



**XXI SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO - IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**INFLUÊNCIA DO ILHAMENTO NA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE PROBABILÍSTICA DE MICRORREDES**

**Carmen L. T. Borges (\*)**

**Leonardo F. Rocha**

**Julio A. Dias**

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**RESUMO**

Este artigo apresenta um modelo que incorpora a influência do ilhamento nas avaliações da confiabilidade de microrredes baseadas em fontes alternativas de energia. São avaliados os efeitos do processo de ilhamento em termos de tensão e de frequência e o impacto das falhas dos componentes nos índices de confiabilidade da microrrede. É combinada a avaliação probabilística da confiabilidade, por Simulação Monte Carlo, com a análise dinâmica do ilhamento, por simulação da estabilidade transitória. As fontes alternativas são representadas por modelos estocásticos a múltiplos estados. O sucesso do ilhamento é pré-requisito para o cálculo dos índices de confiabilidade da microrrede.

**PALAVRAS-CHAVE**

Confiabilidade Probabilística, Microrredes, Ilhamento, Geração Distribuída, Fontes Alternativas.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A conexão de geração distribuída (GD), muitas vezes associada com fontes de natureza intermitente, pode causar impactos positivos e negativos à rede da concessionária de distribuição. Para explorar ao máximo o benefício da GD, tem sido introduzida a idéia das redes ativas para descrever sistemas de distribuição auto-gerenciáveis, onde geradores de pequeno e médio porte estão integrados aos centros de controle da distribuição, com o objetivo de fornecer uma forma eficiente, segura e confiável, que permita a operação das chamadas microrredes [1]. As microrredes podem ser definidas como redes de distribuição de baixa e/ou média tensão contendo geradores distribuídos, sistemas de armazenamento e cargas controláveis, e que podem operar interligadas à rede da distribuidora ou, em situações de emergência, de forma ilhada, alimentadas por seus recursos próprios.

Um ponto fundamental envolvido na implantação de microrredes está na alternância entre o modo de operação conectado e o modo de operação ilhado [2]. O ilhamento de parte da rede de distribuição (formação da microrrede) e a reconexão da mesma ao sistema principal pode ser considerado como um dos maiores desafios atualmente existentes no estudo da confiabilidade das microrredes. Em geral, os estudos de confiabilidade abordam os impactos de falhas de componentes da rede ou da GD na operação da microrrede sem explorar o processo de ilhamento e reconexão ao sistema principal. A rigor, a confiabilidade da microrrede está diretamente ligada às características dinâmicas do sistema, tendo em vista que nas redes ativas de distribuição a presença de unidades geradoras impõe novas restrições dinâmicas aos processos de ilhamento e reconexão. Para o processo de ilhamento, é importante estudar seu efeito na estabilidade tanto da microrrede como do sistema principal. Já para o processo de reconexão, é importante analisar os desvios de frequência entre a microrrede e o sistema principal antes de sincronizá-los. Ou seja, a complexidade envolvida pode ser comparada com os fenômenos de ilhamento e recomposição de sistemas de transmissão. No entanto, o grau de complexidade e os dados estocásticos necessários para se incorporar análises dinâmicas em estudos de confiabilidade são extremamente elevados, tornando-se necessário a exploração de abordagens alternativas.

(\*) Caixa Postal 68504 – CEP 21941-972 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Tel: (+55 21) 2562-8027 – Fax: (+55 21) 2562-8080 – Email: carmen@nacad.ufrj.br

O objetivo deste artigo é incorporar a influência do processo de ilhamento na confiabilidade das microrredes compostas por GD baseadas em fontes alternativas de energia. Para isso, são analisados tanto os efeitos do ilhamento na tensão e na frequência da microrrede quanto o impacto nos índices de confiabilidade devido a falhas nos componentes da própria microrrede. O modelo proposto está baseado na combinação da avaliação probabilística da confiabilidade com a simulação da dinâmica do processo de ilhamento. A avaliação da confiabilidade utiliza simulação Monte Carlo Não-Sequencial e Fluxo de Potência Ótimo Não-Linear para análise da adequação dos estados da rede. O objetivo final é identificar formas de incorporar o grau de sucesso do ilhamento nos índices de confiabilidade da microrrede, verificando se a mesma é capaz de sobreviver ao processo, além de avaliar sua influência na confiabilidade do restante do sistema de distribuição.

