



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

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

GRUPO - GAT

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

DINÂMICA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE SUBTRANSMISSÃO - UM ENFOQUE BRASILEIRO

**Guilherme Miranda Martins(*)
Engevix Engenharia**

RESUMO

Neste trabalho serão avaliados os impactos na dinâmica (transitórios eletromecânicos) de um sistema de energia elétrica frente à inserção de Geração Distribuída (GD). Um sistema teste, que representa uma situação típica do sistema brasileiro, qual seja, a integração de PCHs em redes de subtransmissão (69 kV e 138 kV) é utilizado em simulações que verificam a sensibilidade do desempenho dinâmico a determinados fatores. Tais fatores são: o grau de penetração de GD, a relação com o limite em regime permanente, a influência do tempo de eliminação de faltas nas redes de subtransmissão e a inserção de GD conectada através de conversores eletrônicos (geração eólica – DFIG).

PALAVRAS-CHAVE

Geração Distribuída, Estabilidade Transitória; Desempenho Dinâmico.

1.0 - INTRODUÇÃO

Dentro de um contexto setorial cada vez mais restritivo a geração de energia elétrica por pequenas fontes apresenta-se como uma solução atraente. Projetos anteriormente não viáveis passaram a ser de grande interesse. Novos projetos de inserção de pequenos geradores conectados às redes de subtransmissão e distribuição (ST&D), aproveitando fontes convencionais e também não convencionais surgem não apenas como um complemento possível, mas sim indispensável. Tais projetos contêm as características de sustentabilidade que as sociedades precisam e que alguns governos incentivam.

O conceito de geração distribuída é amplo, podendo consistir desde uma simples pequena central hidrelétrica – PCH conectada a uma barra de subtransmissão até um complexo sistema formado por vários tipos de fontes de geração inseridas numa rede de distribuição com controles de gerenciamento pelo lado da demanda. A pulverização de GD nas redes de distribuição deu origem ao conceito de “Microgrids” ou Micro-Redes. Uma possível definição para Micro-Redes é a inserção de gerações distribuídas operando integradas a um sistema de distribuição de energia, em baixa tensão, conectado ou não a rede de EAT [1]. As tecnologias de conversão por eletrônica de potência e avanços nos sistemas de monitoração, proteção e controle proporcionam que cada vez mais fontes de GD possam ser conectadas nas redes elétricas até mesmo em tensões de 380 V, transformando as redes de distribuição em potenciais Micro-Redes. Porém ainda são muitos os aspectos a serem avaliados e estruturados para que este potencial se transforme em realidade.

Outra perspectiva nos estudos dinâmicos de GD é a disseminação de uma realidade que atualmente se verifica no Brasil: a integração de GD, principalmente PCHs e usinas eólicas nos sistema de subtransmissão e em alimentadores de distribuição, em tensões de 34,5 kV, 69 kV e 138 kV. Esta tendência se deve ao fato de que estes aproveitamentos, a exemplo dos grandes potenciais hidráulicos, encontram-se também distantes dos centros de carga. Portanto, os empreendedores buscam as redes mais próximas dos pequenos aproveitamentos que geralmente são alimentadores da distribuição em 34,5 kV ou 23 kV ou redes de subtransmissão de distribuidoras ou transmissoras em 69 kV e 138 kV. A viabilidade de utilização destas redes para transmitir GD, geralmente

(*) Rua Tenente Silveira, n° 94 – 2° andar – CEP 88.010-300 Florianópolis, SC, – Brasil

Tel: (+55 48) 2107-0397 – Fax: (+55 48) 2107-0558 – Email: guilherme.martins@engevix.com.br

circuitos radiais que foram concebidos para atender cargas relativamente baixas deverá ser avaliada inclusive sob ponto de vista da dinâmica dos pontos de operações possíveis. Deve-se considerar também que nem sempre estas redes estão providas de sistemas de proteção e controle adequados para receber gerações mesmo se respeitando a ampacidade deste circuito. Assim a avaliação nestes casos deve ser principalmente em relação a limites operativos de inserção de GD tendo em vista o desempenho elétrico da rede.

2.0 - DINÂMICA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Historicamente a análise da dinâmica de GD passou a ser relevante, portanto passível de interesse de pesquisas, nas últimas duas décadas. Em [2] tem-se uma importante referência nos estudos de impactos elétricos de GD, cuja metodologia permite observações da influência da GD na dinâmica do sistema de Extra Alta Tensão - EAT e ainda define parâmetros importantes como o conceito de penetração de GD. Considerações a respeito do mesmo assunto podem ser encontradas em [3] e [4], sendo que estes trabalhos diferem em alguns enfoques, principalmente no que tange à formação dos cenários de análise.

