



ANÁLISE DINÂMICA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DA ILHA DO FUNDÃO.

Victor Dutra Ribeiro

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Orientador: PhD. Glauco Nery Taranto

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2011

ANÁLISE DINÂMICA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DA ILHA DO FUNDÃO.

Victor Dutra Ribeiro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

PhD. Glauco Nery Taranto

(Orientador)

D.Sc Carmen Lucia Tancredo Borges

PhD. Antonio Carlos Ferreira

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2011

Agradecimentos

Agradeço ao professor Glauco Nery Taranto pela transmissão eficiente de conhecimento e experiência, pela compreensão e pelo companheirismo demonstrado durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ao Wellington Luiz Leite da Rocha por permitir a utilização do sistema real, levantado em seu projeto de graduação, para a realização deste estudo e por toda ajuda concedida.

Agradeço ao companheiro Sergio Escalante, aluno de doutorado da COPPE pela ajuda concedida na utilização do Simulight, sendo sempre atencioso e compreensivo.

Agradeço a Deus pela saúde e força para o cumprimento dessa jornada e por me fazer disposto a sempre encarar desafios.

Agradeço à minha família maravilhosa pelo apoio e motivação nos momentos difíceis de minha vida e pelo suporte durante todo o curso de graduação. Obrigado por fazerem ser um cidadão digno e honesto que sou hoje.

Agradeço a minha namorada, Cintya Lopes Caravella, por todo amor, compreensão e companheirismo dedicado a mim nos momentos mais difíceis de minha vida.

Agradeço aos grandes amigos de turma pela companhia e pelas longas horas de estudo, onde até nos momentos em que o cansaço prevalecia a alegria estava presente.

Resumo do projeto apresentado a Escola Politécnica/UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

ANÁLISE DINÂMICA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DO SISTEMA DA ILHA DO FUNDÃO.

Victor Dutra Ribeiro

Fevereiro/2011

Orientador: Glauco Nery Taranto

Este projeto propôs, a partir do sistema real da Ilha do Fundão, levantado inicialmente do projeto de graduação do Wellington Luiz Leite da Rocha, uma análise dinâmica de suposta geração distribuída com modelagem de geradores como máquinas síncronas utilizando o software Simulight. Diversas situações de contingências foram abordadas, de maneira que foram observadas as variáveis do Sistema e feita identificação de eventuais perigos para o bom funcionamento do mesmo. Foi realizado um estudo do comportamento do sistema quando este apresenta-se ilhado, ou seja, desconectado da rede da Light, de maneira a observar os eventuais pontos críticos frente às contingências propostas. Além disso, foram realizadas análises estáticas para verificação de um funcionamento satisfatório, para o sistema da Ilha do fundão com Geração Distribuída e também para realização de comparação de resultados obtidos pelos Softwares Simulight e ANAREDE.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO - 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.2 – OBJETIVOS..... | 2 |
| CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS | 3 |
| 2.1 - FLUXO DE POTÊNCIA | 3 |
| 2.2 - ESTABILIDADE..... | 4 |
| CAPÍTULO 3 - MODELAGEM | 10 |
| 3.1 – SISTEMA BASE..... | 10 |
| 3.2 – SISTEMA COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA..... | 13 |
| 3.2.1 – <i>Regulador de Tensão</i> | 16 |
| 3.2.2 – <i>Regulador de velocidade</i> | 18 |
| CAPÍTULO 4- EXPERIMENTOS | 19 |
| 4.1 – FLUXO DE POTÊNCIA | 20 |
| 4.2 – ILHAMENTO..... | 27 |
| 4.3 – CURTO-CIRCUITO NO BARRAMENTO PRINCIPAL (FUNDÃO—138) | 45 |
| 4.4 – CURTO-CIRCUITO NAS BARRAS DOS GERADORES INTERNOS..... | 60 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO..... | 72 |
| 5.1 - CONCLUSÃO..... | 72 |
| 5.1.1 – <i>Ilhamento</i> | 72 |
| 5.1.2 – <i>Curto-circuito no barramento Fundão--138</i> | 73 |
| 5.1.3 – <i>Curto circuito nos Barramentos dos Geradores</i> | 73 |
| 5.2 – PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS..... | 74 |
| 5.3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 75 |

Lista de Figuras

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1 – Modelo de transformador para fluxo de potência no Simulight</i> | <i>4</i> |
| <i>Figura 2 - Máquina Síncrona</i> | <i>5</i> |
| <i>Figura 3 - circuito equivalente da máquina síncrona em regime permanente</i> | <i>6</i> |
| <i>Figura 4 - Torques no rotor da máquina síncrona.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Figura 5 - Rotor da máquina síncrona.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Figura 6 - Sistema Ilha do fundão modelado pelo ANAREDE.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 7 - Sistema importado para Simulight.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 8 - Alteração de modelo de fluxo de geradores.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 9 - Modelagem de máquina síncrona no Simulight.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 10 - Regulador de tensão de primeira ordem</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 11 - regulador de velocidade utilizado na modelagem do sistema.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 12 - Sistema da Ilha do Fundão modelado com GD.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 13 - Comparação entre tensões obtidas no Simulight e ANAREDE para o Sistema Base.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 14 - Ângulo delta dos geradores tendo o sistema externo como referência.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 15 - Ângulo delta dos três geradores internos com GER_CCS como referência.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 16 - Comportamento da potência elétrica do sistema.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 17 - Potência mecânica dos geradores</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 18 - Velocidade angular dos geradores.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 19 - Frequência dos geradores.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 20 - Módulo da tensão nos barramentos dos geradores.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 21 - Ângulo delta utilizando GER_CCS como referência e Intercâmbio de 10MW</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 22 – Comportamento da Potência Elétrica para Intercâmbio de 10MW.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 23- Comportamento da Potência Mecânica para Intercâmbio de 10MW.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 24 - Velocidade angular par intercâmbio de 10MW.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 25 - Frequência para Intercâmbio de 10MW.....</i> | <i>37</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 26 - Módulo da tensão nas barras dos geradores para intercâmbio de 10MW.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 27 - Ângulo delta dos três geradores internos com GER_CCS como referência.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 28 - Comportamento da potência elétrica do sistema.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 29 - Torção Gerador CCS para Ilhamento sem curto.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 30 - Torção Gerador CT para Ilhamento sem curto.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 31 - Torção Gerador Reitoria para Ilhamento sem curto.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 32 - Potência mecânica dos geradores.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 33 - Velocidade angular dos geradores.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 34 - Frequência dos geradores.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 35 - Módulo da tensão nos barramentos dos geradores.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 36 - Modificação realizada no Sistema para a aplicação de cc na barra FUNDÃO-138.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 37 – Ângulo delta para cc em FUNDÃO--138 utilizando GER_CCS como referência.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Figura 38 - Potência elétrica para curto na barra FUNDÃO -138.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 39 – Torção GERADOR_CCS.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 40 – Torção GERADOR_CT.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 41 - Torção GERADOR_REITORIA.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 42 - Potência mecânica dos Geradores.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 43 - velocidade angular para curto no Barramento FUNDÃO 138.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 44 - frequência dos Geradores para cc em FUNDÃO—138.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 45 - módulo da tensão para cc no barramento FUNDÃO—138.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 46 - Potência aparente nos transformadores.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 47 - forma de atuação Relé 25.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 48 - Ângulo delta para Sistema com Relé 25.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 49 - Potência elétrica para sistema com atuação do Relé 25.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 50 - Frequência para sistema com atuação do Relé 25.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figura 51 - módulo das tensões para sistema com atuação do Relé 25.....</i> | <i>58</i> |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 52 - Potência aparente nos transformadores para o sistema com atuação do Relé 25</i> | 58 |
| <i>Figura 53 - Comparação da Torção do Gerador CCS antes e depois do relé 25 respectivamente</i> | 59 |
| <i>Figura 54 - Comparação da Torção do Gerador CT antes e depois do relé 25 respectivamente</i> | 60 |
| <i>Figura 55 - Comparação da Torção do Gerador Reitoria antes e depois do relé 25 respectivamente</i> | 60 |
| <i>Figura 56 - Angulo delta para curto no CCS com Intercâmbio de potência do Sistema externo</i> | 61 |
| <i>Figura 57 - Torção Gerador CCS</i> | 62 |
| <i>Figura 58 - Potência Mecânica para cc no Gerador CCS com Intercâmbio</i> | 63 |
| <i>Figura 59 - Potência elétrica para cc no CCS com Ilhamento</i> | 63 |
| <i>Figura 60 -- Potência Mecânica para cc no Gerador CCS com Ilhamento</i> | 64 |
| <i>Figura 61 - tensão para cc no CCS com sistema Ilhado</i> | 65 |
| <i>Figura 62 - Comparação de ângulo delta para cc em CT sem e com Ilhamento</i> | 66 |
| <i>Figura 63 - Comparação PE para cc no CT sem e com Ilhamento</i> | 66 |
| <i>Figura 64 - Comparação de tensão para cc no CT sem e com ilhamento</i> | 67 |
| <i>Figura 65 - Potência Elétrica para cc na Reitoria sem e com Ilhamento</i> | 68 |
| <i>Figura 66 - Potência Mecânica para cc na Reitoria sem e com Ilhamento</i> | 68 |
| <i>Figura 67 - tensões para cc na Reitoria sem e com Ilhamento</i> | 69 |
| <i>Figura 68 - Potência elétrica para cc na Reitoria com sistema Ilhado possuindo relé 25</i> | 70 |
| <i>Figura 69 – Potência mecânica para cc na Reitoria com sistema Ilhado possuindo relé 25</i> | 70 |
| <i>Figura 70 – Tensões para cc na Reitoria com sistema Ilhado possuindo relé 25</i> | 71 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| <i>Tabela 1 - Balanço de Potência em regime transitório</i> | 9 |
| <i>Tabela 2 - Detalhamento das barras do Sistema Base</i> | 12 |
| <i>Tabela 3 - Módulo e ângulo das tensões para o Sistema Base</i> | 21 |
| <i>Tabela 4 - Comparação do fluxo nas linhas Simulight/ANAREDE para o Sistema Base</i> | 22 |
| <i>Tabela 5 - Parâmetros nas Barras com GD com destaque para mudanças mais significativas</i> | 24 |
| <i>Tabela 6 - Comparação das tensões antes e depois da GD</i> | 26 |

Nomenclatura

GD - *Geração Distribuída*

ANAREDE - *Software utilizado para análise redes*

SIN - *Sistema Interligado Nacional*

Simulih - *Programa desenvolvido para análise completa de redes elétricas*

Cc – *Curto circuito*

P_{mn} - *Potência ativa mínima*

P_{mx} - *Potência ativa máxima*

Q_{mn} - *Potência reativa mínima*

Q_{mx} - *Potência reativa máxima*

H - *Constante de Inércia do gerador*

D - *Regulação própria do sistema*

X_d - *reatância de eixo direto*

X_q - *reatância de eixo de quadratura*

X_{ld} - *reatância de eixo direto de regime transitório*

E_{fd} - *tensão de excitação*

V_t - *tensão terminal do gerador*

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Considerações Iniciais

O sistema elétrico brasileiro é composto principalmente, de usinas hidrelétricas, fato que já se observava desde 1920, onde este tipo de geração já correspondia a 80% da potencia instalada e que hoje corresponde a 95%. Isso foi sendo construído devido a facilidade econômica encontrada no Brasil, frente às dimensões continentais e diversidade hidrográfica do país. Por outro lado, o sistema torna-se cada vez mais suscetível e vulnerável às variações hidrológicas, uma vez que a demanda tem aumentado a cada dia. Além disso, existem ainda os impactos ambientais, que vêm tornando a construção de usinas hidrelétricas cada vez mais difícil e exigindo que novas soluções sejam encontradas para suprir a demanda que está surgindo.