Resultados serão apresentados para uma rede de distribuição de média tensão [3] onde, para os casos em que a microrrede sobrevive ao processo de ilhamento, sua confiabilidade é avaliada considerando tanto falhas na rede como a disponibilidade de geração das unidades de GD. Ao final, o grau de sucesso do ilhamento é incorporado dando origem a índices mais realistas da confiabilidade das microrredes.

## 2.0 - MICRORREDES

Os incentivos governamentais, como consequência de crescentes preocupações socioambientais e relacionados com a ampliação da produção de energia baseada em fontes alternativas, têm contribuído para o surgimento de um novo conceito de redes de distribuição. Essas redes, denominadas de microrredes, são definidas como uma associação do sistema de distribuição de Média Tensão – MT e/ou Baixa Tensão – BT, com geradores distribuídos de pequeno e médio portes, além de cargas e de dispositivos de armazenamento, controlados por um sistema de gerenciamento, capaz de operá-la de forma conectada com a rede principal ou, em caso de falha na distribuidora, ilhada em relação à mesma.

No modo de operação conectado, a microrrede pode importar ou exportar energia e/ou fornecer serviços ancilares. Já no modo ilhado, ela opera independentemente da rede da concessionária, usando recursos locais e passando do estado de controle de potência para controle de frequência e cortando carga, se necessário [4].

Diversas tecnologias de geração estão associadas com esse tipo de aplicação, tais como células combustíveis, turbinas eólicas, painéis solares, micro-turbinas e unidades de geração combinada de energia elétrica e calor/frio. Assim, os possíveis benefícios relacionados com a utilização das microrredes são: melhoria da confiabilidade, redução de perdas e fornecimento de serviços ancilares, como, por exemplo, controle de tensão. Além disso, são esperados benefícios sociais como redução do impacto ambiental do sistema de geração, menor exposição dos consumidores participantes à grandes falhas no sistema e, dependendo do caso, uma diminuição nos custos dos consumidores com energia [5].

Por outro lado, o aumento no número de unidades geradoras nas redes de distribuição, principalmente durante a operação ilhada, pode ser responsável por problemas de coordenação e controle, flicker de tensão e até mesmo instabilidade no sistema. Com isso, o desafio está em permitir a mudança de um modo de operação para o outro sem causar impacto no suporte de tensão, na estabilidade e na confiabilidade, tornando o controle e a proteção da microrrede itens importantes para a qualidade do fornecimento de energia.

Dentro do conceito de microrredes, a rede de distribuição pode ser subdividida automaticamente, durante faltas ou interrupções, em pequenas ilhas com geradores assumindo parcialmente ou integralmente as cargas participantes. Assim, o problema está em avaliar se os recursos disponíveis são capazes de produzir energia suficiente e ao mesmo tempo manter adequados os níveis de tensão e de frequência para os consumidores da microrrede [2].

Nesse contexto, a estabilidade da microrrede está associada com a resposta da mesma ao tipo de perturbação e aos recursos disponíveis. Perturbações severas podem ser responsáveis por grandes variações de frequência, de tensão e de fluxo de potência. Dependendo do evento, podem ser observadas saídas em cascata de forma incontrolável, deteriorando o sistema e levando a uma perda significativa da carga. Dessa forma, ações de controle devem ser direcionadas para preservar o máximo possível do sistema de um colapso total [6].

A resposta do sistema para uma condição de ilhamento está relacionada, basicamente, com um transitório de frequência [7]. Com isso, o controle de velocidade e o sistema de suprimento de energia desempenham um importante papel na determinação do desempenho dinâmico da rede. Porém, frequentemente, a situação está associada, também, com questões de variação de tensão devido à reservas insuficientes de reativos. Assim, podemos afirmar que durante o chaveamento, duas situações podem ocorrer: Ilha com nível de geração insuficiente ou Ilha com geração superior à carga.

No primeiro caso, se a capacidade dos geradores for inferior à carga, a frequência irá cair. Caso não exista a possibilidade de aumentar o nível de produção de energia das máquinas pertencentes à microrrede, a frequência pode alcançar patamares inviáveis, levando a saída das unidades geradoras por meio dos esquemas de proteção por subfrequência e piorando ainda mais o problema. Nesse caso, para evitar um colapso total da microrrede, devem ser empregados esquemas de corte de cargas, de forma a compatibilizar a carga e a geração, com o objetivo de estabilizar o nível de frequência do sistema.

