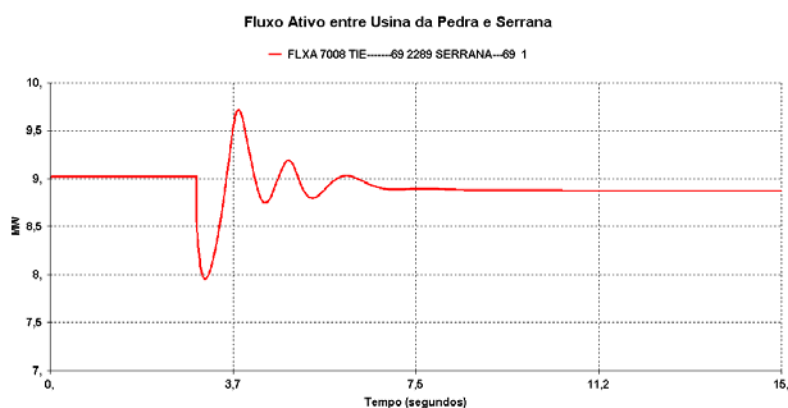
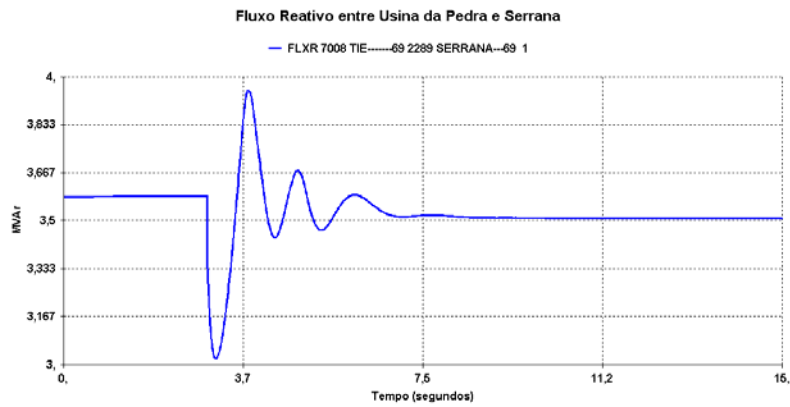


Figura 3 - Variação de potência ativa



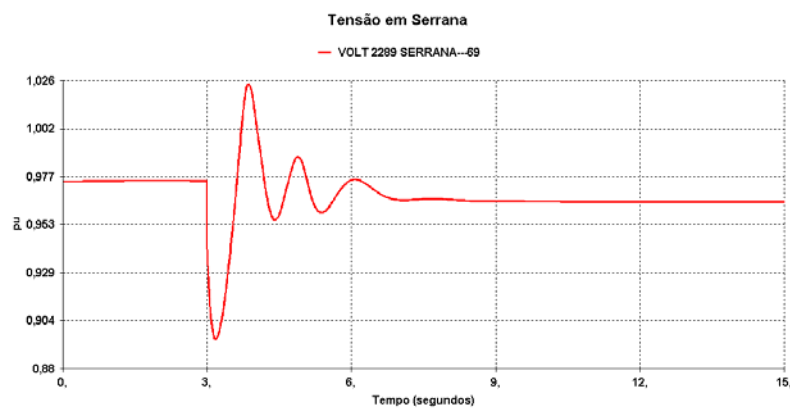
**Figura 4** - Variação de potência reativa



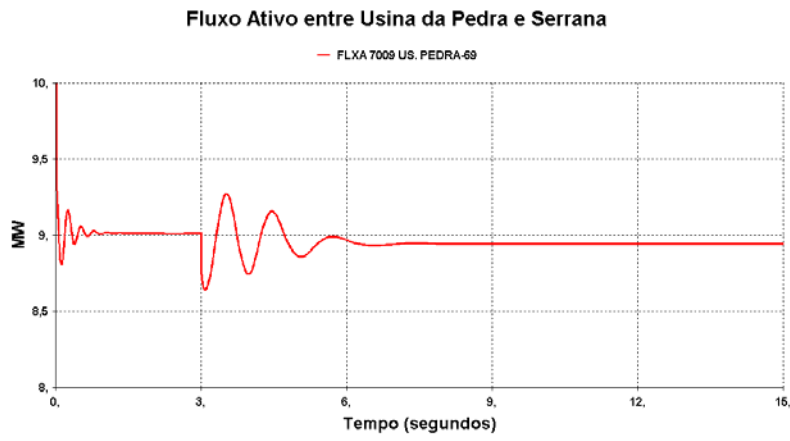
**Figura 5** - Variação de frequência da Usina

Nota-se nas figuras 7 e 8 uma variação de 0,6 MW e 0,3 Mvar durante o transiente, valores bem inferiores ao item anterior. A frequência e a tensão também apresentam valores transitórios de menor amplitude, ou seja, 60,1 Hz e 3,2 kV respectivamente (observando as Figuras 9 e 10).

