



XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

Impacto da Geração Distribuída no Sistema Elétrico de Distribuição da Concessionária, Considerando-se Geração com Gás Natural, Biomassa e Eólica

Giovani Bertarello	Danusia Lima	Flávio Ampessan
RGE	RGE	RGE
gbertarello@rge-rs.com.br	dlima@rge-rs.com.br	fampessan@rge-rs.com.br

Cássio F. B. Nonenmacher	José. A. B. Falleiros	Waldyr Maurício
RGE	UPM	UPM
cnonenmacher@rge-rs.com.br	jabfalleiros@uol.com.br	waldyrmauricio@terra.com.br

Palavras-chave

Energias Renováveis

Fontes Alternativas

Geração Distribuída

Modelagem de Geração Distribuída

Simulações Dinâmicas

Resumo

Neste artigo são analisadas as conexões de unidades de GD - Geração Distribuída em alimentadores da rede da concessionária RGE - Rio Grande Energia. Foram estudadas as diferentes formas de produção de energia elétrica através de fontes renováveis: gás natural, biomassa (geração térmica) e eólica com simulações na plataforma computacional MatLab®. Foram desenvolvidos sistemas de controle para as turbinas e uma modelagem da rede simplificados a fim de adaptá-los aos modelos do software MatLab®. Os parâmetros utilizados na modelagem foram obtidos de fabricantes e através de ensaios de campo. Foram simuladas situações de regime permanente, alívio de carga, curto-circuito e ilhamento. Os resultados obtidos deverão servir de subsídio para a análise de pedidos de conexão de unidades de GD na rede da concessionária RGE.

1 - Introdução

O projeto descrito neste artigo é uma continuação do trabalho que já lançou as bases gerais para estudos destinados à análise de pedidos de acesso de PCH's - Pequenas Centrais Hidrelétricas a redes de distribuição da RGE [1]. Surgiu a necessidade de ampliar o estudo para unidades de geração distribuída com outras fontes, principalmente eólica, biomassa e gás natural. Já existem unidades eólicas implantadas no Estado do Rio Grande do Sul, como o parque eólico de Osório [2] e a implantação de outras unidades encontra-se em fase de estudos e com solicitação de acesso na concessionária.

A pesquisa foi iniciada por uma revisão da literatura técnica para análise dos modelos existentes e para definir o estudo do comportamento dinâmico da rede. A partir deste estudo, foram definidos modelos de turbinas e sistemas de controle para cada tipo de geração: térmica, a gás e eólica, com parâmetros típicos.

Visando obter embasamento mais completo para a modelagem adotada e respectivos parâmetros, os ajustes para as variáveis das turbinas e dos geradores foram feitos com dados reais fornecidos por fabricantes, neste caso a TGM e a WEG, recorrendo-se inclusive a ensaios em campo, como recurso adicional para aferição de valores. Dos ensaios de comissionamento de uma usina térmica (BIOPAV do grupo EQUIPAV de Birigui), foram obtidas todas as informações sobre os parâmetros do sistema de controle da turbina (da excitatriz, do regulador de velocidade e de tensão) e do gerador, a respeito da unidade ensaiada.

A rede da RGE foi modelada em locais de prováveis pedidos de conexão, efetuando-se em seguida simulações, sempre com objetivo final de prover o corpo técnico da concessionária de recursos necessários à análise dos pedidos de acesso, tendo como base as informações tanto do acessante quanto da rede elétrica.

Através de uma análise de partes do sistema elétrico real da RGE, constituída de alimentadores de 23 kV, foi verificado o efeito da conexão das várias formas de geração já mencionadas, utilizando-se nas simulações os modelos matemáticos desenvolvidos e os parâmetros reais das unidades geradoras.

As simulações foram feitas em regime permanente e transitório, com foco principal no comportamento dinâmico dos geradores quando submetidos a pequenas perturbações (ex.: rejeição de carga) e a impactos de maior vulto: curto-circuito e ilhamento.

2 - Modelagem Matemática do Sistema

2.1 – Geradores

Para os geradores síncronos, foi adotada a modelagem normatizada pelo IEEE (modelo 4) [3], e baseada na transformada de Park. São dois tipos de geradores: o de pólos salientes para geração eólica e o de rotor liso para geração a gás e térmica.

Quanto ao gerador assíncrono, uma das opções da geração eólica, o modelo também é clássico e assim como no caso do síncrono foi utilizada a modelagem já disponível no MatLab®.

2.2 - Turbinas – Sistema Motor Primário e Controle de Velocidade

2.2.1 - Geração a Gás

O modelo utilizado nos estudos inclui estatismo e controle de velocidade, a modelagem da válvula e da bomba de combustível, bem como da turbina propriamente dita. Estes modelos são representados por funções de transferência, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 1.

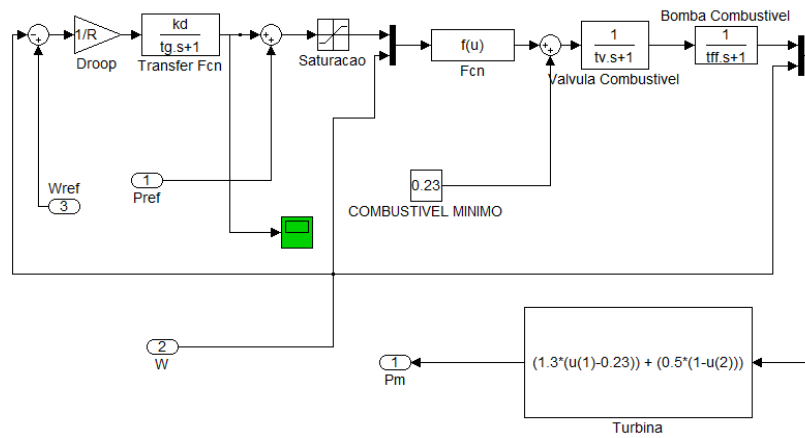


Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de controle na geração a gás

2.2.2 - Geração Térmica Utilizando Biomassa

Neste caso, o modelo do grupo gerador foi adaptado do modelo do Kundur [4] e apresenta módulos simples, sem o estágio de controle de temperatura. O modelo adotado é mostrado na Figura 2.