Um fator em comum nos citados trabalhos é a avaliação da influência da GD na dinâmica do sistema EAT, principalmente sob aspectos relacionados aos transitórios eletromecânicos, como estabilidade transitória e a pequenos sinais. Neste contexto os autores das citadas publicações estabelecem as análises e conclusões frente a cenários de diferentes graus de penetração de GD e sob outros aspectos relevantes.

Um ponto de extrema importância, comumente explorado, refere-se à natureza da GD. Em [2] utilizam-se na representação da GD pequenas unidades geradoras térmicas movidas a gás. O desempenho dinâmico é comparado em termos das diferenças em relação a situações com e sem controle de excitação de campo (tipo brushless IEEE – AC2A) e variando a inércia das pequenas unidades geradoras. Em [3] os autores trabalham com cinco diferentes tipos de GD. Gerador de indução (tipo gaiola de esquilo), gerador síncrono (não controlado e controlado) e geração integrada à rede através de conversor de eletrônica de potência (não controlado e controlado). O termo controlado refere-se à tensão e frequência. Já em [4] os autores utilizam micro-turbinas térmicas conectadas à rede por ciclo conversores (com controles de potência ativa e reativa) e células combustíveis.

Os diversos estudos mostram como conclusão unânime que existem influências da GD no desempenho dinâmico e que estas são sensíveis ao grau de penetração, localização e ao tipo de equipamento. Na análise da estabilidade transitória feita em [2] constata-se a influência da GD na redução da magnitude da primeira oscilação, em gerador no sistema EAT, frente a uma perturbação. Verifica-se ainda que o caso com controle de excitação de campo apresenta melhor desempenho. Concluiu-se, portanto, que unidades geradoras em áreas com elevado grau de penetração de GD, próxima a cargas, possuem maior capacidade de se manter estáveis frente a perturbações no sistema, devido à redução na abertura angular entre geradores no sistema EAT [4]. Outro fato a considerar, conforme chama atenção [3] é a presença de maior torque sincronizante nas áreas com GD. Tal fato é explicado pela manutenção da excitação no enrolamento de campo do rotor das máquinas síncronas - caso de GD representada por unidades síncronas - durante faltas na rede, fazendo com que a queda de tensão seja menor onde há GD.

A presença de GD, representada por máquinas síncronas, próxima a cargas provoca alterações também no amortecimento conforme conclui [3], que observou respostas mais oscilatórias quando a GD era representada por máquinas síncronas controladas. Análises a pequenos sinais em [2] mostram a influência da GD alertando para a constatação de respostas pouco amortecidas para o caso com controle de excitação estática e a dificuldade na avaliação e ajuste de estruturas de amortecimento – PSS para o contexto avaliado, concordando com [3]. Em [4] os autores identificam dois modos principais de oscilação, um eletromecânico que se torna mais amortecido na medida em que aumenta a penetração de GD e outro modo ligado a regulação das máquinas síncronas do sistema EAT que apresenta fatores menos amortecidos conforme aumento da penetração da GD. Estudo de caso realizado em [5] mostra a influência na estabilidade a pequenos sinais que geradores de pouca inércia conectados em redes fracas podem ter em geradores robustos da rede EAT.

Outro aspecto destacado em [3] e [4] é a influência da GD conectada à rede através de conversores e as alterações no desempenho dinâmico que estas podem provocar. Porém, de maneira geral, espera-se que as mesmas produzam melhores resultados dinâmicos do que em comparação com as máquinas síncronas, pois as mesmas aparecem ao sistema como simples fontes de tensão atrás de uma impedância, portanto sem interação angular. É o caso de unidades eólicas duplamente alimentadas [6].

Quanto ao desempenho dinâmico das tensões, áreas com GD podem apresentar melhor desempenho neste aspecto devido ao suporte de potência reativa que principalmente GD conectada por conversores pode prover. Esta tecnologia tem avançado e atualmente sistemas LVRT (Low Voltage Ride Through) tornam possível a continuidade da operação de unidades geradoras eólicas sob tensões extremamente baixas durante períodos típicos para eliminação de faltas, os quais concernem aos fenômenos eletromecânicos [6]. Estes sistemas trazem maior suportabilidade dinâmica à tensão nas áreas que integram (redes de Subtransmissão e Distribuição - ST&D). Por outro lado, há de se considerar que a redução de geração de grandes unidades em detrimento da inserção de GD pode significar perda de reserva de potência girante e redução da inércia, resultando em maiores desvios de frequência e redução da estabilidade [4], assim como efeitos de unidades síncronas de pouca inércia podem degradar a qualidade do atendimento nas redes de subtransmissão e distribuição [5].