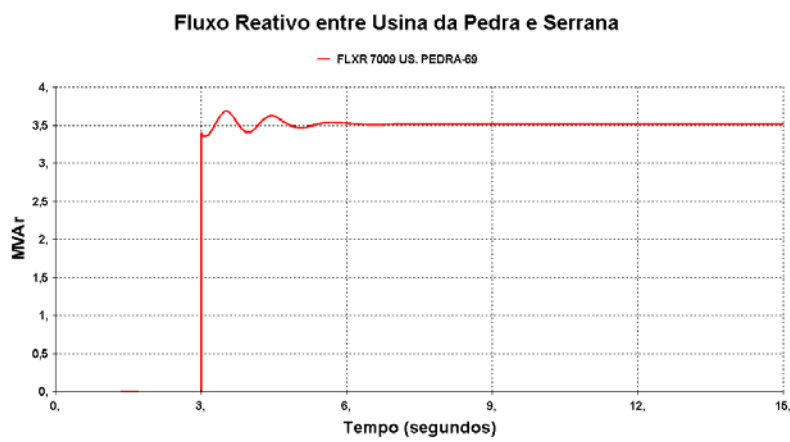
A segunda alternativa se mostrou mais atraente por apresentar transientes de menor amplitude.



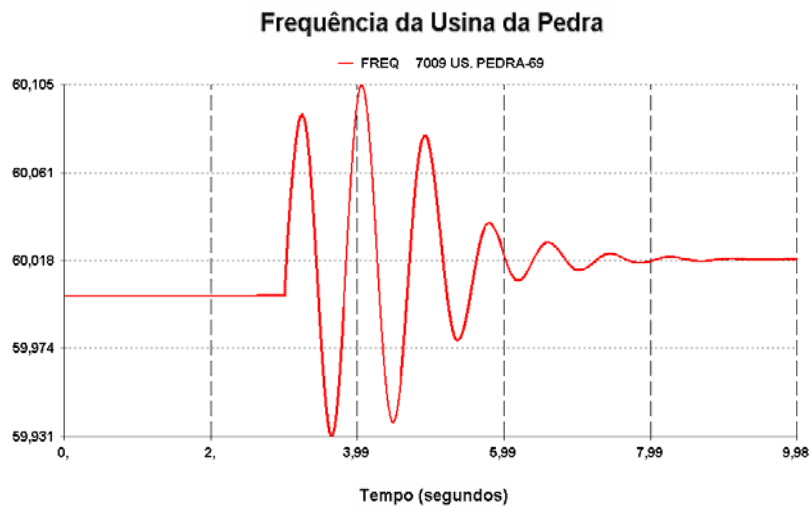
**Figura 6** - Variação de tensão em Serrana



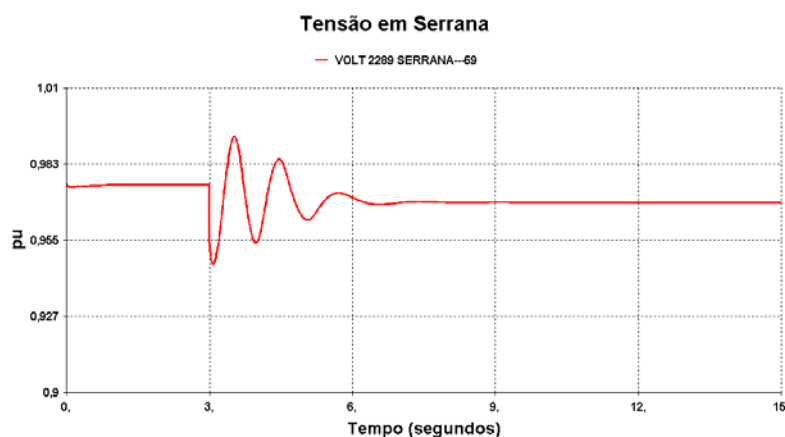
**Figura 7** - Variação de potência ativa