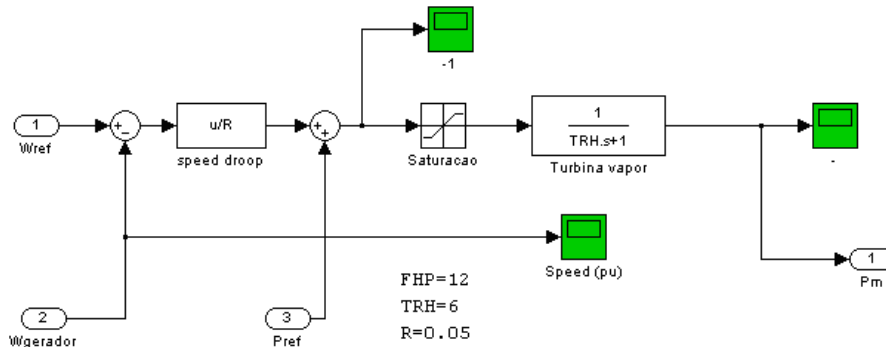


Figura 2 – Geração térmica (biomassa) – Diagrama de blocos do sistema de controle

2.2.3 - Geração Eólica

Foi utilizado o modelo existente na plataforma do MatLab®/ Simulink®, descrito na Figura 3, o qual foi adaptado de forma a compatibilizá-lo com a rede estudada. A modelagem consiste de um sistema de equações que representam a relação da velocidade do vento com a potência mecânica fornecida ao gerador e o controle do pitch.

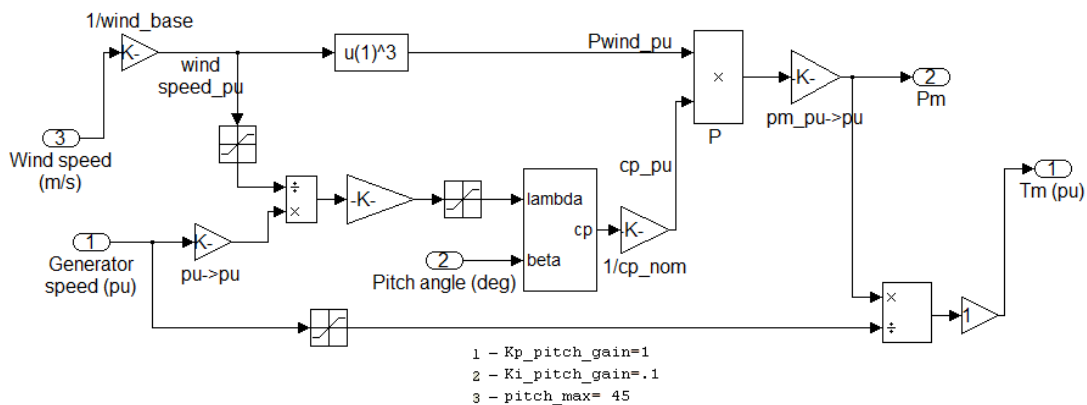


Figura 3 – Geração eólica – Diagrama de blocos do modelo da turbina

2.4 - Sistema de Excitação

Considerando-se o fato de existir grande variedade de tipos de sistema de excitação, desde os rotativos até os de estado sólido, neste projeto optou-se pela adoção de uma modelagem representada por uma função de transferência equivalente [5, 6]. A particularização para cada caso é feita pela modificação dos parâmetros.

O diagrama de blocos completo, utilizado nas simulações é mostrado na Figura 4.

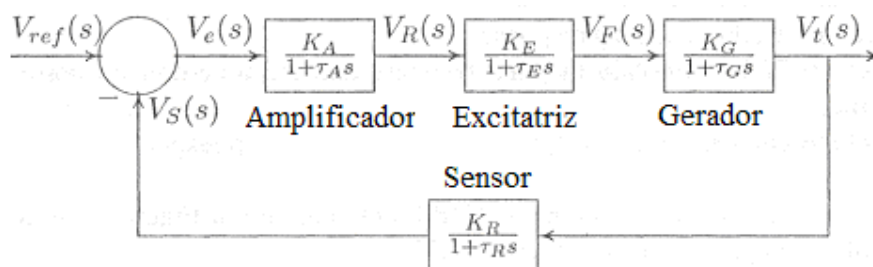


Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema de excitação

Este modelo foi utilizado em todos os tipos de geração estudados, exceto para a geração eólica com gerador assíncrono, já que este não possui sistema de excitação, assim, não tendo nenhuma função de controle de tensão e fornecimento de reativos.

3 - Modelagem Física do Sistema

Os alimentadores escolhidos para as simulações foram: o Cerro Largo 204 (CLA-204) e o Vacaria 201 (VAC-201). Os dados do alimentador Cerro Largo 204, fornecidos pela RGE, são: 23kV; 38 km da SE até a GD e carga total: P=3205 kW e Q=844 kVAr.