Com o fim do monopólio da geração elétrica da década de 80, frente à suscetibilidade do sistema hidrelétrico e devido ao embargo ambiental e ao alto investimento que deverá ser feito em geração e transmissão, cresce a necessidade de uma alternativa mais viável e uma alternativa que surge com vigor é a Geração Distribuída. Essa expressão traduz um conceito de geração a ser realizada junto ou próxima dos consumidores e pode englobar diversos tipos de fontes de energia, podendo existir a possibilidade de haver controle de carga/geração, a fim de estabelecer uma relação adequada entre oferta e demanda de energia, podendo assim, obter maior eficiência energética.

Em 2004 o conceito de GD ganhou ênfase quando foi mencionado na Lei 10.848/04 como fonte possível de geração de energia e agora vem sendo melhor entendido pelas

empresas distribuidoras, buscando ser enxergado como forma de amenizar riscos de planejamento.

1.2 – Objetivos

Este projeto a partir de uma modelagem do sistema da Ilha do Fundão realizada no software ANAREDE transferiu toda a modelagem para o software Simulight e realizou análises Estáticas e dinâmicas considerando uma geração distribuída. Todo o trabalho foi desenvolvido com o objetivo de observar as variáveis do sistema frente à aplicação deste tipo de geração, observando alterações e identificando impactos que podem ser gerados a partir da atuação de determinados eventos.

Como a geração distribuída vem ganhando força no cenário elétrico brasileiro, torna-se clara a necessidade de estudos serem desenvolvidos para sua implementação. Portanto, o trabalho objetiva analisar principalmente a dinâmica dos geradores frente a algumas ocorrências que serão propostas a seguir e identificar possíveis perdas de sincronismo ou situações que podem representar risco para o sistema.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 - Fluxo de Potência

Estudo que fornece solução para sistemas elétricos de potência diante de uma dada condição de operação. Através do fluxo obtêm-se as tensões dos barramentos em módulo e ângulo e calculam-se as potências ativa e reativa da rede.

Para a análise realizada neste trabalho o sistema foi considerado trifásico equilibrado e, por conseguinte utilizou a representação monofásica baseada na rede de sequência positiva.

Cada barra k da rede possui associadas quatro variáveis das quais duas são dadas e duas são incógnitas. Dependendo da escolha de quais variáveis serão dadas e quais serão incógnitas teremos a classificação do tipo de barra, tendo como possibilidade os casos a seguir:

1. *Barra PQ*: P_k e Q_k são dados e V_k e θ_k devem ser calculadas;
2. *Barra PV*: P_k e V_k são dados e Q_k e θ_k devem ser calculadas;
3. *Barra Flutuante ou Swing*: V_k e θ_k são dados e P_k e Q_k devem ser calculadas.

Assim, respeitando a 1ª Lei de Kirchoff, o balanço de potência em cada barra deve ser nulo.

Para a análise realizada pelo software Simulight, temos que o modelo de linha utilizado é o modelo de linha média ou modelo π , conforme pode se melhor observado em

[6], assim como o modelo de transformador utilizado, que está compreendido na Figura 1 porém pode ser explicado detalhadamente em [3].

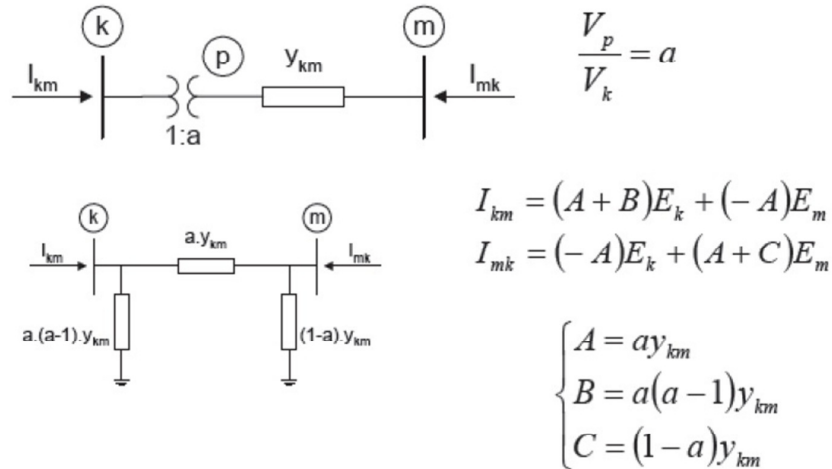


Figura 1 – Modelo de transformador para fluxo de potência no Simulight

A solução do fluxo de potência do Simulight é obtida através do método Newton-Raphson, que consiste em um método iterativo com uma precisão considerável e que pode ser compreendido detalhadamente em [6].

2.2 - Estabilidade

Estabilidade de um sistema de potência é capacidade do sistema de atingir o estado de equilíbrio após ser submetido à perturbação.

A perda da estabilidade de um sistema está, principalmente, relacionada com às perturbações, que podem ocasionar perda de sincronismo e/ou colapso de tensão. A estabilidade transitória analisa o ângulo δ com o tempo e permite analisar possíveis medidas a serem tomadas para que o sistema não se torne instável

Abaixo temos o modelo de máquina síncrona de polos salientes, onde podemos compreender o ângulo delta, bem como outras variáveis:

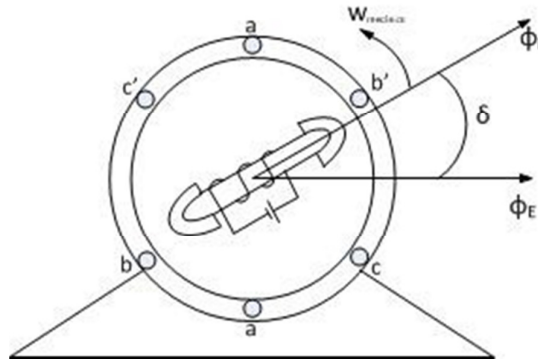


Figura 2 - Máquina Síncrona

Com a alimentação dos enrolamentos do rotor com corrente contínua, temos o surgimento do fluxo magnético ϕ_F . Ainda com os enrolamentos desconectados da rede tem-se a ajuda de uma máquina motriz para a partida do gerador, que ao girar permite que esse fluxo magnético enlace o enrolamento do estator e crie uma tensão induzida.

Com a alimentação de uma carga existe circulação de corrente nas bobinas do estator, que criam um fluxo ϕ_E e assim temos velocidade mecânica e torque mecânico em mesmo sentido e o torque elétrico em sentido oposto.

O ângulo δ varia de acordo com o torque mecânico aplicado, ou seja, para termo geradores, se aumentarmos a queima de combustível temos um aumento de potência mecânica entregue ao gerador e a potência elétrica é mantida constante, o ângulo delta aumenta. Se por algum motivo a potência elétrica entregue pelo gerador aumenta e mantido o valor de potência mecânica, o ângulo delta também aumenta.

Abaixo temos na Figura 3 o circuito equivalente da máquina síncrona em regime permanente:

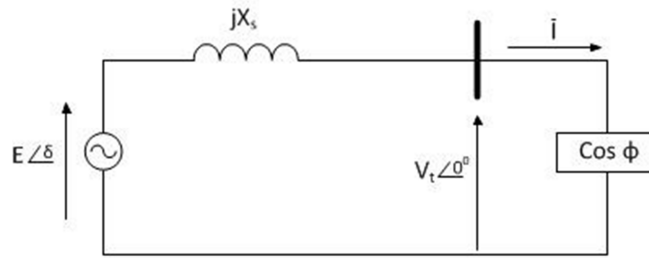


Figura 3 - circuito equivalente da máquina síncrona em regime permanente

Considerando a tensão interna da máquina como constante, podemos obter a potência elétrica entregue pela máquina como:

$$P_e = \frac{E \cdot V_t}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (1)$$

Abaixo temos os torques envolvidos na rotação da máquina:

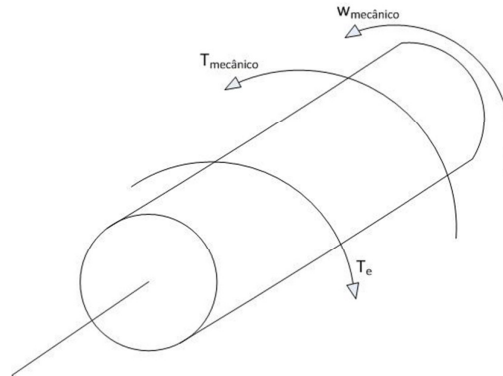


Figura 4 - Torques no rotor da máquina síncrona

Onde:

$\Theta_{\text{mecânico}}$ é o deslocamento angular do rotor em relação a referencial fixo em radianos mecânicos;

$T_{\text{mecânico}}$ é o torque mecânico em Nm;

T_e é o torque elétrico líquido, já descontando atrito, ventilação, Foucault, em Nm.

Assim, podemos escrever:

$$T_a = T_{mecânico} - T_e = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

Onde:

J é o momento de inércia do rotor em kgm^2 ;

T_a é o torque de aceleração em Nm.

Para o regime permanente temos que,

$T_a = 0$, $T_{mecânico} = T_e$, $\frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$, e a velocidade do rotor é igual a velocidade síncrona w_s . Já para casos em que o torque mecânico é diferente do torque elétrico, temos a velocidade da máquina diferente da velocidade síncrona.

Na Figura 5 podemos compreender o desvio da velocidade do rotor com relação à velocidade síncrona, ou seja, como se o referencial gira-se na velocidade síncrona.

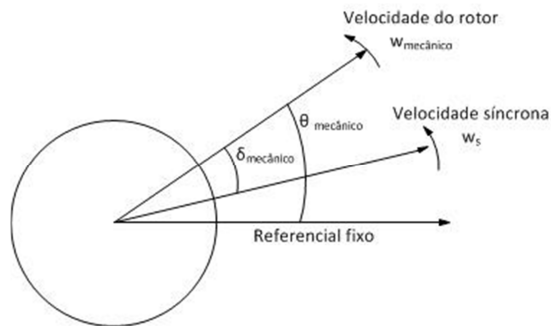


Figura 5 - Rotor da máquina síncrona

Então, podemos escrever:

$$\theta_{mecânico} = w_s \cdot t + \delta_{mecânico}, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_{mecânico}}{dt} = w_s + \frac{d\delta_{mecânico}}{dt} \quad (4)$$

Percebemos assim que a velocidade mecânica é a soma da velocidade síncrona com a variação do ângulo delta, que representa o deslocamento angular do rotor em relação a velocidade síncrona. Desta forma, tem-se:

$$\frac{d^2\theta_{mecânico}}{dt^2} = \frac{d^2\delta_{mecânico}}{dt^2}, \quad (5)$$

e substituindo (5) em (1) vem:

$$T_a \cdot w_{mecânico} - T_e = J \cdot \frac{d^2 \delta_{mecânico}}{dt^2}. \quad (6)$$

Se multiplicarmos todos os termos por $w_{mecânico}$ e chamarmos $j \cdot w_{mecânico}$ de M, que representa a constante de Inércia da máquina na velocidade síncrona, pois para operação estável a velocidade da máquina não difere da velocidade síncrona, teremos:

$$P_a = P_{mecânico} - P_e = M \cdot \frac{d^2 \delta_{mecânico}}{dt^2} \quad (7)$$

Devido à variedade de potência e tamanhos das máquinas o fabricante fornece um valor H, que é conhecido por a razão entre a energia cinética armazenada no rotor e a potência trifásica aparente. Então teremos que:

$$M = \frac{2 \cdot H \cdot S}{w_s}, \quad (8)$$

que substituindo em (7) e representando em pu, ou seja dividindo pela potência aparente da máquina, chegamos a: :

$$P_{mecânico} - P_e = \frac{2 \cdot H}{w_s} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (9)$$

Onde :

H é a constante da máquina em MJ/MVA ou segundos;

$w_s = 2 \times \pi \times f$ e está em radianos elétricos por segundo;

δ em radianos;

$P_{mecânico}$ e P_e em pu na base da máquina.