**Figura 8** - Variação de potência reativa



**Figura 9** - Variação de frequência da Usina



**Figura 10** - Variação de tensão em Serrana

## ***2.2 Ajustes de Proteção***

Confirmada a estabilidade eletromecânica por meio das simulações, uma segunda etapa suscitou preocupação. Como o sistema mudaria sua configuração, tomou-se o cuidado de rever as proteções dos equipamentos, sendo a proteção da SE Serrana reajustada pela própria equipe da CPFL. Decidiu-se que a melhor alternativa para reajustar a proteção da Usina seria a contratação de uma consultoria externa, que já prestava serviços técnicos à própria Usina. A decisão foi motivada pelo fato da consultoria já ter conhecimentos prévios do equipamento. Foi solicitado, então, pela consultoria que, preventivamente, fosse desabilitado o religamento automático dos alimentadores da SE Serrana.

## ***2.3 Operação Ilhada***

### ***2.3.1 Simulação Real em Campo***

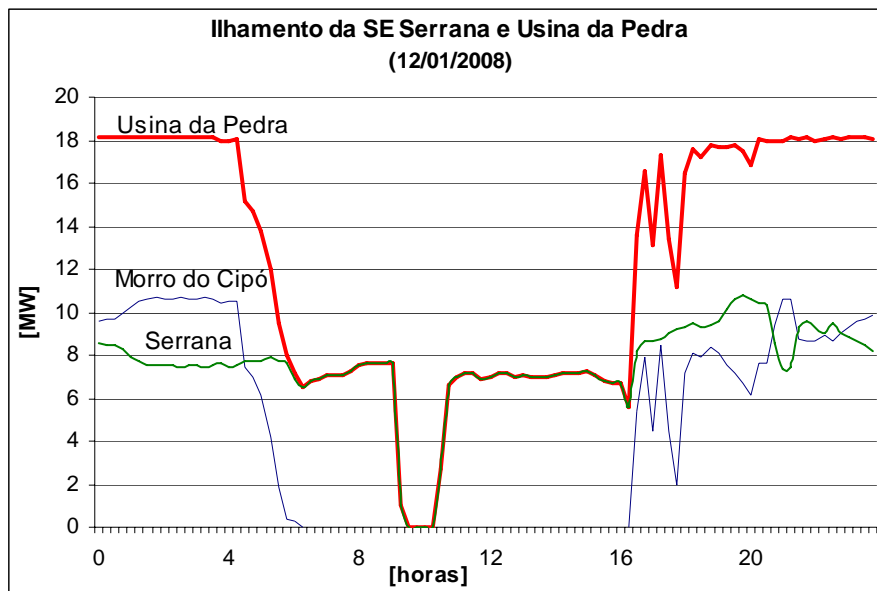
A etapa seguinte seria acertar os detalhes da manobra e para isso foi realizado um teste em campo para simular o caso real com o objetivo de antecipar os possíveis problemas, ajustar os detalhes de comunicação entre os diversos agentes envolvidos na operação, verificar o comportamento dos geradores nas tomadas e rejeição de carga, fornecer subsídios para o dia da realização da obra na LT, proporcionando maior segurança nas manobras e confiança aos profissionais envolvidos. No caso de algo viesse a falhar, o sistema poderia ser imediatamente restabelecido à sua configuração interligada ao SIN.

Os testes ocorreram sem contratempos e, desta forma, o serviço pode ser aprovados para execução.

### ***2.3.2 Ilhamento de 10 horas***

Atendidas e aprovadas todas as etapas relevantes do processo, foi realizada a manobra de ilhamento da Usina da Pedra com a SE Serrana por 10 horas no dia 12 de janeiro de 2008.

A Figura 11 representa a medição real dos fluxos de potência ativa no dia do ilhamento. Inicialmente a Usina da Pedra fornecia energia para suprir toda a carga da SE Serrana e havia exportação para Morro do Cipó. Às 05:15 h a geração da Usina começou a ser reduzida gradualmente até que a exportação para SE Morro do Cipó passasse a zero. Próximo às 7:00 h foi aberto o disjuntor 1 (Figura 1) de Morro do Cipó. A partir deste momento a Usina passou a alimentar a SE Serrana de forma ilhada. Em seguida foi aberta a seccionadora C, retirando tensão e liberando o trecho de linha de 18 km, entre Morro do Cipó e o tap da Usina da Pedra, para as obras programadas. Tal procedimento foi realizado sem necessidade de pisca para os consumidores da SE Serrana.