Por sua vez, na segunda situação, caso a microrrede se encontre com excesso de geração, será observado um aumento da frequência, forçando os reguladores de velocidade das máquinas a ajustar a geração de potência mecânica. Se ainda assim, não for possível realizar o controle carga-frequência da microrrede, a solução pode ser o desligamento de unidades geradoras, o que pode levar a necessidade de corte de carga.

Aliado a isso, o desempenho do sistema pode ser influenciado pela disponibilidade de potência reativa dentro da microrrede. Portanto, variações na potência reativa gerada e absorvida podem acarretar condições de violações de tensão, fazendo com que os controles de sobre/subexcitação sejam ativados, o que, dependendo do caso, pode levar a saída de unidades geradoras.

Após o término do processo de ilhamento, a microrrede opera nas condições de regime permanente até que tenha decorrido o tempo necessário para que os problemas no sistema principal sejam sanados. Nesta hora, o processo de restabelecimento pode ser acionado. Isso envolve, novamente, ajustar a geração e a carga para re-sincronizar os dois sistemas, microrrede e sistema principal, religar as unidades geradoras eventualmente desconectadas e restabelecer os consumidores perdidos durante o distúrbio na rede.

### 3.0 - SIMULAÇÃO DINÂMICA DO ILHAMENTO

Como consequência da necessidade de se resolver problemas relacionados com a resposta dinâmica de sistemas de potência frente a distúrbios severos, foram introduzidos os conceitos de estabilidade de curto, de médio e de longo prazo [7]. No estudo de estabilidade de curto prazo, a análise considera as equações dinâmicas de equipamentos e de controles com características extremamente rápidas, para capturar informações que ocorrem no período de tempo imediatamente após uma perturbação no sistema. Na análise de longo prazo, por outro lado, considera-se que as oscilações de sincronização entre máquinas foram alcançadas, implicando em uma frequência uniforme. Nesse caso, o ponto de interesse está nos fenômenos de longa duração que acompanham distúrbios severos e nas variações entre geração e consumo de potências ativa e reativa. Num intervalo intermediário, por sua vez, a avaliação de médio prazo está associada com eventos que ocorrem entre o período transitório e a análise de longo prazo. Assim, o foco está, além da questão de sincronização das máquinas, nos efeitos de alguns fenômenos lentos e, também, naqueles que acarretam grandes variações de tensão e de frequência. Tanto na análise de médio prazo quanto na de longo prazo, as dinâmicas rápidas não são significativas.

No caso da avaliação do efeito do ilhamento de sistemas de distribuição com a presença de microrredes, foi utilizada uma análise onde o intervalo de interesse inclui o período transitório. Portanto, para a avaliação do ilhamento, o objetivo foi incluir os efeitos das dinâmicas rápidas das unidades geradoras associadas com o evento em questão. Com isso, as avaliações de curto e de médio prazos foram escolhidas por serem consideradas adequadas para analisar perturbações que resultam em falhas em cascata e na formação de ilhas no sistema. Estas falhas podem estar relacionadas com problemas nas respostas dos sistemas de controle das máquinas e/ou serem decorrentes de reservas insuficientes de potência ativa e reativa. O relevante, neste trabalho, é que o ilhamento pode acarretar na não sobrevivência da microrrede, devido a grandes variações de tensão e frequência em resposta a um problema no sistema principal da concessionária. Portanto, uma simulação completa da estabilidade transitória do processo de ilhamento, para a criação da microrrede, é usada nesse artigo, para diagnosticar a sobrevivência ou não da microrrede. Em outras palavras, o objetivo está em identificar se a frequência e a tensão da microrrede encontram-se em níveis adequados para a sua operação no modo ilhado.

### 4.0 - AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DA MICRORREDE

A evolução dos sistemas de distribuição, aliado à integração de geração distribuída (GD) nas redes da concessionária, foi responsável pela proposta das redes ativas de distribuição, que incluem a possibilidade da operação ilhada, na forma de microrrede. O estudo das microrredes tem exigido a busca por novos métodos que permitam quantificar o impacto das mesmas nas redes das distribuidoras. Essa necessidade se tornou ainda mais importante com a reestruturação dos setores elétricos de diversos países, onde o estabelecimento de competição nas atividades de geração e de comercialização para consumidores livres, combinado com o livre acesso aos sistemas das concessionárias, acabou evidenciando a figura do produtor independente de energia e incentivando o aumento de geração próxima aos centros de carga.