Estão representados na Figura 5: a localização da unidade de GD, dois BC - Bancos de Capacitores na cor verde e um RT - Regulador de Tensão na cor laranja, que já estão instalados neste trecho e foram considerados no cálculo do circuito equivalente.

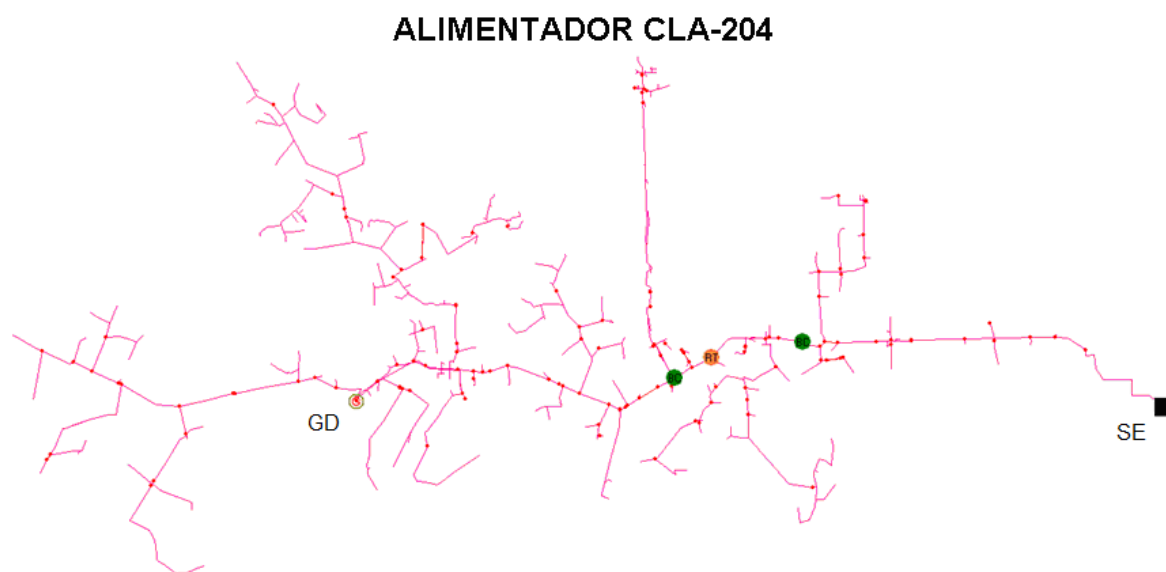


Figura 5 – Circuito alimentador Cerro Largo 204

A rede elétrica descrita na Figura 6 foi esquematizada como um circuito elétrico, onde a carga total foi dividida em 6 barramentos.

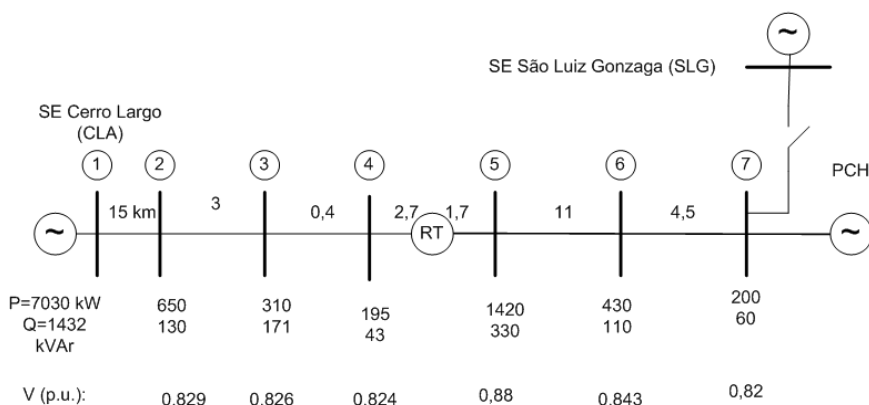


Figura 6 – Distribuição de carga do alimentador CLA-204 - "viga elétrica"

Para simplificar a modelagem do alimentador no MatLab®, foi feita uma redução do circuito dando origem, de acordo com a Figura 7.

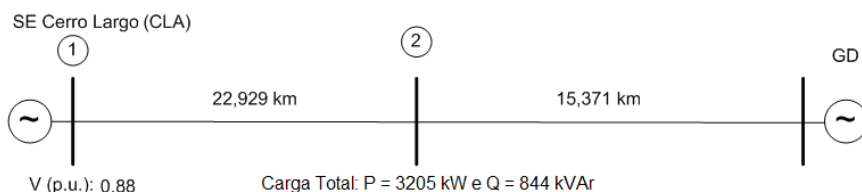


Figura 7 – Diagrama unifilar simplificado de CLA-204

Em todas as simulações efetuadas foram adotados os esquemas simplificados, representados nas Figuras 8 e 12, com as diferentes unidades de geração distribuída conectadas a alimentadores de 23 kV da RGE. O circuito da Figura 8 representa o diagrama unifilar simplificado do alimentador CLA-204 no Simulink®.