Em relação aos estudos de integração de GD ao sistema, tem-se que em cenários onde existem pequenos geradores, inseridos em meio a grandes cargas do sistema de distribuição, não se espera que estas gerações impactem na estabilidade transitória ou no amortecimento do sistema. Uma vez que sua influência é irrelevante sua modelagem dinâmica pode ser dispensada.

Por outro lado, quando há integração de GD em sistemas de subtransmissão, torna-se necessário avaliar o impacto elétrico destes empreendimentos. Estes estudos ficam a cargo dos acessantes geralmente em relacionamento direto com as distribuidoras, o que pode ocasionar lacunas nas análises de impacto destas gerações, principalmente quanto à influência na rede EAT. No entanto, as instituições do setor elétrico estão cada vez mais se cercado de procedimentos e aperfeiçoamentos dos processos, de maneira a promover a visibilidade destas instalações. No Brasil este relacionamento ocorre no âmbito dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.

No PRODIST, ao contrário dos Procedimentos de Rede - ONS, não estão especificados padrões ou requisitos específicos para estudos dinâmicos. Apenas é mencionado, em relação a este assunto, a necessidade de “...*ajuste dos parâmetros dos sistemas de controle de tensão e de frequência e, para conexões em alta tensão, dos sinais estabilizadores*”. Cita também, que em conexões acima de 69 kV o ONS deverá coordenar o acesso [7].

3.0 - ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso tem o objetivo de avaliar o desempenho dinâmico em uma situação muito observada no sistema brasileiro que é a integração de GD em redes de subtransmissão. Estas redes são tipicamente formadas por linhas de transmissão em tensões de 69 e 138 kV alimentando subestações radiais abaxadoras que suprem cargas pelo interior do país. Algumas destas redes estão em áreas que concentram potenciais de geração capazes de, em alguns cenários, superar os montantes de cargas atendidos invertendo o sentido do fluxo nos transformadores de fronteira com a rede EAT. Pode-se questionar que se há potencial para inserção de GD a ponto de extrapolar a capacidade das redes de subtransmissão, seria possível viabilizar a transmissão através de novas subestações e sistemas coletores. Entretanto nem sempre os pequenos potenciais contam com garantias de construção ou cronogramas comuns, trazendo incertezas na necessidade da expansão da transmissão. O aproveitamento da infraestrutura existente pode melhorar a confiabilidade das redes evitando obras e impactos ambientais desnecessários contribuindo para a preservação do meio-ambiente e redução de custos.

Na prática, observa-se que situações de carga leve e mínima associadas a valores nominais de GD constituem um dos típicos cenários de restrição ao uso de algumas redes, podendo inviabilizar a inserção de novas pequenas gerações no sistema. Os fatores de restrição são geralmente a capacidade de transmissão em regime permanente da linha de transmissão, do transformador de fronteira ou variações de tensão decorrentes de desconexão de blocos de GD. Como desdobramentos dos objetivos do estudo pretende-se avaliar o desempenho dinâmico nestas redes, quando as mesmas tendem a este limite em regime permanente - RP. Além disto, objetiva-se verificar a ocorrência de limitações dinâmicas avaliando o quão próximo este limite está do limite em RP e a sensibilidade deste ao grau de penetração, ao tipo de GD e fatores da rede, como tempo de eliminação de falta.

3.1 - Modelagem do sistema elétrico

Na Figura 1 consta o sistema teste em análise e as principais características das unidades geradoras padrão (PCH e eólica), e usinas conectadas na rede EAT.

