



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

GAT-27  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO IV  
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA CONECTA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Erico Bruchmann Spier\*  
Flávio A. B. Lemos  
PUCRS**

**Alexandre Sanfelice Bazanella  
UFRGS**

**Eduardo Knorr  
Hidroelétrica Panambi S.A.**

**RESUMO**

Este artigo apresenta um estudo sobre o comportamento dinâmico de geração distribuída, representada por 3 geradores de 950 kVA, conectada a um sistema de distribuição real. Foram avaliados duas condições de operação: no primeiro caso a geração distribuída está sincronizada e o sistema de distribuição está conectado a rede básica; no segundo caso a geração distribuída está sincronizada porém alimentando dois circuitos independentes do sistema de distribuição em situação de ilhamento. Foram simulados vários eventos para ambas as condições e apresentadas análises para cada condição.

**PALAVRAS-CHAVE**

Geração Distribuída, Produtores Independentes, Estabilidade Transitória, Análise Dinâmica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As mudanças acontecidas nas últimas décadas trouxeram novos desafios ao setor elétrico mundial. Palavras como desregulamentação, privatização, desvericalização, produtores independentes e mercado competitivo passaram a fazer parte do dia a dia do setor elétrico. A este conjunto de definições somou-se o termo *Geração Distribuída (GD)*. A GD dentro de um ambiente desregulamentado e competitivo passou a apresentar-se com uma solução técnica e economicamente viável, despertando interesse de produtores independentes e renovou o interesse em operar geradores em paralelo nos sistemas de distribuição, uma vez que várias indústrias são auto-suficientes em energia e dispõe de sobras que podem ser comercializadas. Além disso, a

possibilidade da utilização de recursos naturais renováveis para gerar energia (ventos, sol, biomassa, células combustíveis) vem contribuindo para o aumento do interesse no estudo de GD. Esta tendência tem levado as distribuidoras a investir em estudos sobre a operação em paralelo destas fontes de energia com seus sistemas em nível de subtransmissão e distribuição, uma vez que não era uma prática comum, para estes segmentos de redes a conexão de geração, sendo que tradicionalmente essas redes operam de forma radial.

Embora o incremento da GD ainda dependa de fatores econômicos (subsídios) para alguns tipos de fonte (eólica, solar, etc) e de uma maior clareza em relação a regulamentação por parte da ANEEL, a geração a partir de pequenas centrais hidrelétricas e pequenas centrais térmicas já é uma realidade. No Brasil o passo inicial foi a publicação da Lei 9074/95, a qual possibilitou o surgimento de um novo agente chamado de *Produtor Independente de Energia (PIE)*. O Decreto nº2003, de 10/09/1996, regulamentou a atividade desse novo agente, juntamente com o *Autoprodutor de Energia Elétrica (APE)*, sendo que a Resolução ANEEL nº281/99 regulamentou a contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão, aos sistemas de transmissão e de distribuição por esses agentes.

Geração Distribuída (GD) é uma nova abordagem em sistemas de energia, e como tal, ainda não apresenta consenso em alguns termos e definições. Mesmo em relação ao termo usado para designar este tipo de geração ainda não existe uma concordância, uma vez que Geração Embutida e Geração Dispersa [1 e 2] são seguidamente utilizadas com o mesmo significado. Outra definição crítica é em relação a potência nominal, a qual varia entre os países [1], sendo geralmente composta de pequenas unidades com potência de até 10 MW e com despacho não centralizado [2].

\* Avenida Ipiranga, 6681 – Bloco 30 - Sala 222 – CEP 90619-900 – Porto Alegre - RS - BRASIL  
Tel.: (051)33203594 - Fax: (051)33203540 - E-MAIL: gsee@ee.pucrs.br

Os autores desse artigo definem a Geração Distribuída como geradores que possuem os seguintes atributos: planejamento e despacho não centralizados, normalmente com potência inferior a 10 MW e usualmente conectados nos sistemas de distribuição.