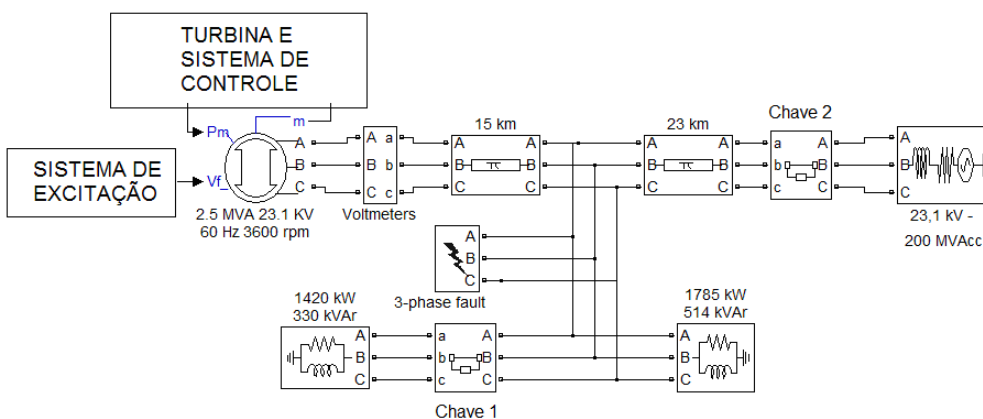


Figura 8 – Circuito equivalente de CLA-204

O circuito alimentador de Vacaria 201 está representado na Figura 9.

Alimentador VAC-201

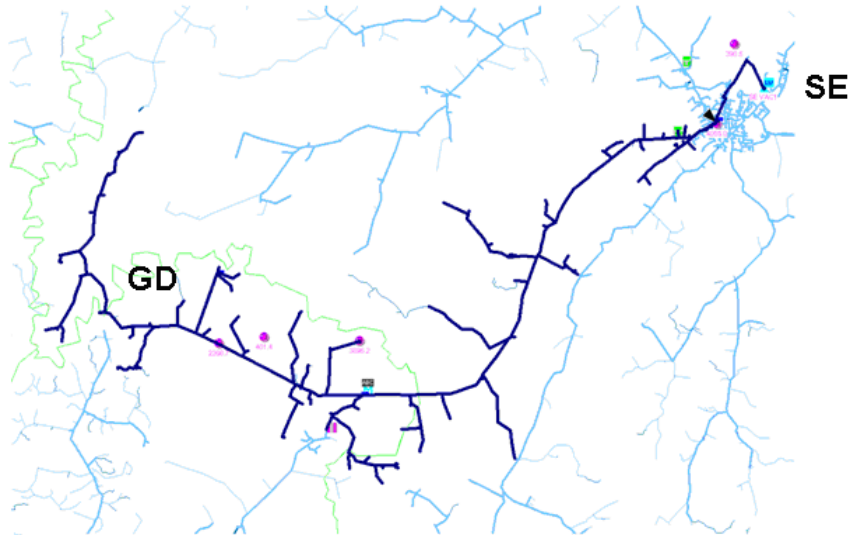


Figura 9 – Circuito alimentador Vacaria 201

As características do alimentador Vacaria 201 são: 23kV; 57 km da SE até a GD e carga total: P=542,79 kW e Q=43,31 kVAr. As cargas estão distribuídas conforme mostrado na Figura 10.

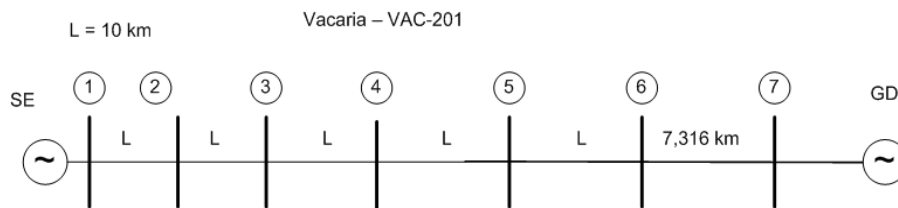


Figura 10 – Distribuição de carga do alimentador VAC-201 – "viga elétrica"

No diagrama unifilar simplificado da Figura 7 e da Figura 11, a barra 2 concentra a carga equivalente de cada alimentador. O circuito demonstrado na Figura 12 representa o desenvolvimento do diagrama unifilar da Figura 11 no Simulink®.

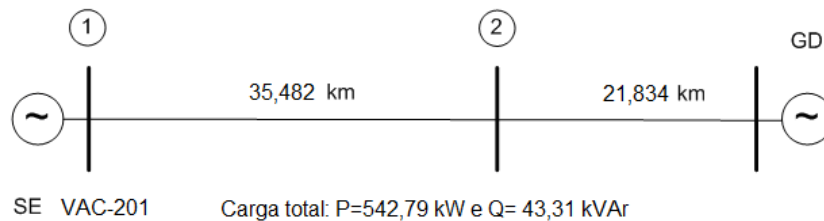


Figura 11 – Diagrama unifilar simplificado de VAC-201

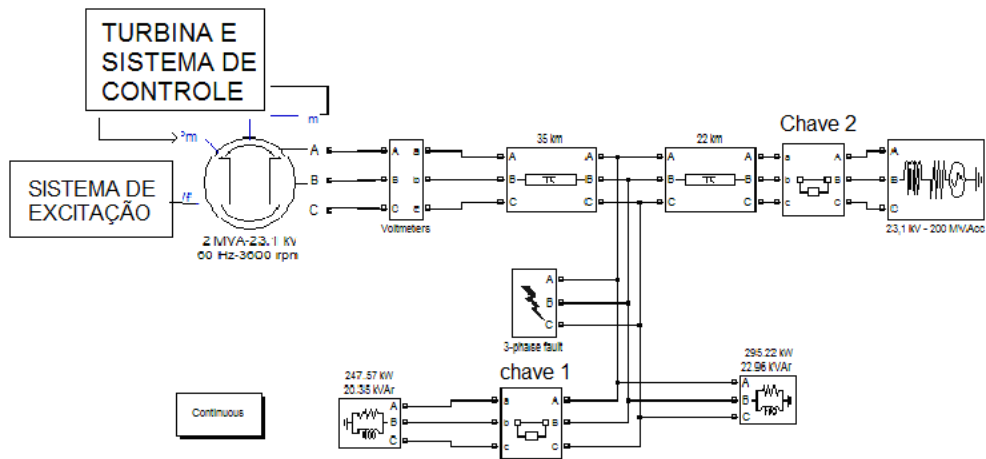


Figura 12 – Circuito equivalente de VAC-201

Baseado no histórico de pedidos de acesso na concessionária RGE, a potência dos geradores foi escolhida para valores menores que 10 MVA.