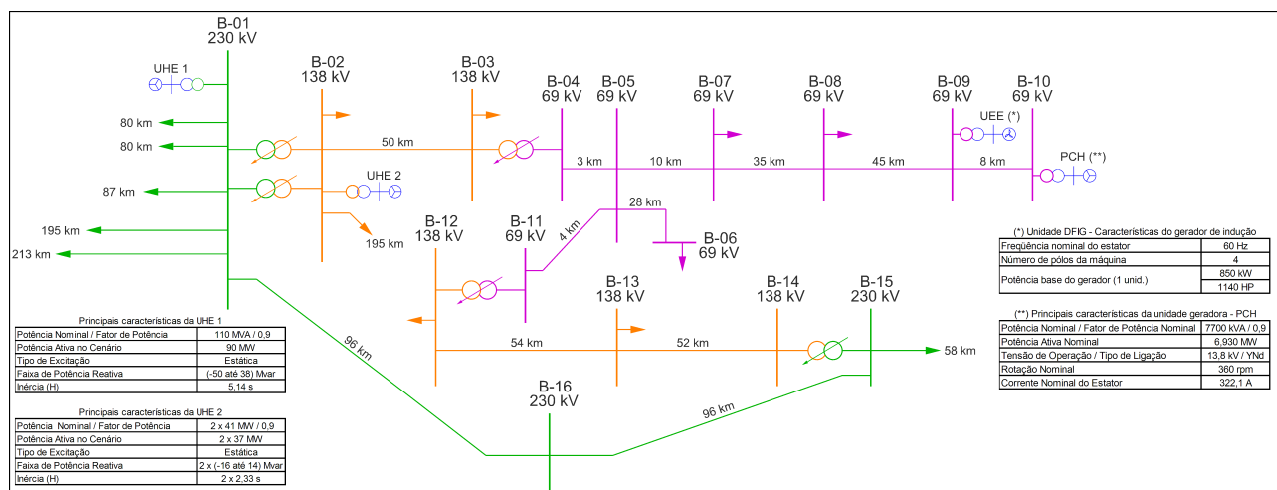


Figura 1 Diagrama esquemático do sistema teste

Na Tabela 1 constam os parâmetros elétricos da rede. Os modelos dinâmicos e de saturação de máquinas síncronas, reguladores e demais elementos do sistema são os da base de dados divulgada em Junho de 2009 pelo ONS. As unidades geradoras que não possuem dinâmica representada são convertidas em injeção de potência

elétrica constante. A dinâmica das cargas também é modelada (corrente constante, potência constante ou impedância constante) através de polinômio de acordo com as recomendações do ONS.

Tabela 1 - Características elétricas do sistema enfatizado no estudo de caso.

Barra	Tensão (kV)	Carga MVA	Nível CC Trifásico	Tipo	Origem	Destino	R (%)	X (%)	Line Charge	Limite (MVA)
B-01	230	-	4424 MVA	Trafo LTC	B-01	B-02	0,686	4,04	#	2 x 84
B-02	138	6,3+j3,2	2709 MVA	LT 138 kV	B-02	B-03	5,09	12,12	2,79	82
B-03	138	14,6+j1,5	565 MVA	Trafo LTC	B-03	B-04	#	57,63	#	2 X 23
B-04	69	-	213 MVA	LT 69 kV	B-04	B-05	1,41	5,24	0,08	52
B-05	69	-		LT 69 kV	B-05	B-06	15,28	34,36	0,56	52
B-06	69	4,0+j1,0		LT 69 kV	B-05	B-07	7,83	26,17	0,38	75
B-07	69	5,0+j1,0		LT 69 kV	B-07	B-08	14,15	45,69	0,66	48
B-08	69	5,0+j1,0		LT 69 kV	B-08	B-09	11,3	44,77	0,8	90
B-09	69	-		LT 69 kV	B-09	B-10	2,64	8,31	0,12	75
B-10	69	-		LT 69 kV	B-05	B-11	1,41	5,24	0,08	52
B-11	69			Trafo LTC	B-11	B-12	#	57,63	#	1 x 23
B-12	138	5,0-j1,4	425 MVA	LT 138 kV	B-12	B-13	3,76	13,97	3,31	137
B-13	138	5,0+j8,0	326 MVA	LT 138 kV	B-13	B-14	3,81	14,15	3,35	137
B-14	138		1680 MVA	Trafo LTC	B-14	B-15	#	6,12	#	1 x 150
B-15	230		2388 MVA	LT 230 kV	B-15	B-16	1,688	8,864	17	239
B-16	230		2322 MVA	LT 230 kV	B-16	B-01	1,83	9,15	16,41	210

3.2 - Modelagem das gerações distribuídas

O modelo dinâmico do gerador é o da máquina síncrona de pólos salientes com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores sendo um no eixo direto, outro no eixo em quadratura [8] e parâmetros conforme a Tabela 2. Na representação do sistema de regulação de tensão da PCH utiliza-se controlador do tipo PID. Este regulador controla um sistema de excitação tipo PMG Brushless. Considerações a respeito do funcionamento de regulador digital aplicado a excitatriz PMG Brushless podem ser encontradas em [11].

Tabela 2 – Parâmetros da unidade geradora padrão - PCH

Sigla	Parâmetro Máquina Síncrona	Valor
$L_d^{(1)}$	Reatância Síncrona de Eixo Direto	115,30%
$L_q^{(1)}$	Reatância Síncrona de Eixo em Quadratura	79,90%
$L_d^{(1)}$	Reatância Transitória de Eixo Direto	34,30%
$L_d^{(1)}$	Reatância Subtransitória de Eixo Direto	28,10%
T'_{do}	Cte de Tempo Transitória de Eixo Direto em circuito aberto	2,78 s
T''_{do}	Cte de Tempo Subtransitória de Eixo Direto em circuito aberto	0,020 s
T''_{qo}	Cte de Tempo Subtransitória de Eixo em Quadratura em circuito aberto	0,04 s
H	Cte de Inércia	1,36 s

Para representação da turbina hidráulica e sistema de regulação de velocidade assume-se um conduto forçado rígido e a água um fluido incompressível.