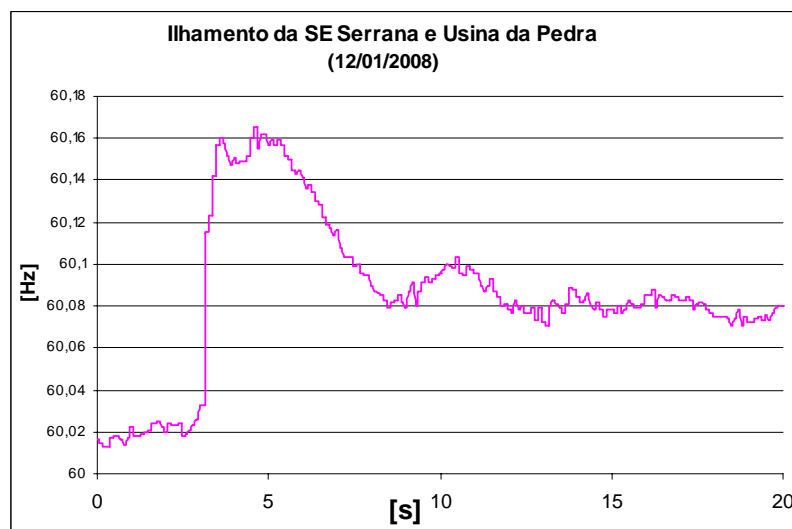


**Figura 11** – Fluxo de potência ativa

Às 9:45 h atuou o relé 50 Vab na Usina devido a uma falta ocorrida no alimentador SRN-03 da SE Serrana. O fornecimento de energia foi normalizado às 11:30 h.

Às 16:45 h realizaram-se as manobras de normalização. Primeiramente foi aberto o disjuntor 2 da Usina da Pedra retirando tensão do trecho. A seccionadora C foi fechada e logo em seguida o disjuntor 1 de Morro do Cipó foi fechado, normalizando o fornecimento de energia para a SE Serrana. Em seguida a Usina da Pedra entrou em paralelo com o Sistema Interligado Nacional, voltando à condição inicial de operação.

Com o intuito de se comparar as simulações com o caso real foi instalado um equipamento na Usina da Pedra para realizar medições, conforme pode ser observado na Figura 12. Comparando-se com a Figura 9, observa-se que no caso real o sistema apresenta um valor de pico levemente maior que no simulado e o tempo de acomodação também é ligeiramente maior. Em ambos os casos a frequência se acomoda em um valor superior ao inicial.



**Figura 12** – Frequência medida em campo (Usina da Pedra)



### **3. CONCLUSÕES**

A operação pode ser considerada como de sucesso. Houve ganhos expressivos para a CPFL, preservando-se os indicadores de continuidade do conjunto Serrana, além de preservar a figura da Empresa. Somado a isto está o ganho de receita da Usina da Pedra, que não poderia exportar sua energia excedente e o ganho de receita da CPFL, que deixaria de atender os clientes durante todo o período da manutenção.

As análises transitórias mostraram-se satisfatórias e importantes nas decisões tanto do patamar de carga a ser utilizado, quando na forma de tomada desta carga.

Uma das etapas importantes foi a de reajuste de proteção, considerando que o sistema ilhado apresenta características distintas do sistema interligado.

Ressalta-se que os ensaios realizados em campo foram de grande importância na eliminação de problemas, trazendo mais segurança e confiança aos Operadores da CPFL na realização deste tipo de manobra.

Operações deste tipo, com avaliação prévia dos riscos mostraram-se viáveis para ocasiões que envolvem obras ou manutenção no sistema elétrico.

A obtenção dos resultados positivos nas simulações e testes deram início a outras análises no sistema da CPFL, levando em consideração montantes maiores de carga atendida de forma ilhada e também com mais de uma usina conectada nesta ilha.

### **4. BIBLIOGRAFIA**

[1] Kundur, P., 1994. Power System Stability and Control EPRI, Mc Graw-Hill;

[2] Ogata, K., 2000. Engenharia de Controle Moderno, 3º Edição. Universidade de Minnesota, LTC Editora;

[3] P&D CPFL/FUPAI – Modelagem Dinâmica para Cogeração, 2003.