Também foi simulada a conexão de duas unidades de GD: uma PCH junto com uma unidade eólica, nos dois alimentadores, para se verificar a interação entre duas fontes como mostrado na Figura 13.

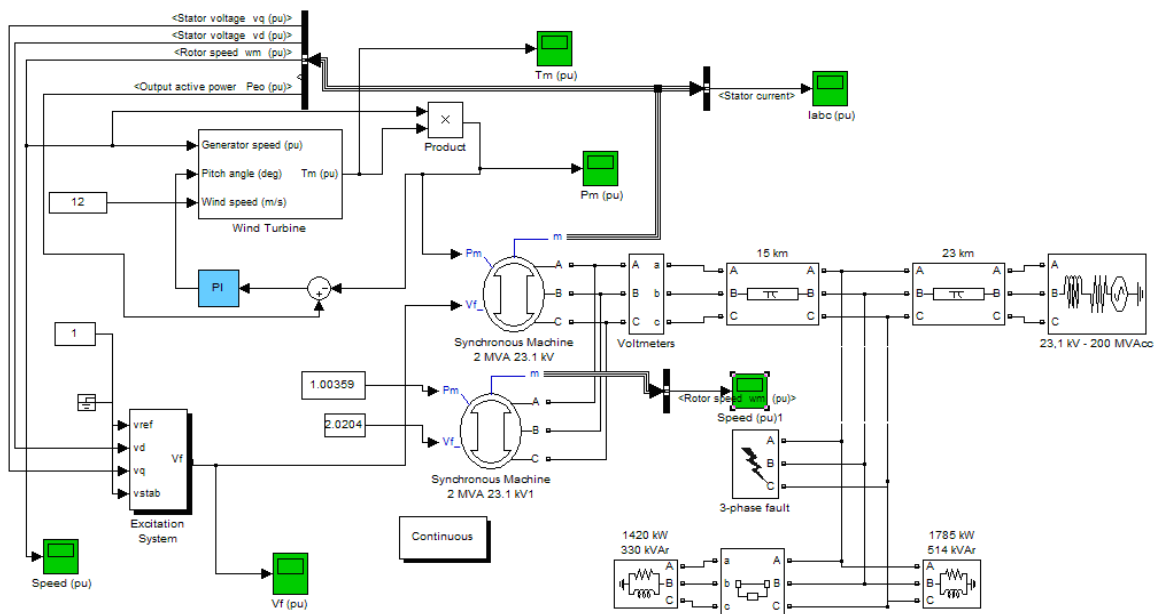


Figura 13 – Circuito equivalente das duas unidades de GD.

4 - Resultados e Análises das Simulações

Foram realizadas diversas simulações em situação de regime permanente, curto-circuito trifásico, alívio de carga e ilhamento para cada modelo estudado.

Neste artigo foram apresentados alguns casos selecionados para análise. As análises completas estão descritas no relatório técnico final do projeto.

4.1 - Resultados em Regime Permanente e Alívio de Carga

Para a análise de regime permanente e alívio de carga estão sendo apresentadas somente as curvas de potência mecânica e velocidade do gerador, resultantes da simulação do modelo térmico de biomassa de CLA-204 e modelo térmico a gás de VAC-201.

Inicialmente foi simulado o regime permanente do modelo térmico no alimentador CLA-204 e no instante de 5 segundos foi feita uma rejeição de carga de 44 %, simulada através da abertura da chave 1 (ver Figura 8), representada nas curvas de variação da potência mecânica e da velocidade do gerador por gráficos visualizados nas Figuras 14 e 15.

Para o alimentador VAC-201 com o modelo a Gás, a rejeição de carga ocorreu no instante de 6 segundos e foi de aproximadamente 45% (Figura 15).

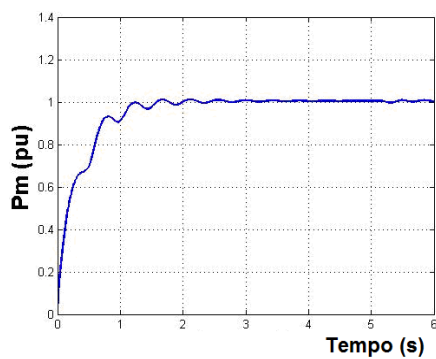


Figura 14 –Variação da potência mecânica em regime permanente e com rejeição de carga da usina térmica conectada no alimentador CLA-204

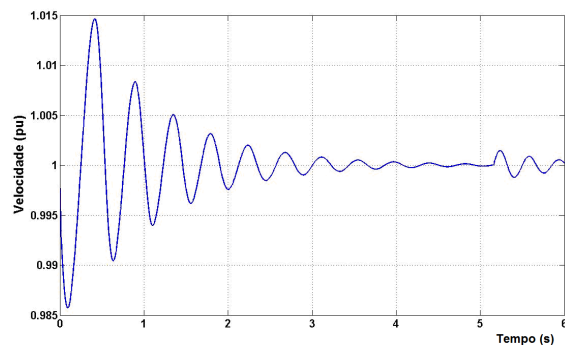


Figura 15 – Variação da velocidade do gerador em regime permanente e com rejeição de carga da usina térmica conectada no alimentador CLA-204