Para estas premissas, Kundur [9] apresenta as equações hidráulicas tendo em vista a obtenção de um modelo não-linear para a turbina. Este modelo é adequado para estudos envolvendo significativas variações de potência e frequência no sistema hidráulico [10]. O sistema de regulação de velocidade da PCH é composto por regulador eletrônico com controle tipo PID.

Representam-se as unidades eólicas por máquinas de indução de dupla alimentação – DFIG. Nesta tecnologia o rotor do gerador é bobinado e alimentado por um conversor trifásico na frequência correspondente ao escorregamento do rotor, possibilitando, na faixa de operação do escorregamento, utilizar a potência elétrica gerada no rotor [12] e [13]. O modelo dinâmico é o desenvolvido pelo CEPEL [8].

De maneira análoga aos casos com as PCHs, a variação na geração eólica será em múltiplos da unidade geradora apresentada. As curvas de desempenho das unidades eólicas podem ser encontradas em [8].

3.3 - Metodologia

Um dos principais fatores de controle é o grau de penetração da GD que é definido como sendo a relação entre a potência injetada pelas GDs (P_G) e a soma entre esta geração e a carga (P_L) na área de ST&D.

Desta maneira inserem-se unidades geradoras padrão, originando os cenários de análise. Ressalta-se que estes estão divididos em “Cenários Normais - Tabela 3” com apenas inserção de GD tipo PCH e “Cenários Alternativos - Tabela 4” onde a inserção de GD é mista (PCH e Eólica).

Tabela 3 – Cenários Normais

Cenário	GD (MW) PCH	Grau de Penetração
1	7	17%
2	14	29%
3	21	38%
4	28	45%
5	35	51%
6	42	55%

Tabela 4 – Cenários Alternativos

Cenário	PCH (MW)	EOL (MW)	EOL/Total	Total GD (MW)	Penetração
4 ALT	15	13	46%	28	45%
5 ALT	19	16	46%	35	51%
6 ALT	23	19	45%	42	55%

A avaliação dinâmica será em termos da estabilidade transitória, ou seja, a habilidade do sistema em permanecer em sincronia após ocorrência de uma perturbação severa [14]. No caso, a perturbação será um curto-circuito monofásico na B-05 eliminado pela abertura da LT que interliga a B-05 até a B-11, em determinado tempo de eliminação de falta.

O desempenho dinâmico será avaliado de acordo com o grau de penetração de GD, sob duas linhas de raciocínio descritas em 3.3.1 e 3.3.2.

3.3.1 - Limite de inserção de GD (regime permanente).

Em RP, o limite para inserção de GD é a perda da LT 69 kV que interliga a B-05 até B-11. O fator limitante é o carregamento no transformador 138/69 kV entre a B-03 e B-04. A ideia é verificar se o limite de geração avaliado em regime permanente é igual ao limite imposto pela dinâmica do sistema. E, ainda, se uma ação para aumentar este limite em RP é eficaz no que se refere à dinâmica.

3.3.2 - Tempo de Eliminação de Falta

Outra linha de raciocínio é o tempo de eliminação de falta T_{EF} que poderá ser determinante para estabilidade do sistema. Este fator depende principalmente do sistema de proteção. O ONS [15] determina tempos típicos de eliminação de falta. Para redes de 69 kV sem tele proteção este tempo é de 800 ms. Para sistemas tele protegidos, mesmo em 69 kV tem-se que o T_{EF} é de cerca de 150 ms.

3.4 – Simulações

Para efeito de comparação, determina-se o limite em regime permanente para inserção de GD. O mesmo ocorre na abertura da LT entre B-05 e B-11 provocando sobrecarga no transformador entre B-03 e B-04. Portanto, constata-se que o cenário 6 (42 MW de GD – PCH) é o cenário limite de integração de GD em regime permanente provocando sobrecarga de 12% no transformador.

No âmbito da dinâmica, inicia-se a simulação com $T_{EF} = 800$ ms e constata-se a perda de sincronismo das unidades geradoras da PCH já no cenário 4 (28 MW GD - PCH). Além disto, os 28 MW de GD no cenário 4, associados ao $T_{EF} = 800$ ms provocam quedas de tensão inadmissíveis ao longo do sistema 69 kV. Sendo assim tanto para a PCH quanto para rede de distribuição, o limite dinâmico de GD é de pouco mais de 21 MW, cerca de 50 % inferior ao limite em RP. Adicionalmente testou-se a colocação de outro transformador em paralelo (entre B-04 e B-05). Esta ação seria eficaz no aumento do limite em RP, porém, mostrou-se ineficaz no aspecto dinâmico.