Nesse novo cenário, a avaliação do impacto da microrrede nos índices de confiabilidade individuais e do sistema é uma importante tarefa para o desenvolvimento de uma regulação específica e adequada para a integração de microrredes nas redes de distribuição. Outro ponto importante é a identificação dos custos associados à implantação das microrredes em contrapartida à redução dos custos associados às penalidades por violações nos padrões de continuidade, aplicadas pelas agências reguladoras em diversos países.

As incertezas envolvidas no planejamento e na operação de sistemas de distribuição com microrredes tornam-se maiores que no passado, principalmente em relação à capacidade de sobrevivência do sistema ilhado frente a um problema na rede principal e, também, devido à utilização de unidades geradoras baseadas em fontes de energia de natureza intermitente. Portanto, para a avaliação da confiabilidade de sistemas de distribuição com microrredes

é necessária uma análise que leve em consideração o caráter probabilístico dos sistemas de potência, a influência da natureza intermitente de algumas fontes alternativas de energia e as dinâmicas de curto e de médio prazo associadas com a formação das ilhas no sistema de distribuição.

Neste trabalho, foi realizada a avaliação probabilística da confiabilidade do sistema de distribuição por meio de simulação Monte Carlos (SMC) Não-Sequencial, combinada com um modelo de minimização de corte de carga. O modelo de minimização é utilizado na análise da adequação do estado amostrado do sistema e pode ser caracterizado como um problema de Fluxo de Potência Ótimo Não-Linear.

Os índices de confiabilidade calculados para capturar a severidade e a importância das falhas do sistema de distribuição são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Índices de confiabilidade de sistemas de distribuição.

Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora - FEC ( <i>System Average Interruption Frequency Index</i> )	$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i}$
Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora - DEC ( <i>System Average Interruption Duration Index</i> )	$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i}$
Indisponibilidade do Sistema ( <i>Average Service Unavailability Index</i> )	$ASUI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \cdot 8760}$
Disponibilidade do Sistema ( <i>Average Service Availability Index</i> )	$ASAI = 1 - ASUI$
Energia Não-Suprida ( <i>Energy Not Supplied</i> )	$ENS = \sum L_i U_i$
Energia Não-Suprida por Unidade Consumidora ( <i>Average Energy Not Supplied</i> )	$AENS = \frac{ENS}{\sum N_i}$

onde  $\lambda_i$  é a taxa de falha,  $N_i$  é o número de consumidores conectados no ponto de carga  $i$ ,  $U_i$  é o tempo médio de reparo anual no ponto de carga  $i$ , 8760 é o número de horas no ano e  $L_i$  é a carga média no ponto de carga  $i$ .

## 5.0 - CONFIABILIDADE DA MICRORREDE CONSIDERANDO A DINÂMICA DO ILHAMENTO

Conforme mencionado anteriormente, para avaliar a confiabilidade da rede de distribuição com microrredes, é importante avaliar, além do nível de risco associado, a dinâmica do sistema frente a falhas na rede principal da concessionária. Em outras palavras, antes de verificar a confiabilidade do sistema principal e da microrrede, devemos avaliar se essas redes são capazes de sobreviver a determinadas perturbações. Para isso, foram utilizados para a geração distribuída modelos de máquinas síncronas combinadas com turbinas térmicas e hidráulicas em conjunto com seus respectivos reguladores de tensão/velocidade. O objetivo é tentar capturar as dinâmicas de curto e de médio prazo relacionadas com o processo de ilhamento da microrrede, registrando informações sobre as variações das tensões nas barras e da frequência do sistema.

Após a avaliação da dinâmica do processo de ilhamento descrita acima, caso a tensão e a frequência da microrrede e do sistema principal fiquem dentro dos limites de operação, pode ser realizada, então, a avaliação da confiabilidade para cada sistema separadamente, tendo em vista que estarão sujeitos a falhas durante a operação ilhada. Dessa forma, os índices de confiabilidade descritos anteriormente são novamente calculados para quantificar o nível de risco do sistema principal e da microrrede, quando operando no modo ilhado. O objetivo é avaliar os valores encontrados para quantificar o benefício da utilização de microrredes em comparação com redes de distribuição tradicionais e avaliar o grau de risco que a operação ilhada da microrrede imprime aos consumidores atendidos pela mesma.