A introdução dessas fontes de geração de energia elétrica causam um impacto significativo sobre o sistema, representado pela influência na qualidade do suprimento e em itens como fluxo de potência, níveis de curto-circuito e aspectos de controle e proteção. Na maioria das vezes a influência da GD, devido ao seu pequeno porte, é local ou regional. A presença de GD nos sistemas de distribuição causa impactos positivos, tais como [3, 4]: suporte de tensão, melhoria na qualidade do suprimento, redução das perdas, melhoria do fator de potência e possibilidade de ilhamento para atendimento de carga local.

Entretanto, algumas questões críticas também surgem com a conexão de GD em sistemas de distribuição, tais como [3, 4]: aumento nos níveis de curto-circuito, coordenação da proteção, harmônicos, flicker e competição por regulação de tensão. Em [4] são também apresentadas algumas preocupações sobre a aplicação de GD e metodologias para avaliar o impacto do acesso à sistemas radiais de distribuição.

Em recentes trabalhos desenvolvidos pelas forças tarefas do CIGRE [5] e CIGRE [6] pode ser encontrado um extensivo estudo sobre experiências com geração distribuída em vários países, bem como vantagens e desvantagens comentados em relação a este tipo de geração. A literatura sobre GD é restrita quando comparada com a abordagem de geração tradicional. Recentes abordagens sobre o tema podem ser encontradas sintetizadas em [2, 7]. Alguns comentários e análises do potencial de GD nas práticas regulatórias e resultados econômicos são apresentados em [8]. A referência [9] apresenta os requisitos técnicos para a conexão de GD na rede e comentários sobre o sistema de regulação adotado na Grécia. Em [10] é analisada uma nova metodologia para a coordenação da regulação de tensão com a GD para ser usada em sistema de distribuição que apresentam transformadores com mudança de tap sob carga (ULTC) e reguladores de tensão. Os efeitos das fontes de energia em sistema de distribuição e a avaliação do desempenho destas redes são investigadas em [11]. Em [12 e 13] são descritas investigações e aspectos técnicos para a determinação do impacto da integração da GD na proteção de sistemas de distribuição. Apresenta-se a seguir a descrição do sistema estudado, as simulações realizadas, os resultados obtidos e as principais conclusões do trabalho.

## 2.0 - SISTEMA HIDROPAN

A Hidroelétrica Panambi S.A. – HIDROPAN, localizada na Região do Planalto do Rio Grande do Sul, é uma concessionária que atende a 2 municípios, com aproximadamente 11.000 clientes. O mercado está dividido em: 33% residencial, 30% industrial, 19% comercial e 5% rural. O sistema de distribuição opera com dois alimentadores em 13,8 kV sendo atendidos por 1 subestação (SE) com dois transformadores de 6,25 MVA em paralelo, conectados a rede básica através de uma linha de transmissão em 69kV.

Atualmente existem duas usinas de 950 kVA, Rio Alegre e Rio Palmeira, localizadas nos extremos leste e oeste do alimentador nº1 (20 e 12 km da SE, respectivamente) que pertencem a própria HIDROPAN e a usina do Rio Caxambu, de 780 kVA, localizada na extremidade sul do alimentador nº2 (a 25 km da SE), a qual pertence a um autoprodutor. Todas estas usinas atendem o sistema de distribuição da Hidropan.

Devido a dificuldade em obter os dados reais dessas usinas, os autores optaram em utilizar dados típicos de uma usina de 950 kVA para as três PCH's, os quais são apresentados nas Tabelas 1 e 2 no Apêndice A.