Pela tabela a seguir podemos resumir o comportamento do gerador relacionado com o balanço de potência.

Tabela 1 - Balanço de Potência em regime transitório

| Balanço de potência | Aceleração | Velocidade angular |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| $P_e = P_{\text{mecânico}}$ | 0 | WS |
| $P_e < P_{\text{mecânico}}$ | + | >WS |
| $P_e > P_{\text{mecânico}}$ | - | <WS |

Quando temos grandezas elétricas que distorcem e atingem valores extremamente altos durante uma contingência e se temos o ângulo delta tendendo a não convergir, temos um sistema instável que pode apresentar perigos para um bom funcionamento dos equipamentos, acarretando perdas financeiras desnecessárias.

Capítulo 3

Modelagem do Sistema

Este capítulo apresenta como foi realizada a modelagem do sistema a ser analisado e quais premissas foram adotadas para essa elaboração, bem como os modelos de reguladores, geradores, localização de disjuntores entre outras considerações importantes para uma familiarização com o sistema.

3.1 – Sistema Base

O Sistema da Ilha do Fundão utilizado surgiu a partir de um levantamento real realizado no projeto final do Wellington Luiz Leite da Rocha, onde as cargas foram levantadas a partir de contas de energia da concessionária Light do ano de 2009. Além disso, foram utilizadas planilhas eletrônicas da Light e diagrama esquemático disponibilizado pela Prefeitura Universitária, para uma melhor aproximação do sistema. Para a modelagem do sistema, este foi considerado como trifásico equilibrado, as cargas modeladas foram consideradas como potência constante, todas as derivações que saem dos alimentadores para as cargas foram representadas como barras fictícias, obtendo aproximações quando próximas umas das outras e o modelo de linha utilizado foi o modelo de linhas médias de transmissão, conforme pode ser verificado em [2].

Na modelagem inicial foi utilizado o software ANAREDE e para a análise realizada neste trabalho foi utilizado o software Simulight, através da importação dos dados do ANAREDE com algumas modificações, que nos permitiram realizar análises estáticas e dinâmica.

Através da Figura 6 podemos observar como o sistema ficou modelado no ANAREDE e na Figura 7 podemos verificar a organização no Simulight, onde a divisão do sistema é feita através de subestações.

Na Tabela 2 teremos uma noção quantitativa das cargas do sistema e sua distribuição, além da verificação do fator de potência sem a aplicação da Geração Distribuída.

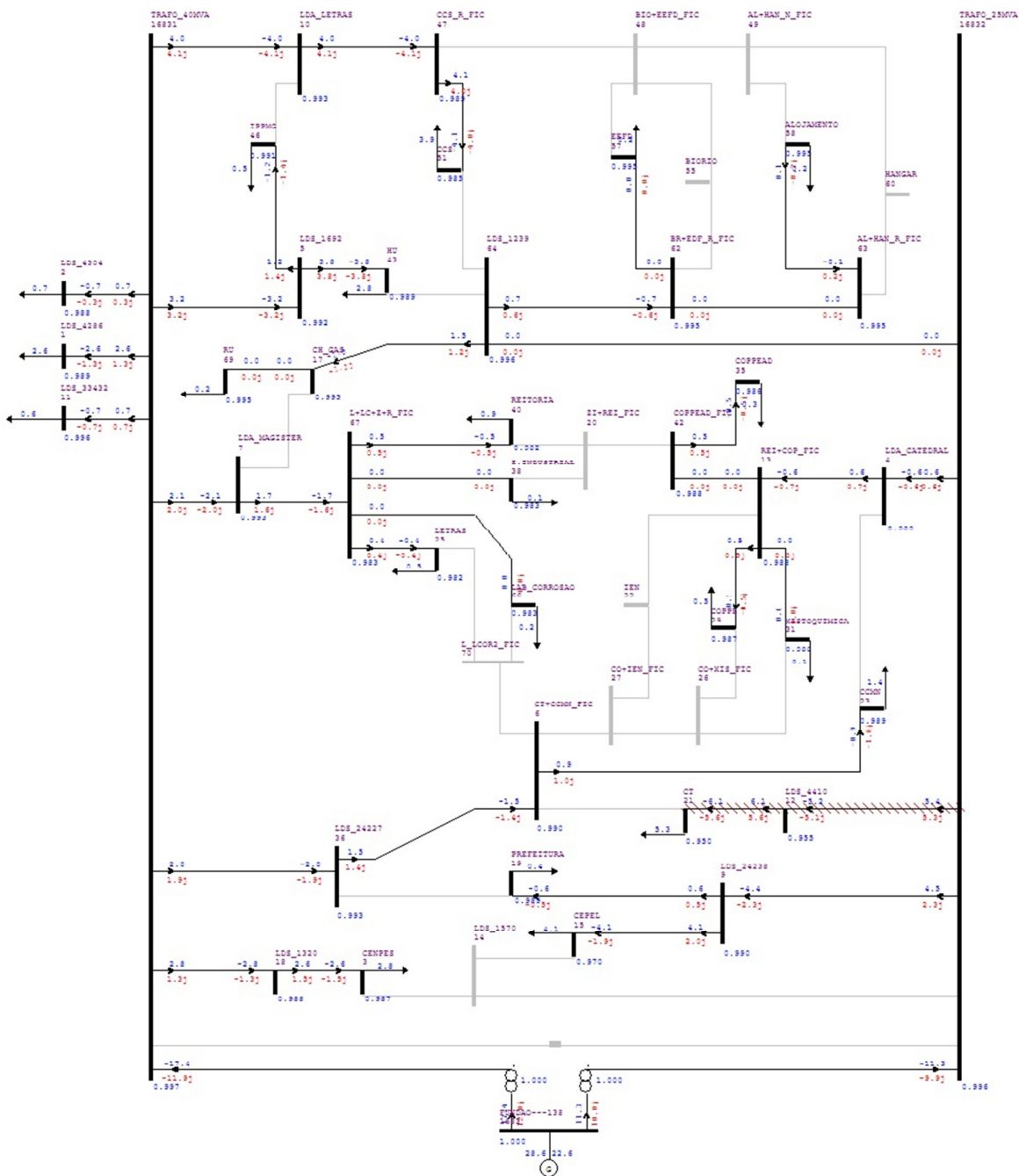


Figura 6 - Sistema Ilha do fundão modelado pelo ANAREDE

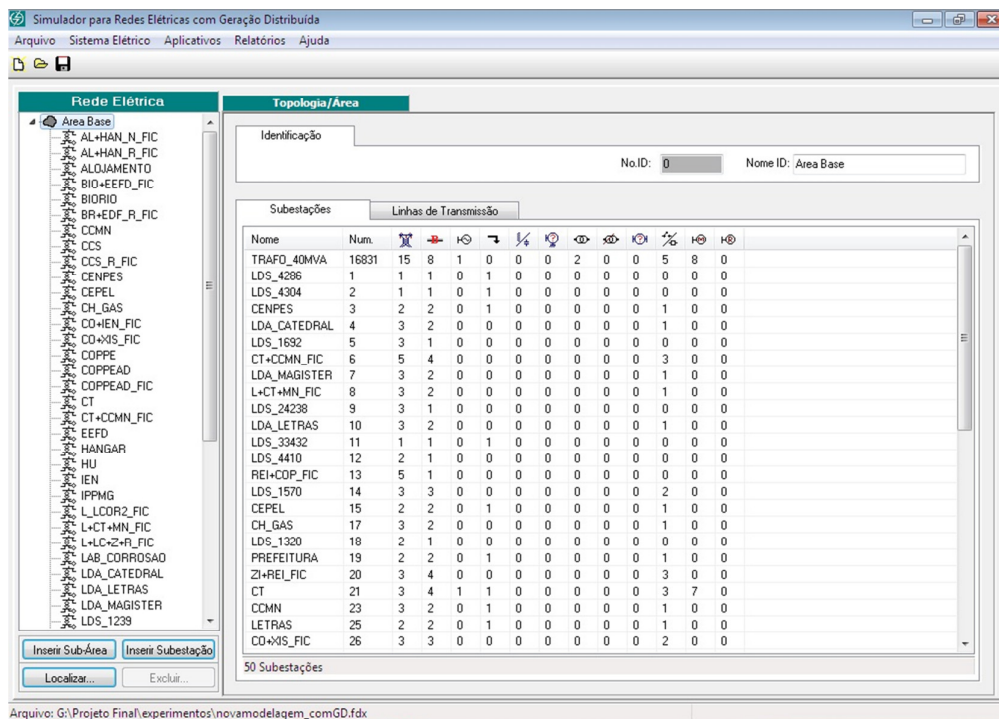


Figura 7 - Sistema importado para Simulight

Tabela 2 - Detalhamento das barras do Sistema Base

| Nome | Geração(MW) | Geração(Mvar) | Carga(MW) | Carga(Mvar) | FP (ind) |
|--------------|-------------|---------------|-----------|-------------|----------|
| LDS_4286 | 0,0000 | 0,0000 | 2,6007 | 1,3003 | 0,8944 |
| LDS_4304 | 0,0000 | 0,0000 | 0,7002 | 0,3001 | 0,9191 |
| CENPES | 0,0000 | 0,0000 | 2,7647 | 1,3363 | 0,9003 |
| LDA_CATEDRAL | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_1692 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| CT+CCMN_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDA_MAGISTER | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| L+CT+MN_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_24238 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDA_LETRAS | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_33432 | 0,0000 | 0,0000 | 0,5602 | 0,2701 | 0,9008 |
| LDS_4410 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| REI+COP_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| CEPEL | 0,0000 | 0,0000 | 4,1470 | 2,0044 | 0,9003 |
| CH_GAS | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_1320 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| PREFEITURA | 0,0000 | 0,0000 | 0,4251 | 0,4111 | 0,7188 |
| CT | 0,0000 | 0,0000 | 5,2998 | 5,2137 | 0,7129 |

| Nome | Geração(MW) | Geração(Mvar) | Carga(MW) | Carga(Mvar) | FP (ind) |
|--------------|-------------|---------------|-----------|-------------|----------|
| CCMN | 0,0000 | 0,0000 | 1,3673 | 1,2933 | 0,7265 |
| LETRAS | 0,0000 | 0,0000 | 0,4851 | 0,4501 | 0,7331 |
| COPPE | 0,0000 | 0,0000 | 0,4501 | 0,4551 | 0,7032 |
| XISTOQUIMICA | 0,0000 | 0,0000 | 0,0810 | 0,0760 | 0,7293 |
| COPPEAD | 0,0000 | 0,0000 | 0,2891 | 0,2700 | 0,7308 |
| LDS_24227 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| Z,INDUSTRIAL | 0,0000 | 0,0000 | 0,1490 | 0,1430 | 0,7215 |
| REITORIA | 0,0000 | 0,0000 | 0,8941 | 0,8731 | 0,7155 |
| COPPEAD_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| HU | 0,0000 | 0,0000 | 2,7978 | 2,7827 | 0,7090 |
| IPPMG | 0,0000 | 0,0000 | 0,4661 | 0,4501 | 0,7193 |
| CCS_R_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| CCS | 0,0000 | 0,0000 | 3,9173 | 3,7342 | 0,7238 |
| EEFD | 0,0000 | 0,0000 | 0,1991 | 0,1871 | 0,7287 |
| ALOJAMENTO | 0,0000 | 0,0000 | 0,1580 | 0,1460 | 0,7344 |
| BR+EDF_R_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| AL+HAN_R_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_1239 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LAB_CORROSAO | 0,0000 | 0,0000 | 0,1610 | 0,1550 | 0,7204 |
| L+LC+Z+R_FIC | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| RU | 0,0000 | 0,0000 | 0,1811 | 0,1761 | 0,7169 |
| FUNDAO---138 | 28,6319 | 22,7106 | 0,0000 | 0,0000 | 0,7835 |
| TRAFO_40MVA | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |