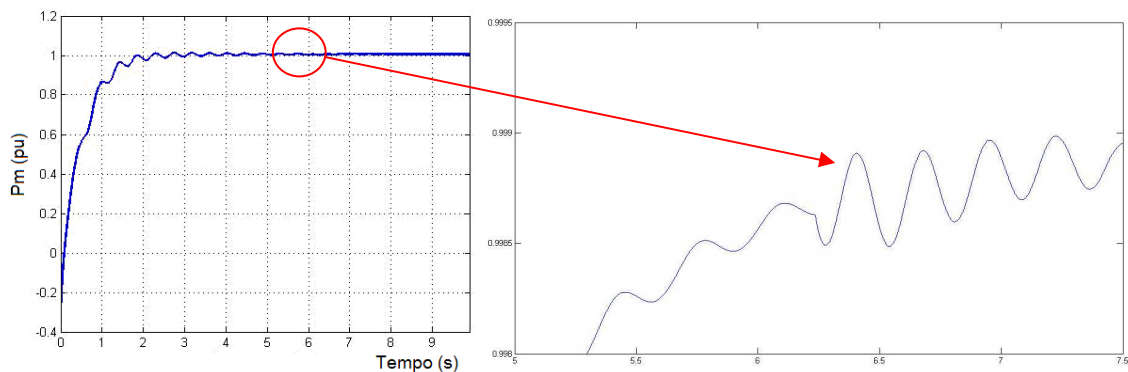


Figura 16 – Variação da potência mecânica com detalhe da oscilação do alívio de carga ampliado. Usina a gás conectada no alimentador VAC-201

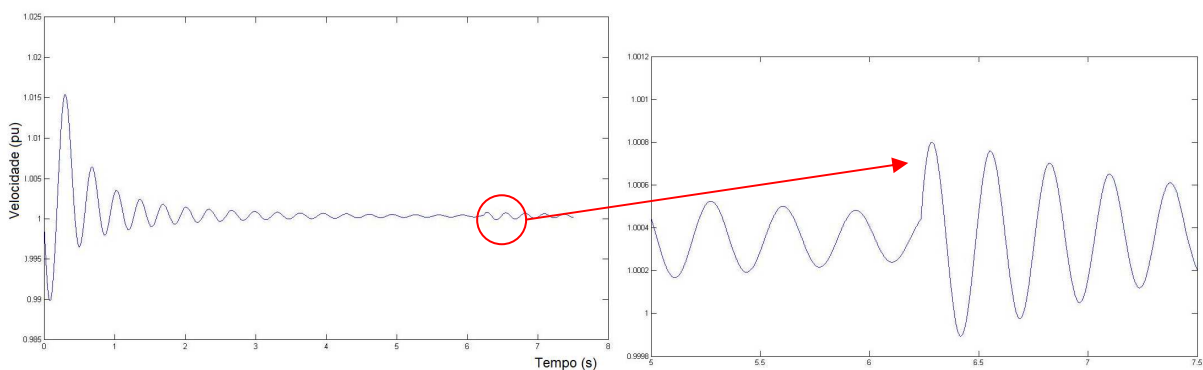


Figura 17 - Variação da velocidade do gerador, com detalhe da oscilação do alívio de carga ampliado. Usina a gás conectada no alimentador VAC-201

4.2 - Resultados da Simulação de Curto-Circuito

Para o estudo de curto-circuito foi simulada a hipótese de ocorrência de um curto-circuito trifásico aplicado no ponto da conexão da carga total concentrada. O curto foi de duração de 0,1 segundos em todas as simulações, o que significa que o curto é temporário, não causando ilhamento.

A título de exemplo estão demonstrados alguns resultados da variação da potência mecânica e da velocidade, pois imediatamente após o curto-circuito os sistemas de controle atuam na velocidade, de modo a manter a potência mecânica o mais estável possível.

No modelo da usina térmica a biomassa conectada no alimentador CLA-204 foi simulado um curto-circuito no instante de 5 segundos após a estabilidade do regime permanente. As oscilações estão representadas nas curvas da potência mecânica e da velocidade ilustradas pelas Figuras 18 e 19.

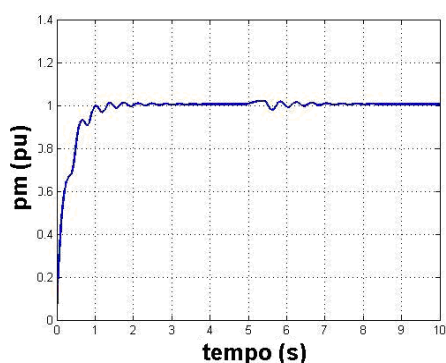


Figura 18 - Resultado da variação da potência mecânica da usina térmica a biomassa conectada no alimentador CLA-204 após o curto-circuito

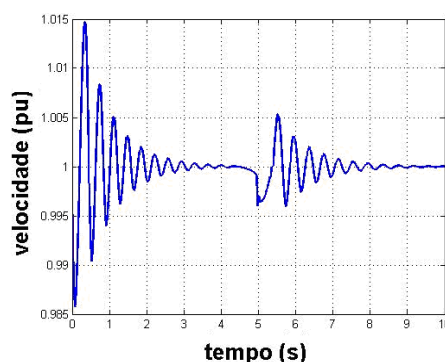


Figura 19 - Resultado da variação da velocidade do gerador da usina térmica a biomassa conectada no alimentador CLA-204 após o curto-circuito

No modelo da usina a gás conectada no alimentador VAC-201 foi simulado um curto-circuito no instante de 2 segundos após a estabilidade do regime permanente. No mesmo alimentador, com o modelo da usina eólica, o curto-circuito foi simulado no instante de 2,5 segundos. As oscilações da velocidade estão representadas nos gráficos das Figuras 20 e 21.