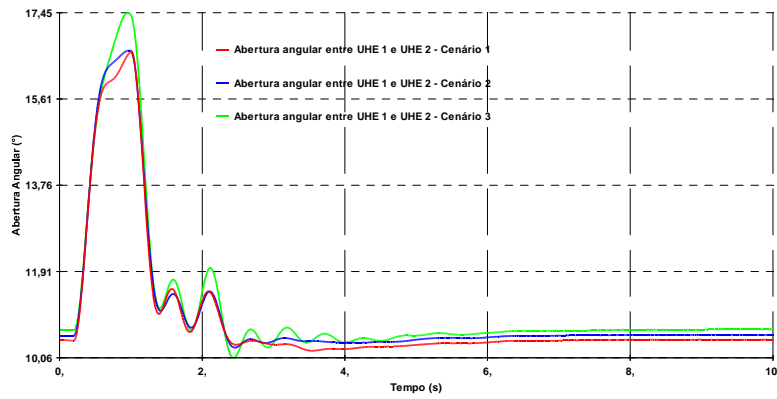


Figura 2 - Abertura angular entre UHE 2 (138 kV) e UHE 1 (230 kV) para os cenários 1, 2 e 3 e $T_{EF} = 800$ ms.

A Figura 2 mostra a abertura angular entre as UHEs 1 e 2 conectadas na rede EAT. Observa-se que o aumento do grau de penetração degrada o desempenho dinâmico de geradores conectados na rede EAT próxima à região onde se localizam as GDs. O fenômeno ocorre tanto na magnitude da abertura angular inicial entre os geradores, quanto nas oscilações.

Em relação ao sistema ST&D, a conclusão é similar à do sistema de EAT, onde se observa que o aumento da GD degrada a dinâmica do sistema de maneira ainda mais evidente, conforme se observa na Figura 3.

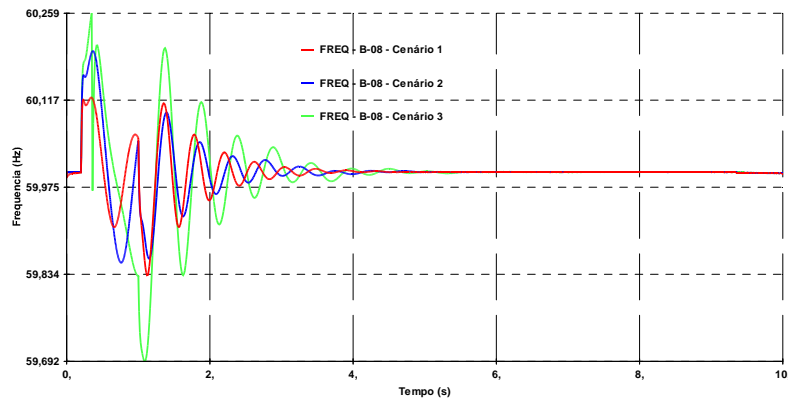


Figura 3 - Desempenho das frequências B-08 (sistema subtransmissão 69 kV) – Cenários 1, 2 e 3 - $T_{EF} = 800$ ms.

O mesmo evento é agora simulado com $T_{EF} = 150$ ms. O sistema mostra-se estável, conforme a Figura 4, denotando que o limite dinâmico com $T_{EF} = 150$ ms (tempo típico de sistema tele protegidos) é, na prática, igual ao limite em regime permanente.

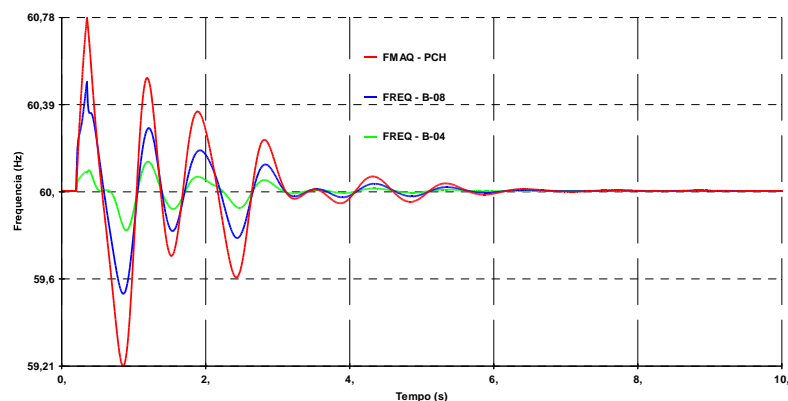


Figura 4 - Frequência nas B-04, B-08 e PCH – Cenário 6- $T_{EF} = 150$ ms.