3.2 – Sistema com Geração Distribuída

A modelagem da GD foi realizada considerando os geradores como máquinas síncronas e alocando-os em pontos que possuem cargas significativas, de maneira a obter um fluxo de potência distribuído. Os valores de parâmetros utilizados nesta modelagem foram baseados no Apêndice D de [8], que compreende dados de pequenos geradores à combustíveis fósseis. A seguir, na Figura 8 pode-se compreender claramente como são editados os valores dos parâmetros no Simulight.

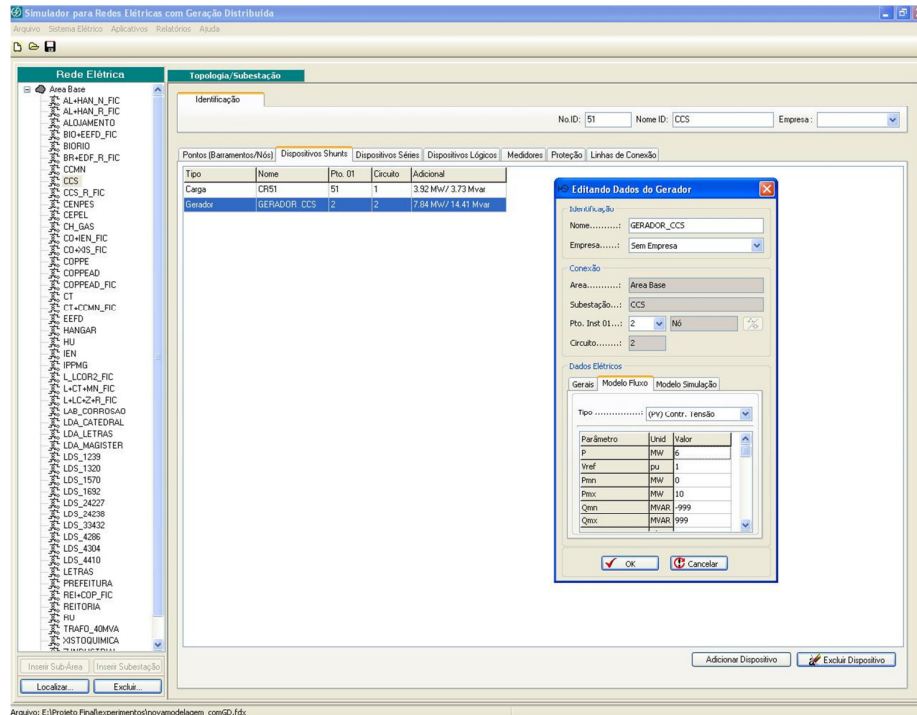


Figura 8 - Alteração de modelo de fluxo de geradores

Desta forma, para o modelo de fluxo, podemos editar, dependendo do tipo de barra que escolhermos (PQ,PV ou V θ), os valores da potência, tensão de referência, limite de potência ativa (Pmn e Pmx) e limite de potência reativa (Qmn e Qmx).

Para o modelo de simulação conforme Figura 9 podemos editar os parâmetros das máquina, como por exemplo H (constante de Inércia),D (regulação própria do sistema), Xd (reatância de eixo direto), Xq (reatância de quadratura), Xld (reatância de eixo direto para regime transitório),r (resistência de enrolamento), Sbase (potência nominal do gerador), entre outros parâmetros observados. Este modelo de máquina foi utilizado por ser o modelo mais usual na análise de estabilidade, não abordando no estudo os efeitos para regimes subtransitórios. Assim, os dados utilizados para composição dos geradores foram:

- **Gerador CCS**

$S_{base} = 10 \text{ MVA};$

$V_{ref} = 1 \text{ pu};$

$P_{mn} = 0 \text{ MW};$

$P_{mx} = 10 \text{ MW}$

$Q_{mn} = -999;$

$Q_{mx} = 999$

$H = 5 \text{ s};$

$D = 0;$

$r = 0,001\% \text{ pu};$

$x_d = 101\% \text{ pu};$

$x_q = 77\% \text{ pu};$

$x'_{ld} = 20\% \text{ pu};$

$T'_{ld} = 4,7 \text{ s};$

- **Gerador CT**

Dados idênticos aos apresentados para o gerador localizado no CCS.

- **Gerador REITORIA**

Dados idênticos aos apresentados pelo para o gerador localizado no CCS, com as seguintes exceções:

$V_{ref} = 1,02 \text{ pu};$

$P_{mx} = 20 \text{ MW};$

$S_{base} = 20 \text{ MVA}.$

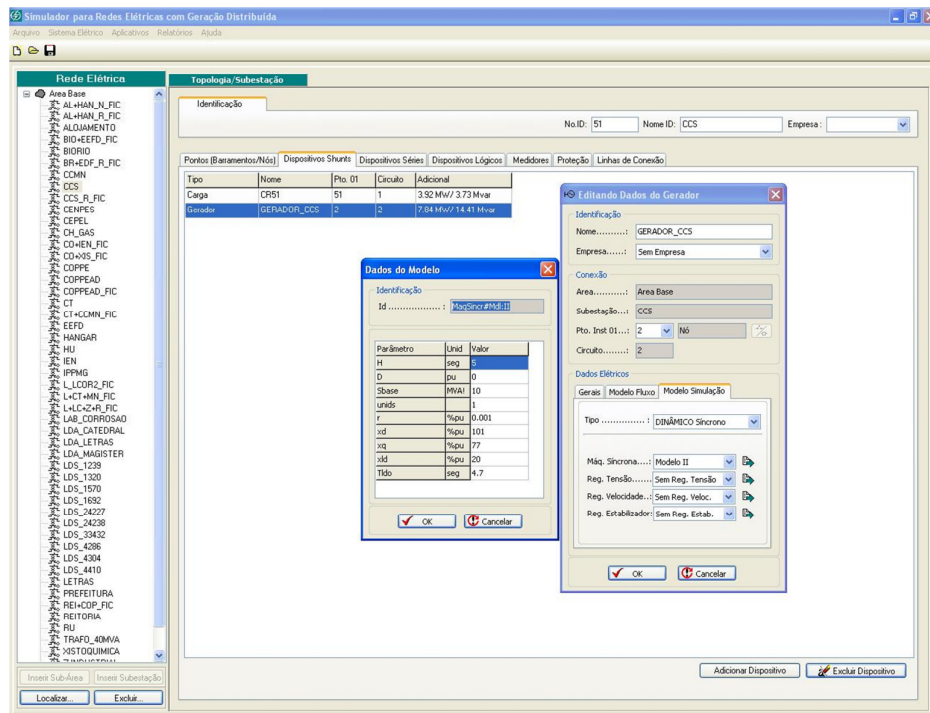


Figura 9 - Modelagem de máquina síncrona no Simulight

Obs:

1. - Foi utilizado 1,02 pu de tensão na barra REITORIA para que o seu consumo de reativo do gerador melhorasse, uma vez que para 1 pu de tensão o consumo de reativo estava alto.
2. - A utilização dos limites de potência reativa (Q_{mn} , Q_{mx}), foram utilizados como -999 e +999 para que não houvesse limite de de geração ou limite de consumo de reativo.
3. - Como observado na Figura 9, também podemos perceber que é possível utilizar reguladores de tensão, de velocidade e reguladores estabilizadores, sendo este ultimo NÃO utilizado neste trabalho.

3.2.1 – Regulador de Tensão

Como o sistema de excitação exerce função extremamente importante para o funcionamento satisfatório de um sistema de potência e também melhora as condições de estabilidade, de maneira a não exceder o limite de excitação da máquina síncrona, tornou-

se necessário, para um bom funcionamento do sistema, a implementação de um regulador de tensão.

O modelo escolhido foi o modelo apresentado na Figura 10 e que possui parâmetros reguláveis que serão explicados a seguir:

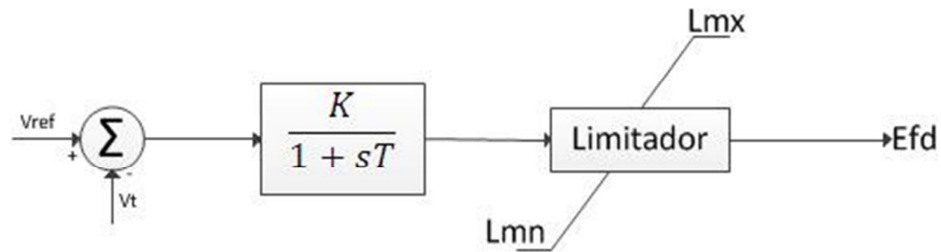


Figura 10 - Regulador de tensão de primeira ordem

K : ganho do regulador;

T : constante de tempo do regulador;

V_t : tensão terminal do gerador;

V_{ref} : valor da tensão de referência (pu);

L_{mn} : limites mínimo da tensão de campo;

L_{mx} : limite máximo da tensão de campo;

E_{fd} : tensão de excitação.

Pelo método de tentativa e erro, buscando o que se adequava de maneira satisfatória, chegamos aos seguintes valores:

$K = 150$;

$T = 0.05$;

$L_{mn} = 0$;

$L_{mx} = 10$;

$V_{ref} = 1$ pu para Geradores do CT e CCS e 1,02 pu para REITORIA

3.2.2 – Regulador de velocidade

Como a frequência de um sistema pode variar de acordo com a carga a qual o sistema alimenta, torna-se necessário o sistema de potência ser dotado de reguladores de velocidades de modo a garantir que a frequência do sistema não varie muito frente às contingências. Um sistema de potência pode ser dotado de regulação primária e regulação secundária, sendo apenas a primeira utilizada nesse trabalho, onde o controle da frequência é realizado através de variações da potência ativa das máquinas.

O diagrama de blocos que compreende o regulador de velocidade utilizado apresenta-se na Figura 11.