## 3.0 ANÁLISE DINÂMICA DAS GD'S NO SISTEMA HIDROPAN

Até recentemente a realização de estudos dinâmicos não era uma tarefa comum em sistemas de distribuição, pois os sistemas eram tipicamente radiais com uma única fonte representada pela SE. A presença de GD em sistemas de distribuição está mudando esta realidade. As tarefas de sincronização e operação de GD na rede de distribuição exige que as empresas avaliem o comportamento dinâmico das usinas conectadas e de seu sistema, estudando eventos que possam influenciar este comportamento e analisando as margens de segurança. Neste artigo são estudadas duas condições de operação: a chamada operação normal, onde os GD estão sincronizados e o sistema de distribuição está conectado a rede básica através da SE Panambi, e a condição de operação ilhada, onde os GDs operam alimentando dois circuitos com carga reduzida: 1 circuito com 2 GDs em paralelo (Usina Rio Alegre e Rio Palmeira) e 1 circuito com 1 GD (Usina Rio Caxambu).

### 3.1 Operação Normal

Os GDs conectados ao sistema de distribuição não cumprem a função de regulação de frequência na condição normal de operação (sistema conectado a rede básica através da SE de Panambi). A decisão da sincronização destes geradores está baseada na disponibilidade de água nos reservatórios, de condições operativas e da relação econômica dos seus custos de produção vs. os custos de compra de energia. Estes geradores também cumprem a função de auxiliar no controle de tensão do sistema de distribuição para casos críticos de operação.

Dessa forma, supondo a operação normal foram efetuadas as seguintes análises:

#### 3.1.1 Curto-Circuito

Os estudos de estabilidade relativo ao evento de curto-circuito tiveram por objetivo verificar se as máquinas eram capazes de manter o sincronismo para a ocorrência de um curto-circuito rápido sem abertura da linha de interligação, sendo que o tempo crítico de eliminação do curto-circuito deve ser inferior a 7 ciclos ( $\pm 0,12$  s.). Foram também aplicados curtos-circuitos nas barras de conexão das usinas com o sistema de distribuição a fim de avaliar a resposta dinâmica das máquinas e determinar o tempo crítico dos disjuntores.

- Barra de alta da subestação de Panambi: Nessa seção será avaliado o comportamento dos GDs para um curto-circuito trifásico de 7 ciclos de duração aplicado na barra de alta tensão da SE de Panambi sem a abertura da linha. A Figura 1 apresenta o perfil do ângulos dos geradores das Usinas Rio Alegre, Rio Palmeira e Rio Caxambu, respectivamente.

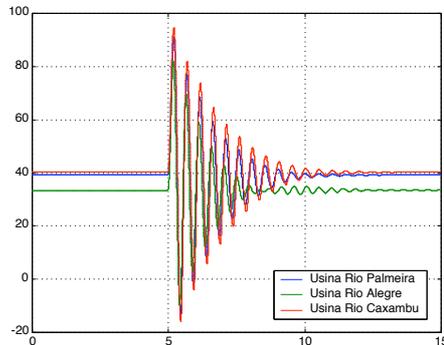


FIGURA 1 – Ângulo dos geradores para um curto-circuito trifásico no lado de AT da SE Panambi.

- Curto-circuito nas Barras de Conexão das Usinas com o Sistema de Distribuição: Foram realizadas diversas simulações de aplicação e retirada de um curto-circuito de 7 ciclos no ponto de conexão das Usinas Rio Alegre, Rio Palmeira e Rio Caxambu. Os resultados demonstram que todas as usinas apresentam um comportamento estável. Como exemplo, a Figura 2, apresenta o comportamento dos ângulos dos geradores das usinas quando é aplicado um curto-circuito trifásico na barra de conexão da Usina Rio Alegre.

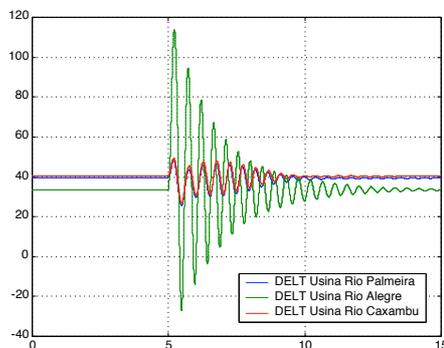


Figura 2 - Ângulo dos geradores para um curto-circuito trifásico na conexão da Usina Rio Alegre.