Avalia-se, agora, o desempenho do sistema novamente com $T_{EF} = 800$ ms, porém, com inserção de geração eólica. O sistema mostra-se estável, de acordo com a Figura 5, evidenciando a melhoria na dinâmica do sistema resultado da integração da usina eólica.

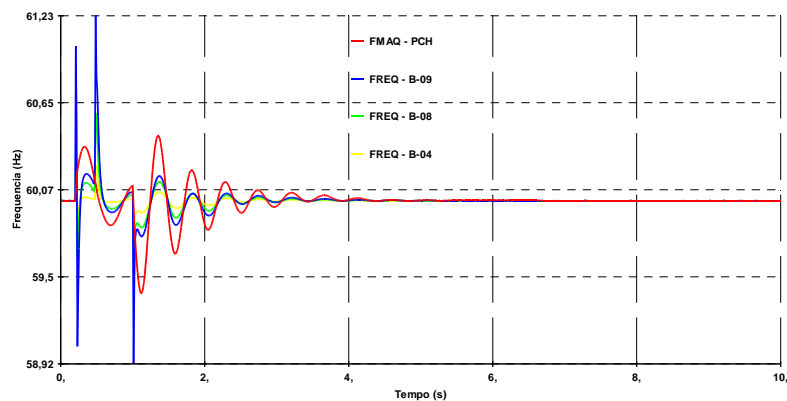


Figura 5 - Desempenho da frequência nas B-04, B-08, B-09 e PCH– cenário 4 ALT – $T_{EF} = 800$ ms

Na Figura 6 consta a avaliação comparativa, por cenário de integração de GD. Constata-se que os efeitos no aumento do grau de penetração da GD são similares aos analisados anteriormente, ou seja, que o aumento da GD reduz a margem de estabilidade transitória e tende a degradar o desempenho na rede de subtransmissão.

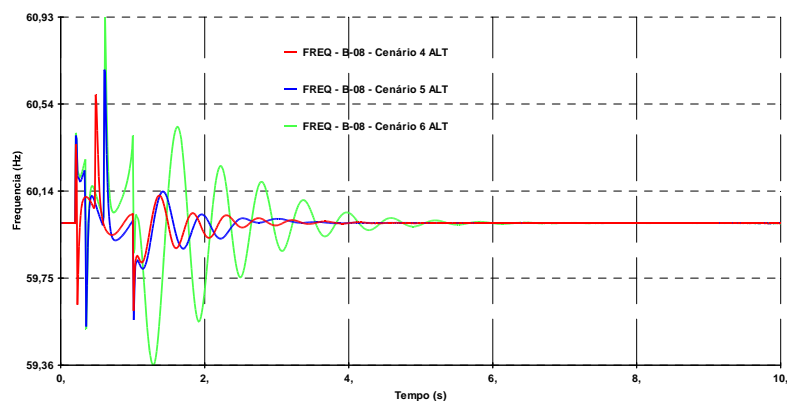


Figura 6 - Frequência na B-08 cenários 4, 5 e 6 ALT para $T_{EF}=800$ ms.

4.0 - CONCLUSÃO

As análises levam a crer que o limite de integração de GD em redes de subtransmissão sem tele proteção imposto por fatores dinâmicos, é mais restritivo em relação ao limite em regime permanente. A ação eficaz na resolução do problema em RP (instalação de outro transformador em paralelo), não é eficaz em relação à limitação dinâmica. Para evitar a restrição dinâmica a ação mais eficaz é a redução do tempo de eliminação da falta, o qual poderia ser alcançado com uso de teleproteção. Observa-se também que a inserção de geração eólica em montantes de cerca de 45% do total da GD, mesmo com tempo de eliminação da falta de 800 ms, torna o sistema estável. Este resultado deve-se em grande parte ao desempenho dos conversores que conectam os aerogeradores ao sistema.

Estas conclusões são relevantes quando se analisa a viabilidade de pontos de conexão para GD. Ocorre que normalmente, o fator restritivo em regime permanente é mais rapidamente calculável e, conhecendo-se fatores que aproximam estes dois limites, é possível reduzir as incertezas referentes ao desempenho dinâmico.

Quanto ao desempenho dinâmico em geral observa-se influência quanto ao grau de penetração e tipo de GD que compõem o sistema, concordando com as conclusões primordiais sobre o assunto [2] – [4].

Na avaliação do estudo de caso, a conclusão é que o aumento do grau de penetração da GD no sistema teste aumenta a abertura angular transitória entre unidades geradoras no sistema EAT (entre as UHE 1 e UHE 2) reduzindo a margem de estabilidade transitória do sistema.