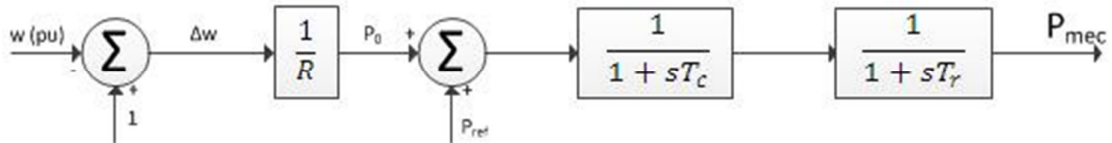


Figura 11 - regulador de velocidade utilizado na modelagem do sistema

Parâmetros utilizados:

$$R = 0,8$$

$$T_c = 0,01 \text{ segundos}$$

$$T_r = 2 \text{ segundos}$$

$$P_{ref} = 1 \text{ pu}$$

Capítulo 4

Experimentos

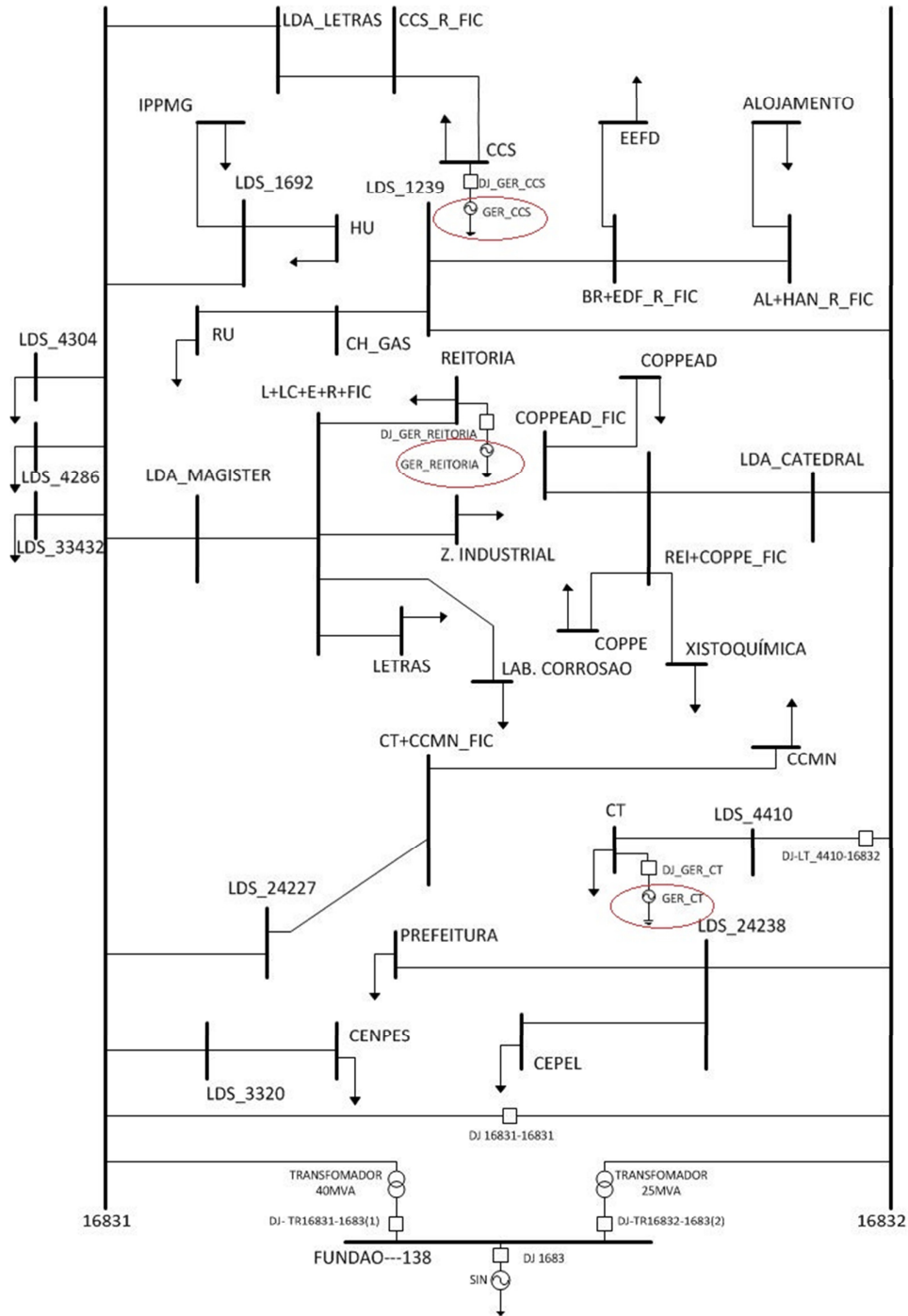


Figura 12 - Sistema da Ilha do Fundão modelado com GD

Para melhor compreensão dos eventos abordados, a Figura 12 demonstra um sistema que foi modelado para proporcionar uma visão mais clara e sucinta do sistema estudado, uma vez que foram adicionados novos elementos e pontos de geração após a importação de dados do ANAREDE, representados na Figura 6.

4.1 – Fluxo de Potência

Foi realizado um estudo de fluxo de potência a fim de conhecer a distribuição de potência no sistema antes e depois da aplicação da Geração Distribuída, além de demonstrar uma análise comparativa entre os softwares Simulight e ANAREDE.

A seguir, na Tabela 3, pode-se observar como ficaram os módulos e ângulos das tensões do sistema sem a Geração Distribuída, através da utilização dos dois softwares citados anteriormente. Na Figura 13, apresenta-se um gráfico comparativo, que tem o objetivo de tornar mais clara a diferença de resultados obtidos, sabendo assim que esta não é significativa, pois o seu valor máximo é de 0,005. Já para o ângulo da tensão, foram obtidos resultados idênticos no cálculo realizado pelos dois programas.

Posteriormente na Tabela 4 tem-se a demonstração do fluxo de potência nas linhas de distribuição e também realizando uma análise comparativa entre os resultados apresentados pelo Simulight e ANAREDE, teremos em destaque os dados que tiveram diferença nos resultados dos dois programas, sendo essa, no valor de 0,01 para todos os casos.

Tabela 3 - Módulo e ângulo das tensões para o Sistema Base

| Nome | ANAREDE | | SIMULIGHT | |
|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | Tensão (p.u.) | Ângulo (graus) | Tensão (p.u.) | Ângulo (graus) |
| LDS_4286 | 0,9900 | -0,3600 | 0,9885 | -0,3600 |
| LDS_4304 | 0,9900 | -0,4000 | 0,9877 | -0,4000 |
| CENPES | 0,9900 | -0,3800 | 0,9865 | -0,3800 |
| LDA_CATEDRAL | 0,9900 | -0,2200 | 0,9891 | -0,2200 |
| LDS_1692 | 0,9900 | -0,2200 | 0,9915 | -0,2200 |
| CT+CCMN_FIC | 0,9900 | -0,2200 | 0,9903 | -0,2200 |
| LDA_MAGISTER | 0,9900 | -0,2300 | 0,9933 | -0,2300 |
| L+CT+MN_FIC | 0,9900 | -0,2100 | 0,9884 | -0,2100 |
| LDS_24238 | 0,9900 | -0,3300 | 0,9900 | -0,3300 |
| LDA_LETRAS | 0,9900 | -0,3600 | 0,9929 | -0,3600 |
| LDS_33432 | 1,0000 | -0,2600 | 0,9960 | -0,2600 |
| LDS_4410 | 0,9500 | -0,0100 | 0,9544 | -0,0100 |
| REI+COP_FIC | 0,9900 | -0,2100 | 0,9880 | -0,2100 |
| CEPEL | 0,9700 | -0,6000 | 0,9695 | -0,6000 |
| CH_GAS | 1,0000 | -0,2600 | 0,9954 | -0,2600 |
| LDS_1320 | 0,9900 | -0,3700 | 0,9875 | -0,3700 |
| PREFEITURA | 0,9900 | -0,3300 | 0,9892 | -0,3300 |
| CT | 0,9500 | 0,0300 | 0,9500 | 0,0300 |
| CCMN | 0,9900 | -0,2100 | 0,9887 | -0,2100 |
| LETRAS | 0,9800 | -0,1700 | 0,9822 | -0,1700 |
| COPPE | 0,9900 | -0,2000 | 0,9871 | -0,2000 |
| XISTOQUIMICA | 0,9900 | -0,2100 | 0,9879 | -0,2100 |
| COPPEAD | 0,9900 | -0,2000 | 0,9865 | -0,2000 |
| LDS_24227 | 0,9900 | -0,2300 | 0,9935 | -0,2300 |
| Z,INDUSTRIAL | 0,9800 | -0,1800 | 0,9831 | -0,1800 |
| REITORIA | 0,9800 | -0,1700 | 0,9816 | -0,1700 |
| COPPEAD_FIC | 0,9900 | -0,2100 | 0,9876 | -0,2100 |
| HU | 0,9900 | -0,2000 | 0,9893 | -0,2000 |
| IPPMG | 0,9900 | -0,2100 | 0,9912 | -0,2100 |
| CCS_R_FIC | 0,9900 | -0,4700 | 0,9891 | -0,4700 |
| CCS | 0,9900 | -0,5900 | 0,9853 | -0,5900 |
| EEFD | 0,9900 | -0,2600 | 0,9948 | -0,2600 |
| ALOJAMENTO | 0,9900 | -0,2600 | 0,9946 | -0,2600 |
| BR+EDF_R_FIC | 1,0000 | -0,2600 | 0,9950 | -0,2600 |
| AL+HAN_R_FIC | 0,9900 | -0,2600 | 0,9948 | -0,2600 |
| LDS_1239 | 1,0000 | -0,2600 | 0,9955 | -0,2600 |
| LAB_CORROSAO | 0,9800 | -0,1800 | 0,9830 | -0,1800 |
| L+LC+Z+R_FIC | 0,9800 | -0,1800 | 0,9834 | -0,1800 |
| RU | 1,0000 | -0,2600 | 0,9953 | -0,2600 |
| FUNDAO---138 | 1,0000 | 0,0000 | 1,0000 | 0,0000 |
| TRAFO_40MVA | 1,0000 | -0,2500 | 0,9966 | -0,2500 |
| TRAFO_25MVA | 1,0000 | -0,2600 | 0,9963 | -0,2600 |