## 6.0 - RESULTADOS

### 6.1 Sistema Teste

As simulações do modelo proposto foram realizadas utilizando o sistema RBTS-Barra2 [8], mostrado na Figura 1. O RBTS-Barra2 é um sistema de distribuição com quatro alimentadores radiais e 20 MW de carga. O alimentador 3, com uma carga de 5 MW, será também avaliado operando como microrrede, com a GD conectada na Barra 61.

Em relação a GD, foram considerados dois tipos de fontes alternativas: Pequena Central Hidrelétrica - PCH e Usina Térmica a Biomassa. O modelo da PCH utilizado, desenvolvido em [9], combina o modelo da vazão do rio com o do gerador, de forma a incorporar os efeitos da variação da vazão, que afeta diretamente a geração de energia. Assim, a PCH é representada por um modelo Markoviano de múltiplos estados individualizados, com suas respectivas taxas de transição e tempos médios de duração. Os diferentes valores de vazão são representados por

estados de 1 a N e a taxa  $\lambda_{ij}$  indica a transição do estado de vazão i para o estado de vazão j, conforme mostrado na Figura 2. As transições entre estados de operação e reparo do gerador são representadas por  $\lambda$  e  $\mu$ .

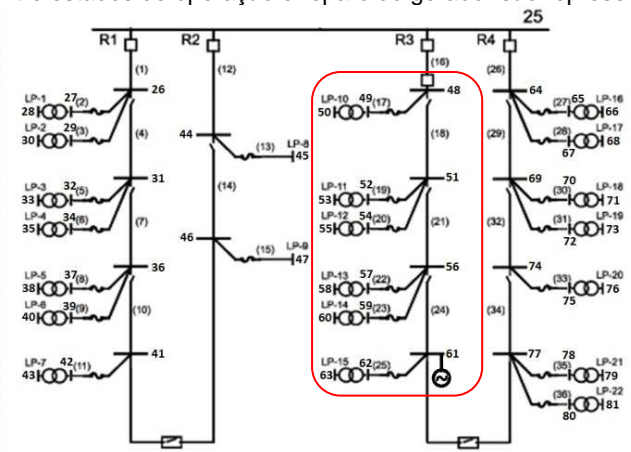


FIGURA 1 – RBTS-Barra2.

As usinas térmicas a biomassa foram representadas através de modelos a três estados, como mostrado na Figura 3. Nesse modelo, as falhas de determinados componentes não acarretam a saída da unidade, mas implicam uma condição de operação com potência reduzida.

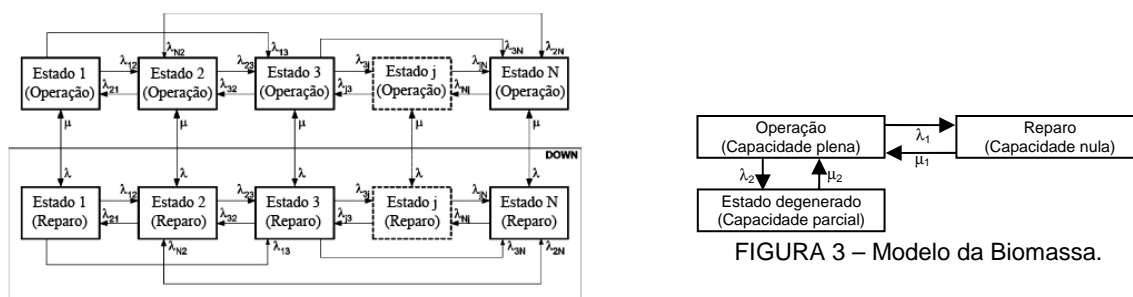


FIGURA 2 – Modelo da PCH.

## 6.2 Dinâmica do Ilhamento

Para avaliar o desempenho dinâmico do processo de ilhamento, a ocorrência de um curto-circuito trifásico no trecho 16 do RBTS-Barra2 foi considerada, seguido pela abertura dos respectivos disjuntores, formando a microrrede. As simulações foram realizadas através da utilização de unidades de 5,5 MW, 6 MW e 9 MW. Nos modelos dos geradores estão incluídos os modelos das máquinas síncronas, dos reguladores de tensão e do conjunto turbina-regulador de velocidade.