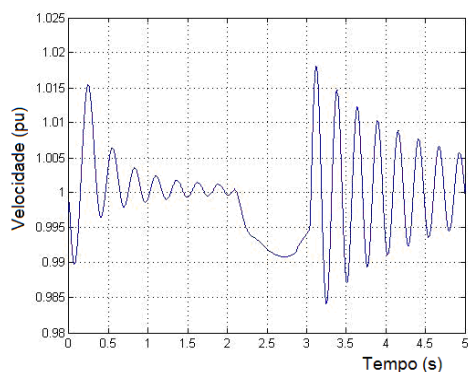


Figura 20 - Resultados da variação de velocidade do gerador do modelo térmico a gás de VAC-201 após o curto-circuito

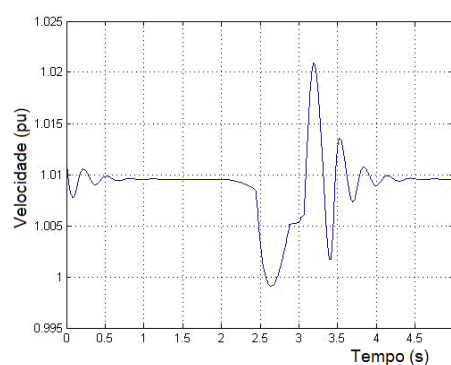


Figura 21 - Resultados da variação de velocidade do modelo eólico assíncrono de VAC-201 após o curto-circuito

No modelo das duas usinas combinadas (eólica e PCH) e conectadas no alimentador CLA-204, foi simulado um curto-circuito no instante de 2 segundos após a estabilidade do regime permanente. As

oscilações da velocidade no gerador eólico e no gerador da PCH estão representadas nos gráficos das Figuras 22 e 23.

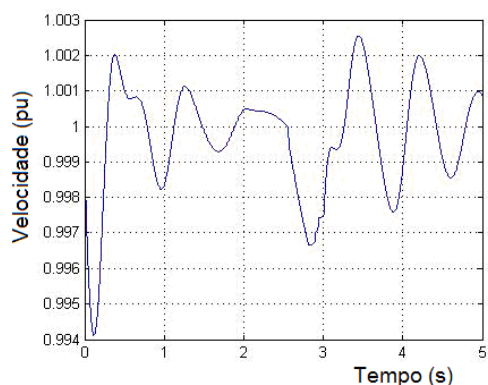


Figura 22 - Resultados da variação de velocidade do gerador eólico do modelo eólico com PCH de CLA-204 após o curto-circuito

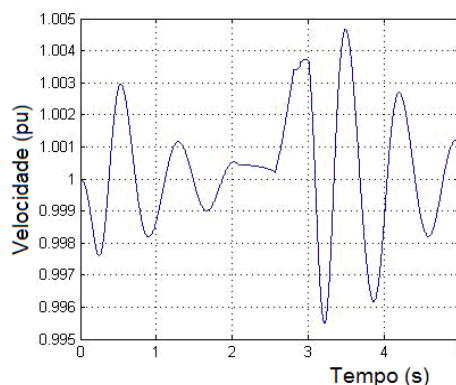


Figura 23 - Resultados da variação de velocidade da PCH no modelo eólico com PCH de CLA-204 após o curto-circuito

Constatou-se nas simulações que o resultado depende não só do tipo de geração e parâmetros adotados, mas também das características da rede. A forma de onda, para o caso de resposta estável, é sempre semelhante nos exemplos mostrados, sendo que a amplitude da oscilação é que varia.

4.3 - Resultados da Simulação de Ilhamento

As simulações de ilhamento confirmaram a sua viabilidade somente quando associado a esquemas automáticos de alívio de carga. Mesmo com a existência de tais esquemas, não se pode garantir o sucesso do ilhamento já que nem sempre o sistema terá capacidade para atingir o equilíbrio necessário à manutenção da estabilidade da geração distribuída após a desconexão da SE – Subestação com o restante do sistema.

O gráfico contido nas Figuras 24 e 25 mostram as curvas de variação da potência mecânica e da velocidade do rotor, resultante de operação de ilhamento combinada com alívio parcial de carga de aproximadamente 45%. Neste caso, está demonstrado que o alívio não foi suficiente e causou a perda de sincronismo.