Tabela 4 - Comparação do fluxo nas linhas Simulight/ANAREDE para o Sistema Base

| Barra de | Barra para | ANAREDE | | SIMULIGHT | |
|--------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | Fluxo (MW) | Fluxo (Mvar) | Fluxo (MW) | Fluxo (Mvar) |
| AL+HAN_R_FIC | ALOJAMENTO | 0,1600 | 0,1500 | 0,1600 | 0,1500 |
| AL+HAN_R_FIC | BR+EDF_R_FIC | -0,1600 | -0,1500 | -0,1600 | -0,1500 |
| ALOJAMENTO | AL+HAN_R_FIC | -0,1600 | -0,1500 | -0,1600 | -0,1500 |
| BR+EDF_R_FIC | AL+HAN_R_FIC | 0,1600 | 0,1500 | 0,1600 | 0,1500 |
| BR+EDF_R_FIC | EEFD | 0,2000 | 0,1900 | 0,2000 | 0,1900 |
| BR+EDF_R_FIC | LDS_1239 | -0,3600 | -0,3300 | -0,3600 | -0,3300 |
| CCMN | CT+CCMN_FIC | -1,5600 | -1,4600 | -1,5600 | -1,4600 |
| CCMN | L+CT+MN_FIC | 0,1900 | 0,1700 | 0,1900 | 0,1700 |
| CCS | CCS_R_FIC | -3,9200 | -3,7300 | -3,9200 | -3,7300 |
| CCS_R_FIC | CCS | 3,9200 | 3,7600 | 3,9200 | 3,7600 |
| CCS_R_FIC | LDA_LETRAS | -3,9200 | -3,7600 | -3,9200 | -3,7600 |
| CENPES | LDS_1320 | -2,7600 | -1,3400 | -2,7600 | -1,3400 |
| CEPEL | LDS_24238 | -4,1500 | -2,0000 | -4,1500 | -2,0000 |
| CH_GAS | LDS_1239 | -0,1800 | -0,1800 | -0,1800 | -0,1800 |
| CH_GAS | RU | 0,1800 | 0,1800 | 0,1800 | 0,1800 |
| COPPE | REI+COP_FIC | -0,4500 | -0,4500 | -0,4500 | -0,4600 |
| COPPEAD | COPPEAD_FIC | -0,2900 | -0,2700 | -0,2900 | -0,2700 |
| COPPEAD_FIC | COPPEAD | 0,2900 | 0,2700 | 0,2900 | 0,2700 |
| COPPEAD_FIC | L+CT+MN_FIC | -0,1900 | -0,1700 | -0,1900 | -0,1700 |
| COPPEAD_FIC | REI+COP_FIC | -0,1000 | -0,1000 | -0,1000 | -0,1000 |
| CT | LDS_4410 | -5,3000 | -5,2100 | -5,3000 | -5,2100 |
| CT+CCMN_FIC | CCMN | 1,5600 | 1,4600 | 1,5600 | 1,4600 |
| CT+CCMN_FIC | LDS_24227 | -1,5600 | -1,4600 | -1,5600 | -1,4600 |
| EEFD | BR+EDF_R_FIC | -0,2000 | -0,1900 | -0,2000 | -0,1900 |
| FUNDAO---138 | TRAFO_25MVA | 11,4400 | 9,1700 | 11,4400 | 9,1700 |
| FUNDAO---138 | TRAFO_40MVA | 17,1900 | 13,5300 | 17,1900 | 13,5400 |
| HU | LDS_1692 | -2,8000 | -2,7800 | -2,8000 | -2,7800 |
| IPPMG | LDS_1692 | -0,4700 | -0,4500 | -0,4700 | -0,4500 |
| L+CT+MN_FIC | CCMN | -0,1900 | -0,1700 | -0,1900 | -0,1700 |
| L+CT+MN_FIC | COPPEAD_FIC | 0,1900 | 0,1700 | 0,1900 | 0,1700 |
| L+LC+Z+R_FIC | LAB_CORROSAO | 0,1600 | 0,1600 | 0,1600 | 0,1600 |
| L+LC+Z+R_FIC | LDA_MAGISTER | -1,6900 | -1,6200 | -1,6900 | -1,6200 |
| L+LC+Z+R_FIC | LETRAS | 0,4900 | 0,4500 | 0,4900 | 0,4500 |
| L+LC+Z+R_FIC | REITORIA | 0,9000 | 0,8700 | 0,9000 | 0,8700 |
| L+LC+Z+R_FIC | Z,INDUSTRIAL | 0,1500 | 0,1400 | 0,1500 | 0,1400 |
| LAB_CORROSAO | L+LC+Z+R_FIC | -0,1600 | -0,1600 | -0,1600 | -0,1600 |
| LDA_CATEDRAL | REI+COP_FIC | 0,6300 | 0,6300 | 0,6300 | 0,6300 |
| LDA_CATEDRAL | TRAFO_25MVA | -0,6300 | -0,6300 | -0,6300 | -0,6300 |
| LDA_LETRAS | CCS_R_FIC | 3,9300 | 3,7800 | 3,9300 | 3,7800 |
| LDA_LETRAS | TRAFO_40MVA | -3,9300 | -3,7800 | -3,9300 | -3,7800 |
| LDA_MAGISTER | L+LC+Z+R_FIC | 1,7100 | 1,6400 | 1,7100 | 1,6400 |
| LDA_MAGISTER | TRAFO_40MVA | -1,7100 | -1,6400 | -1,7100 | -1,6400 |
| LDS_1239 | BR+EDF_R_FIC | 0,3600 | 0,3300 | 0,3600 | 0,3300 |
| LDS_1239 | CH_GAS | 0,1800 | 0,1800 | 0,1800 | 0,1800 |

| Barra de | Barra para | ANAREDE | | SIMULIGHT | |
|--------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | Fluxo (MW) | Fluxo (Mvar) | Fluxo (MW) | Fluxo (Mvar) |
| LDS_1239 | TRAFO_25MVA | -0,5400 | -0,5100 | -0,5400 | -0,5100 |
| LDS_1320 | CENPES | 2,7700 | 1,3400 | 2,7700 | 1,3400 |
| LDS_1320 | TRAFO_40MVA | -2,7700 | -1,3400 | -2,7700 | -1,3400 |
| LDS_1692 | HU | 2,8000 | 2,7900 | 2,8000 | 2,7900 |
| LDS_1692 | IPPMG | 0,4700 | 0,4500 | 0,4700 | 0,4500 |
| LDS_1692 | TRAFO_40MVA | -3,2700 | -3,2400 | -3,2700 | -3,2400 |
| LDS_24227 | CT+CCMN_FIC | 1,5600 | 1,4700 | 1,5600 | 1,4700 |
| LDS_24227 | TRAFO_40MVA | -1,5600 | -1,4700 | -1,5600 | -1,4700 |
| LDS_24238 | CEPEL | 4,2200 | 2,0700 | 4,2200 | 2,0700 |
| LDS_24238 | PREFEITURA | 0,4300 | 0,4100 | 0,4300 | 0,4100 |
| LDS_24238 | TRAFO_25MVA | -4,6500 | -2,4800 | -4,6500 | -2,4800 |
| LDS_33432 | TRAFO_40MVA | -0,5600 | -0,2700 | -0,5600 | -0,2700 |
| LDS_4286 | TRAFO_40MVA | -2,6000 | -1,3000 | -2,6000 | -1,3000 |
| LDS_4304 | TRAFO_40MVA | -0,7000 | -0,3000 | -0,7000 | -0,3000 |
| LDS_4410 | CT | 5,3300 | 5,2300 | 5,3300 | 5,2300 |
| LDS_4410 | TRAFO_25MVA | -5,3300 | -5,2300 | -5,3300 | -5,2300 |
| LETRAS | L+LC+Z+R_FIC | -0,4900 | -0,4500 | -0,4900 | -0,4500 |
| PREFEITURA | LDS_24238 | -0,4200 | -0,4100 | -0,4300 | -0,4100 |
| REI+COP_FIC | COPPE | 0,4500 | 0,4600 | 0,4500 | 0,4600 |
| REI+COP_FIC | COPPEAD_FIC | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 |
| REI+COP_FIC | LDA_CATEDRAL | -0,6300 | -0,6300 | -0,6300 | -0,6300 |
| REI+COP_FIC | XISTOQUIMICA | 0,0800 | 0,0800 | 0,0800 | 0,0800 |
| REITORIA | L+LC+Z+R_FIC | -0,8900 | -0,8700 | -0,8900 | -0,8700 |
| RU | CH_GAS | -0,1800 | -0,1800 | -0,1800 | -0,1800 |
| TRAFO_25MVA | FUNDAO---138 | -11,4400 | -9,0800 | -11,4400 | -9,0900 |
| TRAFO_25MVA | LDA_CATEDRAL | 0,6400 | 0,6400 | 0,6400 | 0,6400 |
| TRAFO_25MVA | LDS_1239 | 0,5400 | 0,5100 | 0,5400 | 0,5100 |
| TRAFO_25MVA | LDS_24238 | 4,6800 | 2,5000 | 4,6800 | 2,5000 |
| TRAFO_25MVA | LDS_4410 | 5,5800 | 5,4400 | 5,5900 | 5,4400 |
| TRAFO_40MVA | FUNDAO---138 | -17,1900 | -13,4100 | -17,1900 | -13,4200 |
| TRAFO_40MVA | LDA_LETRAS | 3,9400 | 3,8000 | 3,9400 | 3,8000 |
| TRAFO_40MVA | LDA_MAGISTER | 1,7200 | 1,6400 | 1,7200 | 1,6400 |
| TRAFO_40MVA | LDS_1320 | 2,7900 | 1,3600 | 2,7900 | 1,3600 |
| TRAFO_40MVA | LDS_1692 | 3,2900 | 3,2500 | 3,2900 | 3,2500 |
| TRAFO_40MVA | LDS_24227 | 1,5700 | 1,4700 | 1,5700 | 1,4700 |
| TRAFO_40MVA | LDS_33432 | 0,5600 | 0,2700 | 0,5600 | 0,2700 |
| TRAFO_40MVA | LDS_4286 | 2,6200 | 1,3200 | 2,6200 | 1,3200 |
| TRAFO_40MVA | LDS_4304 | 0,7100 | 0,3000 | 0,7100 | 0,3000 |
| XISTOQUIMICA | REI+COP_FIC | -0,0800 | -0,0800 | -0,0800 | -0,0800 |
| Z,INDUSTRIAL | L+LC+Z+R_FIC | -0,1500 | -0,1400 | -0,1500 | -0,1400 |

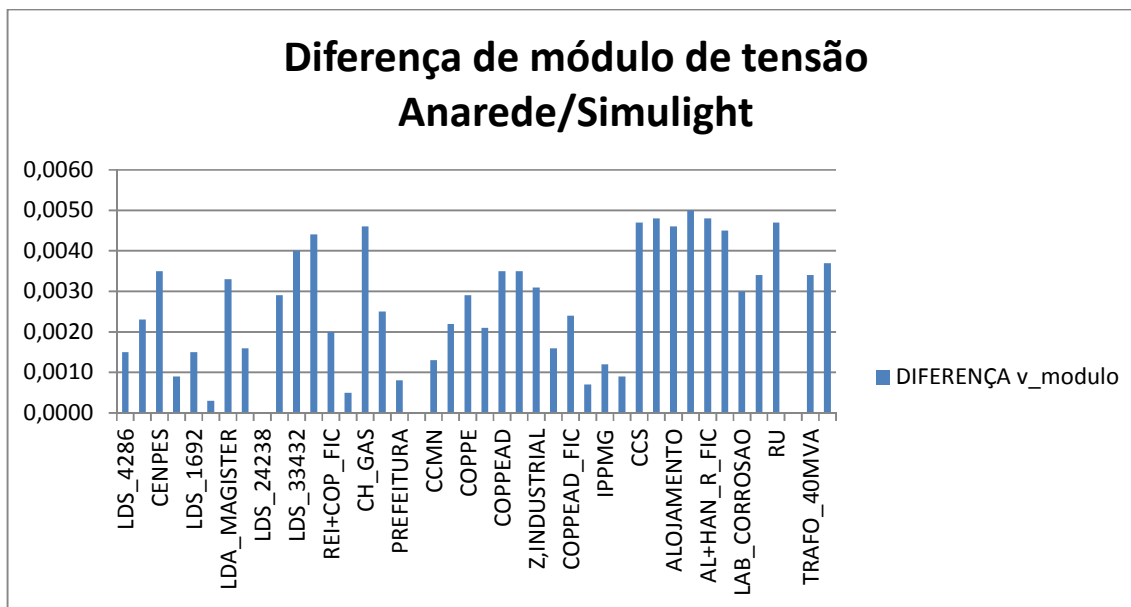


Figura 13 - Comparação entre tensões obtidas no Simulight e ANAREDE para o Sistema Base

Para um melhor entendimento da aplicação da GD conforme demonstrado na Figura 12, teremos a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde se observa os parâmetros das barras e destacam-se as mudanças mais significativas.