Para o caso da GD de 5,5 MW, a microrrede não sobrevive ao ilhamento, conforme mostrado nas Figuras 4 e 5, onde se observa uma variação de tensão que ultrapassa 1,3 pu, acarretando a desconexão da unidade por meio dos esquemas de proteção de sobretensão. No que se refere à variação da frequência, no entanto, a mesma fica dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz estabelecidos nos Procedimentos de Distribuição – PRODIST [10], após o transitório inicial.

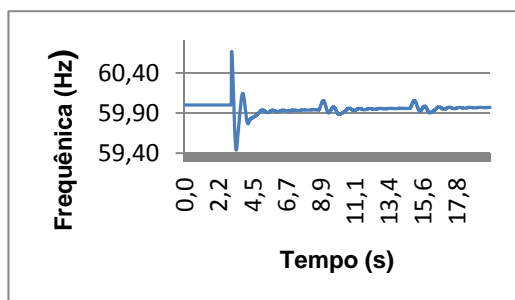


FIGURA 4 – Frequência da Microrrede - GD 5,5MW.

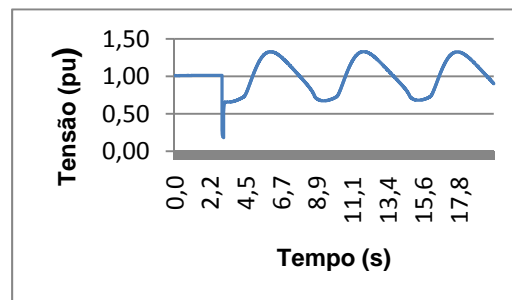


FIGURA 5 – Tensão Barra 61 da Microrrede - GD 5,5MW.

Estes resultados demonstram a importância de incorporar o processo dinâmico de ilhamento na avaliação da confiabilidade das microrredes. Na avaliação da confiabilidade da microrrede, é usual considerar-se que, se a capacidade da GD é maior ou igual à carga total da microrrede, então não há corte de carga. Em estudos um pouco mais detalhados, é solucionado o fluxo de potência na microrrede para incorporar as perdas e avaliar se há violação dos limites de tensão e carregamento. Por estes critérios, chegar-se-ia ao diagnóstico de que não há corte de carga para a GD de 5,5 MW. No entanto, a simulação dinâmica do ilhamento mostrou que a microrrede, na verdade, não sobrevive ao processo de ilhamento e, conseqüentemente, toda a carga da mesma é cortada na ocorrência do falha considerada.

Para as unidades de 6 MW e 9 MW, foi observado que a microrrede sobrevive ao processo de ilhamento, uma vez que a tensão permanece abaixo de 0,8 pu e acima de 1,1 pu durante menos de 3s, conforme determina o PRODIST [10]. Em relação à frequência, percebe-se uma pequena variação da mesma durante o curto. Porém, após o período transitório, onde se observam pequenas oscilações dentro dos limites aceitáveis, a frequência da microrrede se estabiliza em 60 Hz, graças à atuação do regulador de velocidade da unidade em questão. Os resultados obtidos para a GD de 9MW são mostrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente, para as variações da frequência e da tensão na microrrede.

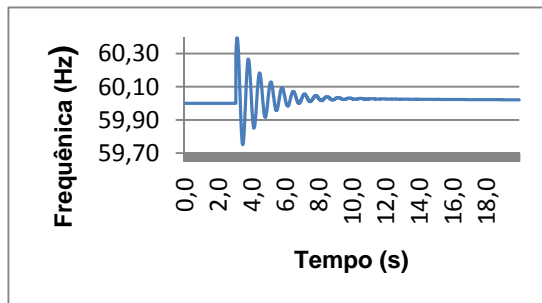


FIGURA 6 – Frequência da Microrrede - GD 9MW.

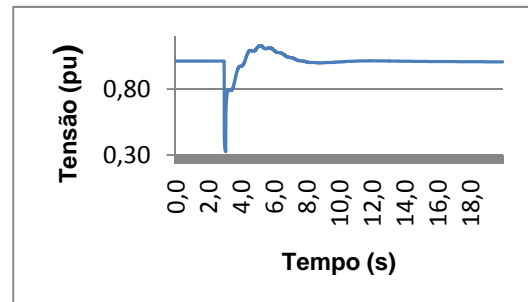


FIGURA 7 – Tensão Barra 61 da Microrrede - GD 9MW.