### 3.1.2 Degrau na Referência do Regulador de Tensão

Estas simulações foram realizadas para analisar as condições de ajuste da tensão de operação do gerador através da aplicação de um degrau na referência do regulador de tensão (RT), o que permite verificar as condições de amortecimento e estabilidade do gerador após a aplicação do evento. Todos os geradores apresentaram um comportamento estável e com amortecimento para o degrau de tensão. Como exemplo, a Figura 3 apresenta o comportamento da potência ativa gerada pelos geradores para a aplicação de um degrau de tensão no RT da Usina Rio Alegre.

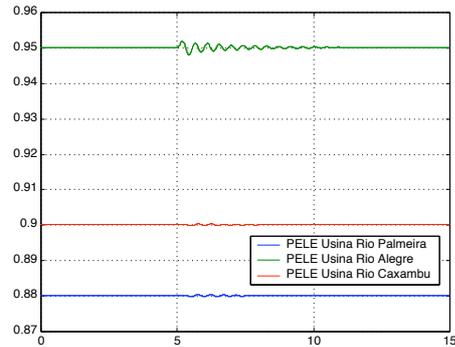


Figura 3 –Potência ativa dos geradores para um Degrau de Referência no RT Gerador da Usina Rio Alegre.

### 3.1.3 Energização e Desligamento de Banco de Capacitor (BC)

Eventos do tipo energização/desenergização de capacitores são comuns em sistemas de distribuição e causam um impacto momentâneo nos geradores no sentido de prover/absorver potência à energização. Este evento simula os efeitos que surgem no sistema quando é desligado, e posteriormente energizado, um banco de capacitores de 0.6 kVAR localizado no alimentador que conecta a usina de Caxambu.

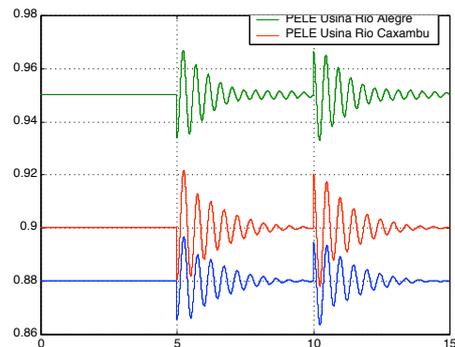


Figura 4 – Potência ativa dos geradores para o desligamento e conexão do BC.

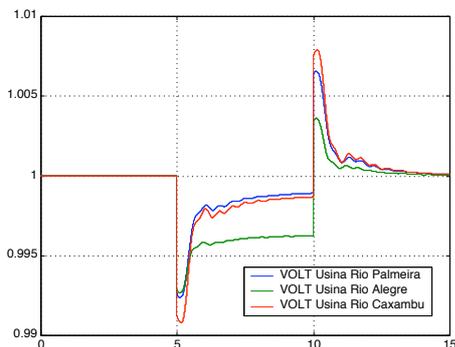


Figura 5 – Tensão dos geradores para o desligamento e conexão do BC.

Através da análise das Figuras 4 e 5 nota-se que o sistema apresenta pequenas oscilações (potência ativa e tensão) que são suave e rapidamente amortecidas.

### 3.1.4 Comutação de Tap na Subestação

Este evento simula as condições de ajuste da operação diária para correção de tensão do sistema através da comutação do Tap do LTC (load tap changer) localizado na SE Panambi (69/23 kV).

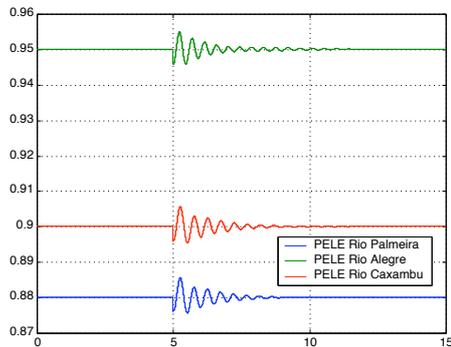


Figura 6 – Potência ativa dos geradores com a comutação do tap do transformador.