Tabela 5 - Parâmetros nas Barras com GD com destaque para mudanças mais significativas

| Nome | Tensão(Módulo) | Geração(MW) | Geração(Mvar) | Carga(MW) | Carga(Mvar) | FP |
|--------------|----------------|-------------|---------------|-----------|-------------|-----------|
| LDS_4286 | 0,9888 | 0,0000 | 0,0000 | 2,6007 | 1,3003 | 0,894 ind |
| LDS_4304 | 0,9880 | 0,0000 | 0,0000 | 0,7002 | 0,3001 | 0,919 ind |
| CENPES | 0,9868 | 0,0000 | 0,0000 | 2,7647 | 1,3363 | 0,900 ind |
| LDA_CATEDRAL | 0,9904 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_1692 | 0,9918 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| CT+CCMN_FIC | 0,9908 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDA_MAGISTER | 1,0009 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| L+CT+MN_FIC | 0,9891 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_24238 | 0,9920 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDA_LETRAS | 0,9979 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_33432 | 0,9963 | 0,0000 | 0,0000 | 0,5602 | 0,2701 | 0,901 ind |
| LDS_4410 | 0,9998 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| REI+COP_FIC | 0,9892 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| CEPEL | 0,9715 | 0,0000 | 0,0000 | 4,1470 | 2,0044 | 0,900 ind |
| CH_GAS | 0,9974 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |

| Nome | Tensão(Módulo) | Geração(MW) | Geração(Mvar) | Carga(MW) | Carga(Mvar) | FP |
|--------------|----------------|-------------|---------------|-----------|-------------|-----------|
| LDS_1320 | 0,9878 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| PREFEITURA | 0,9912 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4251 | 0,4111 | 0,719 ind |
| CT | 1,0000 | 6,0000 | 4,7843 | 5,2998 | 5,2137 | 0,8525 |
| CCMN | 0,9893 | 0,0000 | 0,0000 | 1,3673 | 1,2933 | 0,726 ind |
| LETRAS | 1,0127 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4851 | 0,4501 | 0,733 ind |
| COPPE | 0,9883 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4501 | 0,4551 | 0,703 ind |
| XISTOQUIMICA | 0,9891 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0810 | 0,0760 | 0,729 ind |
| COPPEAD | 0,9874 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2891 | 0,2701 | 0,731 ind |
| LDS_24227 | 0,9939 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| Z,INDUSTRIAL | 1,0136 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1490 | 0,1430 | 0,721 ind |
| REITORIA | 1,0200 | 10,0000 | -3,2706 | 0,8941 | 0,8731 | 0,9102 |
| COPPEAD_FIC | 0,9886 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| HU | 0,9896 | 0,0000 | 0,0000 | 2,7978 | 2,7827 | 0,709 ind |
| IPPMG | 0,9914 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4661 | 0,4501 | 0,719 ind |
| CCS_R_FIC | 0,9990 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| CCS | 1,0000 | 6,0000 | 4,4509 | 3,9173 | 3,7342 | 0,9456 |
| EEFD | 0,9968 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1991 | 0,1871 | 0,729 ind |
| ALOJAMENTO | 0,9966 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1580 | 0,1460 | 0,734 ind |
| BR+EDF_R_FIC | 0,9970 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| AL+HAN_R_FIC | 0,9968 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LDS_1239 | 0,9975 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| LAB_CORROSAO | 1,0135 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1610 | 0,1550 | 0,720 ind |
| L+LC+Z+R_FIC | 1,0139 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| RU | 0,9972 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1811 | 0,1761 | 0,717 ind |
| FUNDAO---138 | 1,0000 | 6,7987 | 16,6924 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3772 |
| TRAFO_40MVA | 0,9969 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| TRAFO_25MVA | 0,9983 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |

Após a aplicação de Geração Interna na Ilha do Fundão notou-se que houve melhora no fator de potência das barras onde se localizam os geradores e houve aumento na tensão dos barramentos que agora estão alocados próximos da geração com modificações no fluxo de potência uma vez que os ângulos e módulos das tensões sofreram alterações. A seguir, podemos observar na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** as principais modificações observadas.

Tabela 6 - Comparação das tensões antes e depois da GD

| BARRAS | Módulo da tensão | | Ângulo da tensão | |
|--------------|------------------|--------|------------------|---------|
| | Sem GD | Com GD | Sem GD | Com GD |
| LDS 4286 | 0,989 | 0,989 | -0,3600 | -0,1400 |
| LDS 4304 | 0,988 | 0,988 | -0,4000 | -0,1900 |
| CENPES | 0,987 | 0,987 | -0,3800 | -0,1600 |
| LDA_CATEDRAL | 0,989 | 0,990 | -0,2200 | -0,0500 |
| LDS 1692 | 0,992 | 0,992 | -0,2200 | 0,0000 |
| CT+CCMN_FIC | 0,990 | 0,991 | -0,2200 | -0,0100 |
| LDA_MAGISTER | 0,993 | 1,001 | -0,2300 | 0,6900 |
| L+CT+MN_FIC | 0,988 | 0,989 | -0,2100 | -0,0100 |
| LDS 24238 | 0,990 | 0,992 | -0,3300 | -0,1900 |
| LDA LETRAS | 0,993 | 0,998 | -0,3600 | 0,0500 |
| LDS 33432 | 0,996 | 0,996 | -0,2600 | -0,0500 |
| LDS 4410 | 0,954 | 1,000 | -0,0100 | 0,1100 |
| REI+COP_FIC | 0,988 | 0,989 | -0,2100 | -0,0300 |
| CEPEL | 0,970 | 0,972 | -0,6000 | -0,4600 |
| CH_GAS | 0,995 | 0,997 | -0,2600 | -0,1200 |
| LDS 1320 | 0,988 | 0,988 | -0,3700 | -0,1500 |
| PREFEITURA | 0,989 | 0,991 | -0,3300 | -0,1900 |
| CT | 0,950 | 1,000 | 0,0300 | 0,1400 |
| CCMN | 0,989 | 0,989 | -0,2100 | -0,0100 |
| LETRAS | 0,982 | 1,013 | -0,1700 | 2,8300 |
| COPPE | 0,987 | 0,988 | -0,2000 | -0,0300 |
| XISTOQUIMICA | 0,988 | 0,989 | -0,2100 | -0,0300 |
| COPPEAD | 0,987 | 0,987 | -0,2000 | -0,0200 |
| LDS 24227 | 0,994 | 0,994 | -0,2300 | -0,0200 |
| Z_INDUSTRIAL | 0,983 | 1,014 | -0,1800 | 2,8200 |
| REITORIA | 0,982 | 1,020 | -0,1700 | 3,5100 |
| COPPEAD_FIC | 0,988 | 0,989 | -0,2100 | -0,0200 |
| HU | 0,989 | 0,990 | -0,2000 | 0,0200 |
| IPPMG | 0,991 | 0,991 | -0,2100 | 0,0000 |
| CCS_R_FIC | 0,989 | 0,999 | -0,4700 | 0,1300 |
| CCS | 0,985 | 1,000 | -0,5900 | 0,2000 |
| EEFD | 0,995 | 0,997 | -0,2600 | -0,1200 |
| ALOJAMENTO | 0,995 | 0,997 | -0,2600 | -0,1200 |
| BR+EDF_R_FIC | 0,995 | 0,997 | -0,2600 | -0,1200 |
| AL+HAN_R_FIC | 0,995 | 0,997 | -0,2600 | -0,1200 |
| LDS 1239 | 0,996 | 0,998 | -0,2600 | -0,1200 |
| LAB_CORROSAO | 0,983 | 1,014 | -0,1800 | 2,8300 |
| L+LC+Z+R_FIC | 0,983 | 1,014 | -0,1800 | 2,8200 |
| RU | 0,995 | 0,997 | -0,2600 | -0,1200 |
| FUNDAO---138 | 1,000 | 1,000 | 0,0000 | -0,0100 |
| TRAFO_40MVA | 0,997 | 0,997 | -0,2500 | -0,0300 |
| TRAFO_25MVA | 0,996 | 0,998 | -0,2600 | -0,1200 |

4.2 – Ilhamento

Para o estudo de Ilhamento do Fundão, foram utilizadas três hipóteses de análise, aqui chamadas de casos, onde o sistema, por não utilizar os geradores para suprir toda a carga, necessita que o restante da potência seja proveniente de intercâmbio com o Sistema externo (sistema da Light externo a Ilha do Fundão). A análise a ser feita parte da abertura do Disjuntor 1683, que é o equipamento de manobra que interliga a Ilha do fundão com o restante do sistema elétrico.

4.2.1 – Caso 1- Intercâmbio de 6MW

Neste Caso a configuração do sistema foi ajustada para que tenhamos uma geração interna de aproximadamente 22 MW e assim o restante da carga, que é de aproximadamente 6MW, seja suprida pelo sistema da Light. A disposição destes 22MW gerados na Ilha do Fundão ficou da seguinte forma:

Gerador localizado no CT → Assumindo 6 MW de carga

Gerador localizado no CCS → Assumindo 6 MW de carga

Gerador localizado na REITORIA → Assumindo 10 MW de carga

A abertura do DJ principal acontece no instante igual a 6s, para que seja possível observar melhor o comportamento do sistema e salientar a constância das variáveis antes da aplicação do evento.

Na Figura 14 podemos observar o comportamento do ângulo δ dos geradores após a abertura do DJ 1683.