O objetivo de avaliar o desempenho da microrrede associada com uma unidade de maior porte (9MW) é verificar se a ilha é capaz de sobreviver mesmo quando a geração é consideravelmente superior à carga, no momento da ocorrência do curto-circuito. Assim, mesmo com um nível de geração quase 50% superior à carga da microrrede, a frequência retorna ao patamar de 60 Hz em, aproximadamente, 10 segundos.

Vale destacar que a rede principal é capaz de sobreviver ao ilhamento para todas as três capacidades de GD, se mantendo estável em todas as situações avaliadas. A frequência do sistema varia muito pouco dentro do intervalo de 59,5 Hz a 60,5 Hz, mantendo-se dentro da faixa usualmente aceitável.

### 6.3. Índices de Confiabilidade – GD de 9 MW

Depois de identificado que a microrrede com GDs de 6MW e de 9MW sobrevive ao processo de ilhamento, foram calculados os índices de confiabilidade para ambos os casos. A título de exemplo, serão mostrados os índices para o segundo caso, por ser esta a opção que fornece os melhores resultados.

As Tabelas 2 e 3 mostram os índices de confiabilidade para o sistema RBTS-Barra2 íntegro, ou seja, antes da formação da microrrede, para o sistema todo e para cada ponto de carga do alimentador 3, respectivamente.

Tabela 2 – Índices de confiabilidade da RBTS-Barra2.

Índices	Resultados do Sistema	Resultados por Alimentador			
		Alimentador 1	Alimentador 2	Alimentador 3	Alimentador 4
Ni	1908	652	2	632	622
SAIFI	0.135	0.105	0.125	0.152	0.149
SAIDI	3.587	3.445	0.626	3.707	3.623
ASUI	0.000409	0.000393	0.000072	0.000423	0.000414
ENS	64036.341	21511.6	2220.9	19522.252	20781.572
AENS	33.562	32.993	1110.5	30.9	33.411

Tabela 3 – Índices de confiabilidade dos pontos de carga do alimentador 3.

	LP10	LP11	LP12	LP13	LP14	LP15
Ni	210	210	200	1	1	10
$\lambda$	0.103	0.177	0.174	0.172	0.183	0.224
Ui	3.593	3.772	3.731	3.896	4.034	4.199
ENS	3114.5	3269.6	2720.1	3571.4	3697.6	3149.1
AENS	14.831	15.570	13.600	3571.402	3697.6	314.9

Os índices calculados para a microrrede, considerando GD do tipo biomassa ou PCH de 9MW, estão mostrados na Tabela 4, para o sistema, e nas Tabelas 5 e 6, para os pontos de carga.

Tabela 4 – Índices de confiabilidade da microrrede.

Índices	Biomassa 9 MW	PCH 9 MW
Ni	632	632
SAIFI	0.218	0.257
SAIDI	4.218	4.073
ASUI	0.000481	0.000465
ENS	19270.94	19131.878
AENS	30.491	30.272

Tabela 5 – Índices de confiabilidade dos pontos de carga da microrrede (Biomassa 9 MW)

	LP10	LP11	LP12	LP13	LP14	LP15
Ni	210	210	200	1	1	10
$\lambda$	0.266	0.218	0.177	0.111	0.132	0.073
SAIDI	4.766	3.959	3.959	4.253	3.299	3.373
ASUI	0.000544	0.000452	0.000452	0.000485	0.000377	0.000385
ENS	4131.1	3432.0	2886.8	3898.4	3024.6	2529.6
AENS	19.7	16.3	14.4	3898.4	3024.6	252.9

Tabela 6 – Índices de confiabilidade dos pontos da microrrede (PCH 9 MW).

	LP10	LP11	LP12	LP13	LP14	LP15
Ni	210	210	200	1	1	10
$\lambda$	0.296	0.293	0.189	0.090	0.152	0.082
SAIDI	4.555	4.030	3.679	4.380	3.154	2.803
ASUI	0.000520	0.000460	0.000420	0.000500	0.000360	0.000320
ENS	3948.368	3492.787	2682.451	4051.066	2890.847	2102.358
AENS	18.802	16.632	13.412	4015.066	2890.847	210.236

Ao comparar-se os índices do Alimentador 3 (Tabela 2) com os da microrrede (Tabela 4), pode ser observado que, em geral, os índices do alimentador, quando conectado ao sistema principal, são melhores do que na operação como microrrede. A operação como microrrede provê apenas melhoria em termos de ENS e AENS, tanto para GD do tipo PCH como Biomassa. Isso se deve ao fato de que, na operação como microrrede, as cargas podem ser mantidas pela GD, implicando em redução da energia não-suprida do sistema.