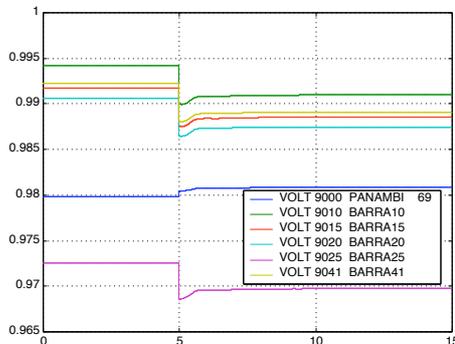


Figura 7 – Tensão em algumas barras do sistema em estudo com a comutação do tap do transformador.

Pode-se verificar nas Figuras 6 e 7 que o efeito da comutação sobre potência gerada pelos geradores e sobre a tensão do sistema apresenta um comportamento satisfatório quanto ao amortecimento e estabilização das oscilações.

### 3.2 Operação Isolada

Esta condição de operação ocorre quando há a perda da linha de transmissão que interliga o sistema de distribuição com a rede básica, isolando o sistema da Hidropan. Para esta situação existe um plano de contingências que separa trechos dos alimentadores através de manobras e chaveamentos que compatibilizam a carga com a geração que fica disponível através da sincronização das GDs. Nessa situação, as Usinas, Rio Palmeira e Rio Alegre, ambas de 950 kVA, constituem o circuito 1 que supre o conjunto urbano Condor, em sua totalidade, e parte do conjunto urbano e rural de Panambi. O circuito 2 é formado pelo conjunto urbano de Panambi, e passa a ser atendido somente pela Usina Rio Caxambu, de 950 kVA. Esta situação permite manter os índices de continuidade (DEC e FEC) dentro dos patamares regulatórios. Como exemplo da vantagem do ilhamento, cita-se os resultados do evento relatado em [3], onde o DEC e FEC sem a sincronização das GDs

seriam de 3,48 e 2,40, respectivamente. Com a utilização das GDs para atender parte do sistema (aproximadamente 25% da carga) o DEC e o FEC ficaram em 2,56 e 2,05, respectivamente, sendo que o conjunto urbano Condor foi 100% atendido.

Na simulação do caso descrito acima a carga do circuito 1 é de 1500 kW e 600 kVar e do circuito 2, 900 kW e 500 kVar. Para avaliar as condições dinâmicas de operação isolada quanto ao nível de tensão, estabilidade transitória e condição de atendimento foram simulados os eventos descritos a seguir.

#### 3.2.1 Variação Positiva de 10% de Carga

Nesta simulação foi aplicado um aumento de 10% na carga nos dois circuitos isolados. A Figura 8 ilustra o comportamento das potências dos geradores. Pode-se notar que as potências das Usinas Rio Alegre e Rio Palmeira apresentam um comportamento estável e amortecido. Entretanto, a potência elétrica da Usina de Caxambu apresenta um comportamento oscilatório

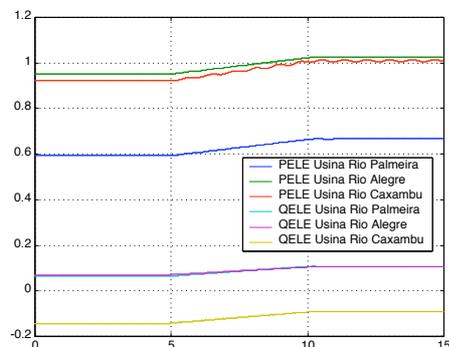


Figura 8 – Potência ativa e reativa dos geradores com o aumento da carga.

Da mesma forma, as tensões da Usina Rio Alegre e Rio Palmeira e de barras pertencentes ao circuito 1 apresentam um comportamento oscilatório que amortecem em um tempo adequado.