A conclusão mais comumente encontrada na literatura referente ao tema é a de que o aumento da penetração de GD aumenta a margem de estabilidade transitória. Porém, nestes trabalhos, a GD não passa por linha de

transmissão até chegar às cargas [16] e o incremento da GD ou supre novas cargas mantendo a rede EAT inalterada ou reduz o fluxo da rede EAT que flui em direção à rede ST&D.

Portanto, no caso estudado, provavelmente a topologia do sistema ST&D (alta impedância entre a GD e as cargas do sistema ST&D) influencia reduzindo o torque sincronizante provido pelas unidades geradoras da PCH. O efeito da alta impedância na degradação da dinâmica de áreas com GD também é apontado em [17], onde o autor considera que esta condição, muito provavelmente, provoca um efeito “desestabilizante” na resposta a distúrbios como consequência do deslocamento de fase entre a GD e o sistema EAT.

Portanto fica a impressão de que o conceito de GD integrada em redes de subtransmissão apresenta maior afinidade com os estudos dinâmicos clássicos. Nas micro – redes em condições onde a GD é integrada próxima às cargas, o aumento da penetração de GD melhora o desempenho dinâmico. Porém quando a GD se distancia das cargas, concentrando-se e passando por redes de subtransmissão, o aumento da penetração degrada o desempenho. Esta conclusão ilustra as variações possíveis na análise da dinâmica de GD nos estudos de integração ao sistema elétrico.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) F. D. Kanellos, A. I. Tsouchnikas, N. D. Hatziaargyriou, Micro-Grid Simulation during Grid-Connected and Islanded Modes of Operation, International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
- (2) Donnelly M. K, Dagle J. E, Trudnowski D. J, Rogers G. J, Impacts of the Distributed Utility on Transmission System Stability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11, n², May de 1996, pages 741 – 746.
- (3) J. G. Slootweg and W. L. Kling, “Impacts of distributed generation on power system transient stability”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, Vol. 2, 21-25 June de 2002, 862 - 867 Vol.2.
- (4) Ahmed M. Azmy, István Erlich, Impact of Distributed Generation on the Stability of Electrical Power Systems, IEEE [Power Engineering Society General Meeting, 12-16 June de 2005](#), 1056 - 1063 Vol. 2.
- (5) F. V. Edwards, G. J. W. Dudgeon, J. R. McDonald and W. E. Leithead, “Dynamics of distribution networks with distributed generation”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, Volume: 2, 16-20 July 2000, Pages:1032 - 1037 vol. 2.
- (6) [Piwko R.](#), [Miller N.](#), [Sanchez-Gasca J.](#), [Yuan X.](#), [Dai R.](#), [Lyons J.](#), Integrating Large Wind Farms into Weak Power Grids with Long Transmission Lines, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International, Shanghai. 14-16 August, 2006.
- (7) Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição – PRODIST, Módulo 3 – Acesso aos Sistemas de Distribuição, Revisão 1, Janeiro de 2010.
- (8) Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANAREDE, Versão 10.04.06, Setembro de 2009.
- (9) P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw- Hill, 1994.
- (10) IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Dynamic Studies," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.1, February, 1992, pp. 167-179.
- (11) A. Godhwani, M. J. Basler, A Digital Excitation Control System for Use on Brushless Excited Synchronous Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, September 1996.
- (12) Rangel R. D., Ferraz J. C. R., Gomes Jr S., Henriques R. M, Modelagem de Geração Eólica em Programas de Fluxo de Potência e de Análise de Estabilidade Eletromecânica, SNPTEE, Outubro de 2005, Curitiba – PR.
- (13) J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, “General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 144–151, February 2003.
- (14) IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability, IEEE Transactions On Power Systems. Vol 19, n. 2, May 2004.
- (15) Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Procedimentos de Rede, Submódulo 3.6, Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão à Rede Básica, Revisão 1.0, Junho de 2009.
- (16) Boemer J.C., Gibescu M., Kling W. L., Dynamic Models for Transient Stability Analysis of Transmission and Distribution Systems with Distributed Generation: an overview, IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th – July 2nd, Bucharest, Romania, 2009.
- (17) Guttromson, R. T., Modeling Distributed Energy Resource Dynamics on the Transmission System. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 17, NO. 4, NOVEMBER 2002.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Guilherme Miranda Martins

Nascido em São Paulo – SP em 22/07/1977

Graduado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - 2004;

Especialista em sistemas de energia elétrica – UFSC 2010

Trabalha desde 2003 no setor elétrico tendo iniciado a carreira no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Desde 2007 desenvolve estudos elétricos de sistema para Engevix Engenharia. Neste período realizou diversos estudos de planejamento, operação e integração ao sistema de empreendimentos de geração e transmissão.