Já para alguns pontos de carga, a operação como microrrede (Tabelas 5 e 6) implica em melhoria de todos os índices de confiabilidade em relação à operação conectada (Tabela 3), tanto para GD do tipo PCH como Biomassa. Essa melhoria ocorre, principalmente, para os pontos de cargas mais próximas da GD, como LP14 e LP15, pois na operação conectada, estes pontos se situam no final do alimentador 3, tendo assim pior confiabilidade.

Os índices obtidos com a GD do tipo biomassa são, em geral, melhores dos que os obtidos com a PCH. O motivo está na menor intermitência da biomassa, que é uma geração térmica, em relação à PCH, onde a disponibilidade de energia depende da vazão do rio.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um modelo que incorpora a influência do ilhamento na avaliação de sistemas de distribuição com microrredes, incluindo a representação de fontes alternativas de energia. Os efeitos do processo de ilhamento na tensão e na frequência tanto do sistema principal quanto da microrrede foram apresentados.

Os resultados mostram que, em certos casos, a microrrede pode não sobreviver aos processo e, portanto, a avaliação da confiabilidade sozinha não é suficiente para uma apropriada avaliação da microrrede.

Adicionalmente, foi observado que, dependendo do caso, as cargas da microrrede podem estar sujeitas à grandes variações de tensão e de frequência, especialmente para eventos severos. Então, os esquemas de controle e proteção para microrredes são realmente importantes para garantir a qualidade do suprimento de potência.

O uso dos modelos que tratam adequadamente as fontes intermitentes de energia dentro da avaliação probabilística é de grande importância para a captura dos estados de geração da microrrede, uma vez que essas unidades não possuem a mesma disponibilidade que os geradores convencionais.

Embora o nível de confiabilidade de alguns pontos de carga seja inferior quando a microrrede opera de forma ilhada, em comparação com a operação em conjunto com a rede da concessionária, a possibilidade da operação ilhada é uma grande alternativa, já que permite manter o suprimento mesmo em casos de falha no sistema principal. Adicionalmente, a confiabilidade dos pontos de carga próximos da conexão da GD é significativamente melhorada sob o modo de operação como microrrede.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Chowdhury, S. P., Crossley, P., Chowdhury, S., “*Microgrids and Active Distribution Networks*”, The IET, London , 2009.
- (2) Pilo, F., et al., “Improvement of Reliability in Active Networks with Intentional Islanding”, *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Hong Kong, 2004.
- (3) Allan, R.N, et al., “A Reliability Test System for Educational Purposes – Basis Distribution System Data and Results”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 813-820, 1991.
- (4) Costa, P. M., “Assessing the Contribution of Microgrids to the Reliability of Distribution Networks”, *Electric Power Systems Research* vol. 79, pp. 382-389, Elsevier, 2009.
- (5) Falcão, D. M., “*Smart Grid e Microrredes: O futuro já é presente*”, Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos, Rio de Janeiro, 2009.
- (6) Zaag, N, Restrepo, J. F., Banakar, H., Galiana, F. D., “Analysis of Contingencies Leading to Islanding Cascading Outages”, *Proceedings IEEE Lausanne Power Tech*, July, 2007.
- (7) Kundur, P., *Power System Stability and Control*, Mc Garaw Hill (EPRI Power System Engeneering Series), New York, 1994.
- (8) Allan, R.N, et al., “A Reliability Test System for Educational Purposes – Basis Distribution System Data and Results”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 813-820, 1991.
- (9) Borges, C. L., Pinto, R. J. “Small Hydro Power Plants Energy Availability Modeling for Generation Reliability Evaluation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, august 2008, pp. 1125-1135.
- (10) ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 26 de março de 2011.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nome: Carmen Lucia Tancredo Borges

Local e ano de nascimento: Rio de Janeiro, 1961

Local e ano de pós-graduação: COPPE/UFRJ, 1998

Experiência Profissional: DSc, Prof. Associado DEE/Poli/UFRJ e PEE/COPPE/UFRJ, produção científica no currículo Lattes em: <http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.jsp?id=K4791278U5>