Entretanto, as tensões do circuito 2, alimentado pela Usina Caxambu, apresentam um comportamento oscilatório inaceitável, conduzindo o sistema a uma instabilidade de tensão. Contribuem para este comportamento a impedância vista pelo gerador em relação as cargas, a falta de regulação de velocidade e o modelo da carga ( $P=60 P_{cte}$  e  $40 Z_{cte}$  e  $Q=Z_{cte}$ ).

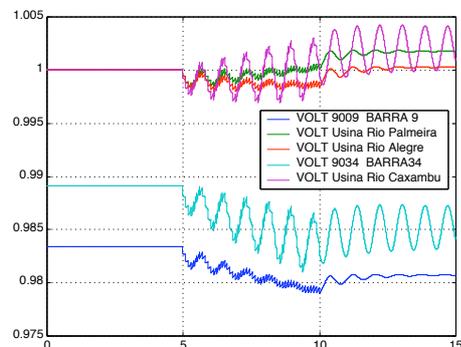


Figura 9 – Tensão nas barras com o aumento de carga.

### 3.2.2 Desligamento e Energização do Banco de Capacitor (BC) de 0,6 kVAr no Circuito 1

Esta simulação serve para avaliar o impacto do desligamento e da energização de um BC conectado ao circuito 1. Pode-se analisar, através da Figura 10 que, o sistema sofre pouca influência, mantendo a estabilidade e amortecendo as oscilações em um tempo aceitável.

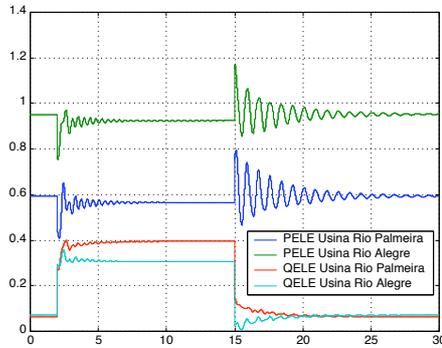


Figura 10 – Potência ativa e reativa dos geradores com o desligamento e conexão do BC.

O comportamento das tensões nas usinas e na barra terminal, Figura 11, também é satisfatório.

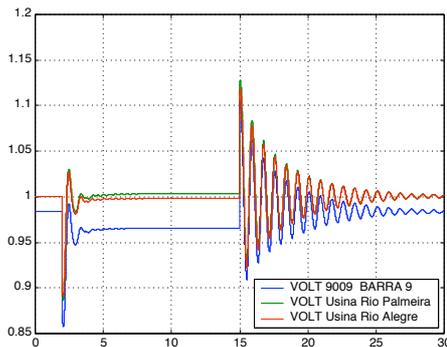


Figura 11 – Tensão nas barras dos geradores e no final do circuito com o desligamento e conexão do BC.

### 3.2.3 Desligamento e Energização de Banco de Capacitores (BC) de 0,6 kVAr do circuito 2

Nesta seção foi simulado o impacto do desligamento e da energização de um BC conectado ao circuito 2.

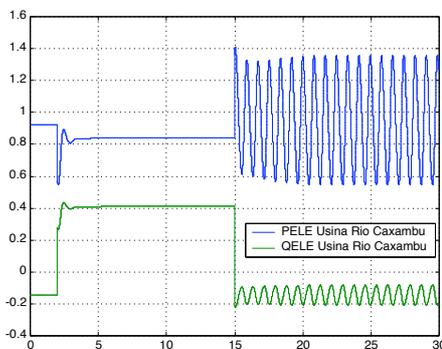


Figura 12 – Potência ativa e reativa do gerador com o desligamento e conexão do BC.