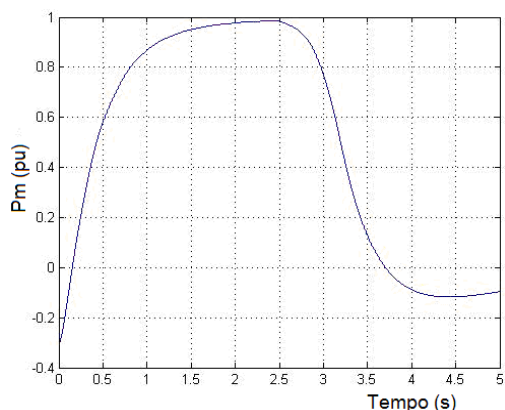


Figura 24 - Resultados da potência mecânica na simulação de ilhamento do modelo térmico a gás de VAC-201 com alívio de carga parcial

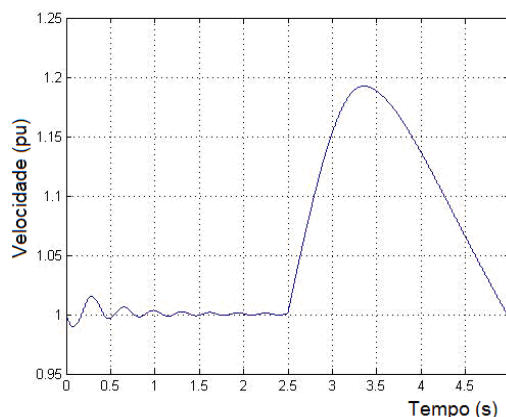


Figura 25 - Resultados da velocidade do gerador na simulação de ilhamento do modelo térmico a gás de VAC-201 com alívio de carga parcial

Apesar de condições de ilhamento não serem previstas pela concessionária, verificou-se a possibilidade da unidade de GD ser capaz de manter a estabilidade no circuito ilhado, desde que a carga seja compatível com a potência da unidade e existam condições de transmissibilidade.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 26 e 27 estão representadas as curvas de potência mecânica e da velocidade do gerador com alívio de carga de 48% no instante de 5 segundos, de valor condizente com a potência nominal do gerador no modelo térmico a biomassa do alimentador CLA-204, que oferece melhores condições de transmissibilidade, mesmo porque o circuito do alimentador VAC-201 é muito longo eletricamente.

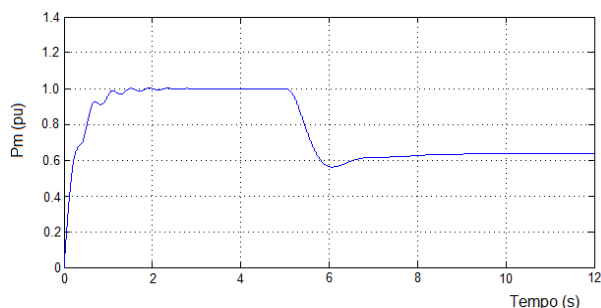


Figura 26 - Curva da potência mecânica do gerador no modelo térmico de biomassa de CLA-204 após o ilhamento

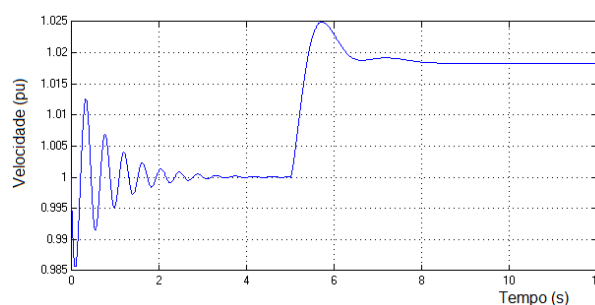


Figura 27 - Curva da velocidade do gerador no modelo térmico de biomassa de CLA-204 após o ilhamento

5 – Conclusões e Considerações Finais

Nos resultados obtidos neste trabalho foi possível observar que alguns alimentadores na RGE podem, num estudo a priori, receber unidades de GD, sem que estas deteriore as condições atuais de funcionamento da rede existente, desde que se obedeçam as condições de transmissibilidade e do controle da potência reativa.

Em análises específicas, com possíveis situações pós distúrbios, poderiam ser formuladas inúmeras hipóteses, das quais pode-se citar a seguinte:

- Caso haja a perda de sincronismo, pode-se recorrer a ajustes nos sistemas de controle. Se não for possível o ajuste, a solução é o desligamento temporário das unidades de GD, seguido de ressincronização das mesmas. Mesmo nesta última hipótese, poderá haver algum ganho em termos de confiabilidade, caso a ocorrência que causou o desligamento do alimentador tenha provocado um impedimento parcial do mesmo por um tempo razoavelmente longo.

Esta e outras situações poderão ser passíveis de serem analisadas, dependendo das características do sistema no qual se fará a conexão das unidades de GD. As condições de sincronização e o sistema de proteção não foram objeto deste estudo. Cabe ressaltar que sempre que o tipo de análise aqui exposto não for suficientemente conclusivo quanto à certeza da viabilidade da aceitação de nova conexão, novos estudos e maior detalhamento e de alteração de projeto, deverão ser solicitados pela Concessionária ao acessante.

6 - Referências bibliográficas

[1] Falleiros, J. A. B. et all; "Impactos da geração Distribuída no Sistema Elétrico de Distribuição da RGE". Caxias do Sul RS. Relatório Técnico P&D, 2008.

[2] Ventos do Sul Energia; Parque Eólico de Osório. Dispo-nível em: <http://www.osorio.rs.gov.br>. Acesso em fev. 2008.

- [3] Working Group on Prime Mover and Energy Supply. "Models for System Dynamic Performance Studies, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models For System Dynamic Studies", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, No. 1, February 1992.
- [4] KUNDUR, P.; *Power System Stability and Control*; Electric Power Research Institute, Power System Engineering Series, McGraw-Hill Inc., 1994
- [5] OGATA, K.; *Engenharia de Controle Moderno*, vol. 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 2003.
- [6] NISE, Norman S. *Engenharia de sistemas de controle*, vol.3. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.