Pode-se concluir, pela análise das Figuras 12 e 13, que o sistema permaneceu estável para a condição de desligamento, porém, para o evento de energização o sistema apresenta oscilações inaceitáveis e pouco amortecidas (potência elétrica e tensão) as quais caracterizam uma condição de instabilidade, a menos que haja atuação da proteção e retirada do capacitor, o que não é uma prática desejada. Dessa forma, a regulação de tensão deverá ser feita pelo gerador.

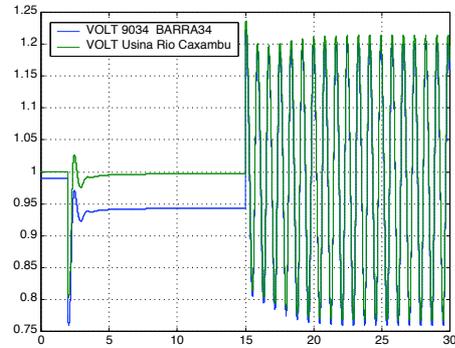


Figura 13 – Tensão na barra do gerador e no final do circuito com o desligamento e conexão do BC.

### 3.2.4 Curto-Circuito Trifásico no Circuito 1

Esta simulação analisa o evento de aplicação e eliminação, em 7 ciclos, de um curto-circuito trifásico no trecho final do circuito 1. Devido a característica de operação desta situação, o sistema permanece estável e apresenta um amortecimento satisfatório, como mostram as Figuras 14 e 15.

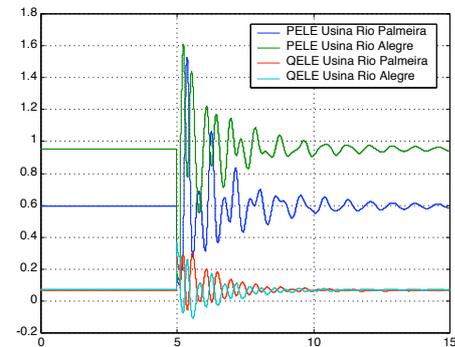


Figura 14 – Potência dos geradores com o curto-circuito.

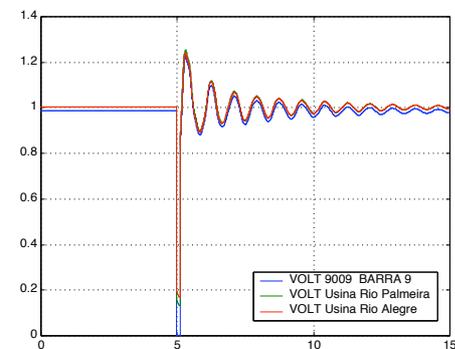


Figura 15 – Tensão nas barras dos geradores e no final do circuito com o curto-circuito.

### 3.2.5 Curto - circuito no Circuito 2

Esta é uma situação crítica de operação, gerador com abertura angular elevada e uma rede de alta impedância devido a característica do sistema de distribuição. Nessa situação a aplicação de um curto-circuito trifásico no final do circuito 2 implica em uma condição de instabilidade, mesmo com a abertura do disjuntor em 7 ciclos (Figuras 16 e 17).

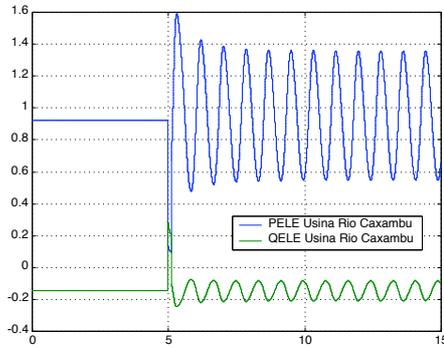


Figura 16 – Potências das Usinas com o curto-circuito.

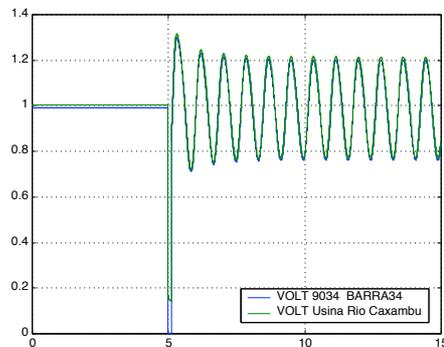


Figura 17 – Tensão na barra do gerador e no final do circuito com o curto-circuito.

## 4.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo sobre o comportamento dinâmico de geração distribuída (GD) conectada em um sistema de distribuição em dois casos de operação: a GD está sincronizada e o sistema de distribuição está conectado a rede básica e a GD está sincronizada porém alimentando partes do sistema de distribuição em situação de ilhamento. Devido a falta de dados dinâmicos completos dos geradores e seus controladores, foram adotados dados típicos de unidades hidráulicas de 950 kVA.

Da análise do estudo realizado, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- As situações reais e os eventos descritos, para a chamada operação normal, foram simuladas e comparadas com resultados da Hidropan, validando-se os resultados qualitativos obtidos;
- Os resultados obtidos com a simulação dos eventos para a condição de ilhamento foram comparados com uma situação de operação real descrita em [3] e as respostas qualitativas obtidas foram também validadas;
- Estudos mais aprofundados, utilizando os dados reais dos geradores e seus controladores devem ser

realizados para representar fielmente as condições reais de operação, e permitir que novos controladores e ajustes sejam propostos para melhorar a performance dinâmica do sistema;

- Os resultados encontrados para a situação do sistema ilhado apontam para as vantagens deste tipo de operação em relação aos índices de continuidade, satisfação do cliente e imagem social da empresa.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, "Distribution Generation: a Definition", Electric Power Systems Research, 2001.
- (2) N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, "Embedded Generation", UK, 2000.
- (3) E. Knorr, E. B. Spier, F. A. B. Lemos "Análise da Operação Isolada de um Sistema de Distribuição com Geração Distribuída – O Caso Hidropan", XV SENDI, 2002.
- (4) P. P. Barker, R. W. De Mello, Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems", Summer Meeting, 2001.
- (5) CIGRE STUDY COMMITTEE NO. 37: "Impact of Increasing Contributions of Dispersed Generation on The Power Systems". Final report of Working Group 37-23, September 1998.
- (6) CIRED preliminary report of CIRED Working Group 04: "Dispersed Generation". Issued at the CIRED Conference in NICE, June 1999.
- (7) H. L. Willis, W. G. Scott, " Distributed Power Generation: Planning and Evaluation", USA, 2000.
- (8) A. Daly, "Understanding the Potencial Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems", Rural Electric Power Conference, 2001.
- (9) S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziaargyriou, "Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid", Summer Meeting, July 2001.
- (10) T. E. Kim, J. E. Kim, "Voltage regulation Coordination of Distributed Generation System in Distribution System", Summer Meeting, July 2001.
- (11) N. M. Ijumba, A. A. Jimoh, M. Nkabinde, "Influence of Distribution Generation on Distribution Network Performance", Summer Meeting, July 2001.
- (12) S. K. Salman, I. M. Rida, "Investigating the Impact of Embedded Generation on Relay Setting of Utilities' Electrical Feeders, IEEE Transactions Power Delivery, Vol. 16, NO. 2, April 2001.
- (13) N. Hadjsaid, J. F. Canard, F. Dumas, "Dispersed Generation Increases the Complexity of Controlling Protecting, and Maintaining the Distribution Systems", IEEE Comp. Appl. in Power, April 1999.

### Apêndice A

Tabela 1 - Gerador de Pólos Salientes

$X_d$	$X_q$	$X'_d$	$X''_d$	$X_e$
124.4	55.55	41.11	41.11	0
$T'_d$	$T''_d$	$T''_q$	H	MVA
0.470	0.059	0.35	2.00	0.95

Tabela 2 - Regulador de Tensão

Ka	Ke	Kf	Ta	Te	Lmn	Lmx
20.0	-0.05	0.03	0.10	0.5	-5.0	5.0