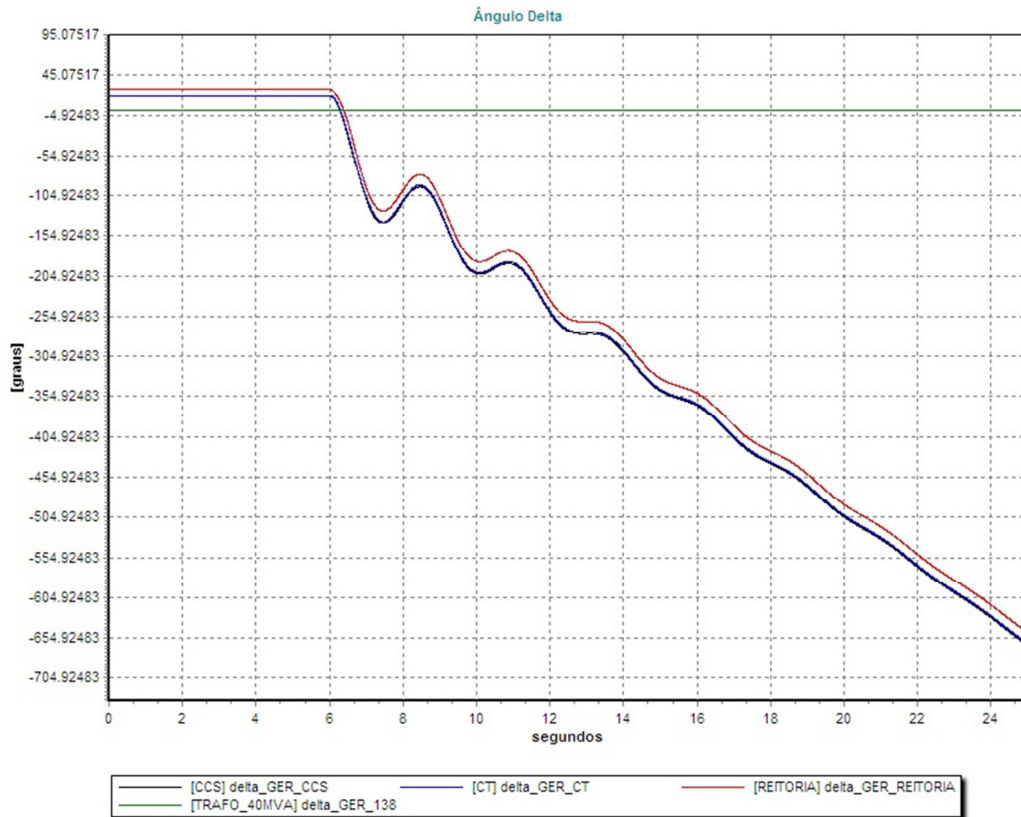


Figura 14 -Ângulo delta dos geradores tendo o sistema externo como referência

É possível notar que os geradores demonstram um comportamento de ângulo delta dentro do esperado, uma vez que o delta do gerador da barra de 138, representado pela cor verde e tomado como referência, tem-se os geradores internos freando em comparação ao sistema da Light. Pode-se também perceber que os demais ângulos não variam tão significativamente quando comparados ao ângulo do GERADOR CCS, tendo nas figuras a seguir detalhes da variação do ângulo delta, assim como o comportamento das outras variáveis do sistema.

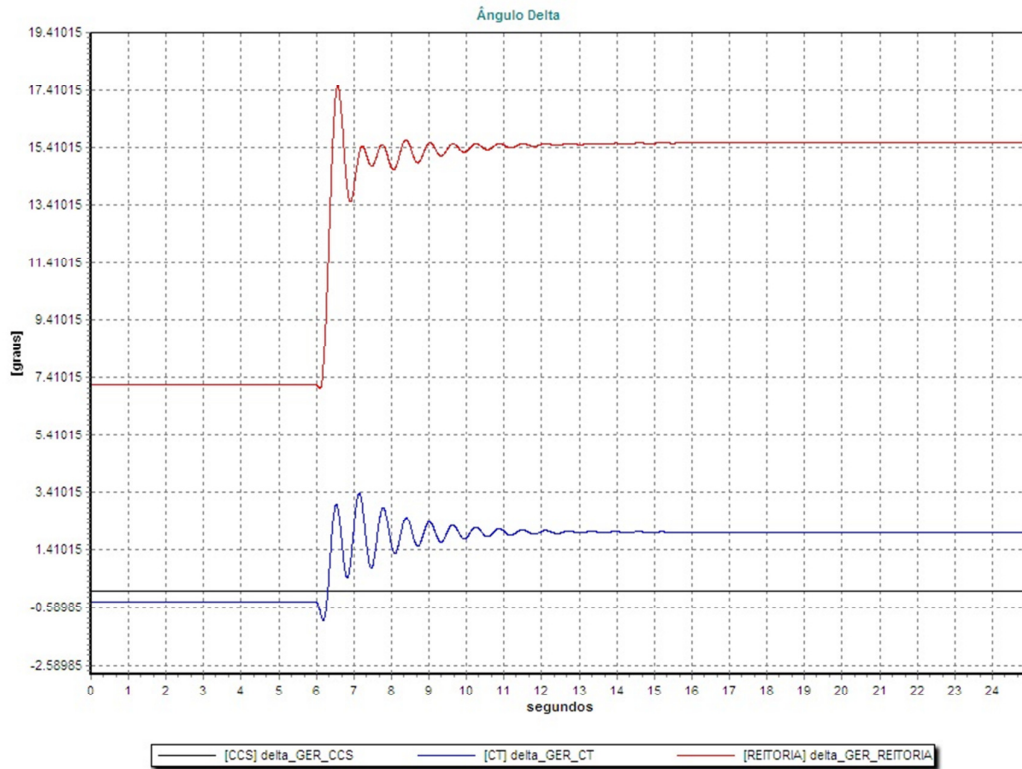


Figura 15 - Ângulo delta dos três geradores internos com GER_CCS como referência

Na Figura 15 observamos que a partir de 6s, que é o momento em que abrimos o disjuntor, temos uma variação de ângulo que dura aproximadamente 7s, porém há uma convergência desse ângulo, significando que para esse evento, apesar de uma variação transitória no ângulo, o sistema é estável, convergindo para 15,6° para o caso do GER_REITORIA e 2° para o GER_CT, em relação ao GER_CCS.

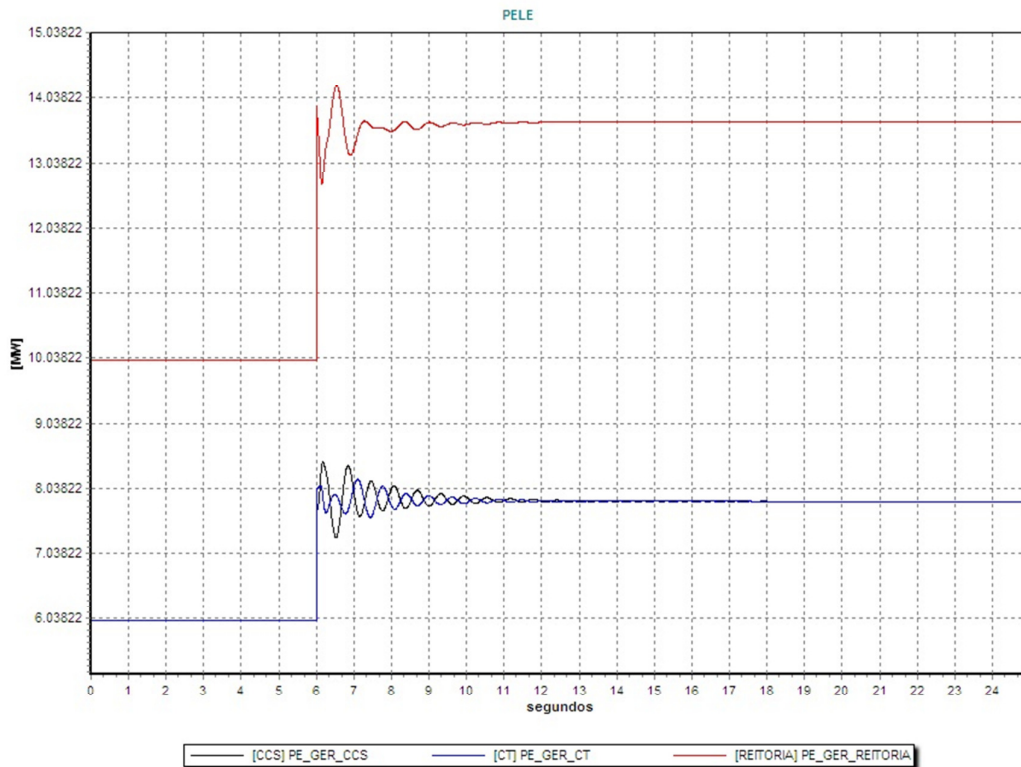


Figura 16 - Comportamento da potência elétrica do sistema

Na Figura 16 e na Figura 17 podemos fazer uma comparação entre as potências elétrica e mecânica para justificar a variação do ângulo δ , uma vez que a relação entre essas grandezas é mostrada na equação (9).

Assim, podemos relacionar a perturbação de potência observada com os desvios no ângulo δ em relação à posição de equilíbrio e perceber que a perturbação acontece devido a um desequilíbrio entre a potência mecânica do gerador e a potência elétrica do sistema. É possível também, observar que o equilíbrio é alcançado quando o valor de $P_{mecânico}$ e P_e apresentam oscilações pequenas e atingem aproximadamente o mesmo valor, sendo esse aproximadamente 7,8 MW para os geradores localizados no CT e CCS e 13,7MW para o gerador localizado na Reitoria. Importante também, é ressaltar que mesmo em regime transitório o gerador não apresenta “pico” de potência maior que sua capacidade nominal.

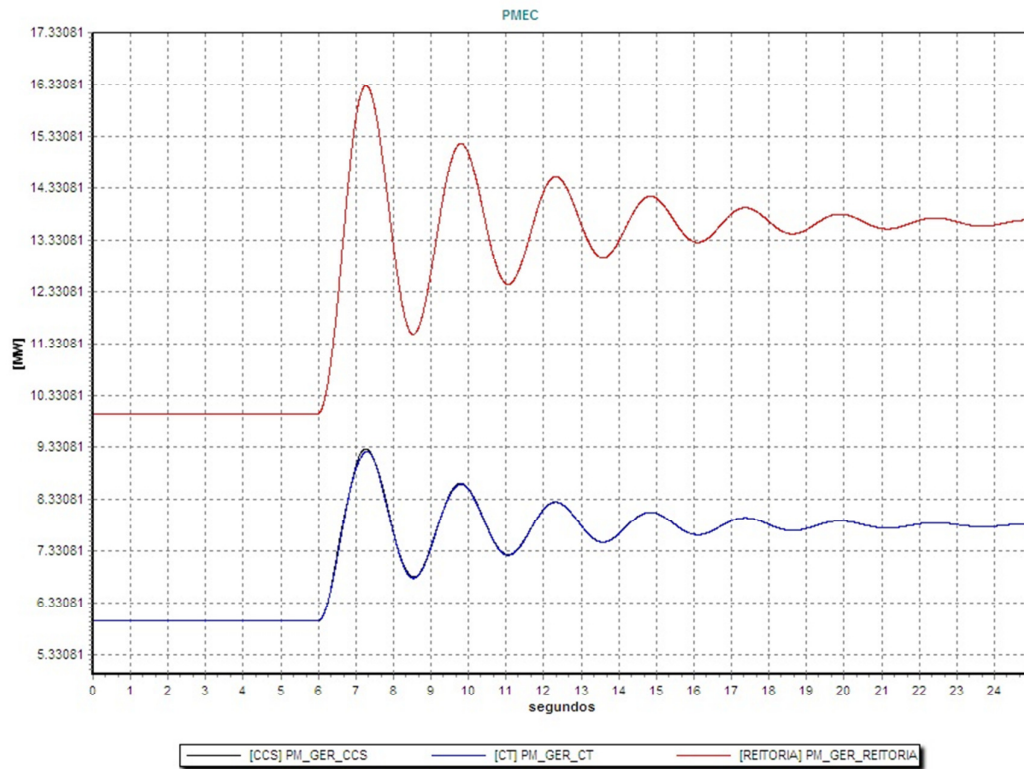


Figura 17 - Potência mecânica dos geradores

A seguir, na Figura 18 observa-se a velocidade angular dos geradores, que possuem uma variação não muito significativa e estabilizam-se ainda abaixo de suas capacidades nominais, tendo até na variação transitória uma operação por volta de 1 pu. No gráfico é mostrado 1 rad/s, devido a um erro do software Simulight.

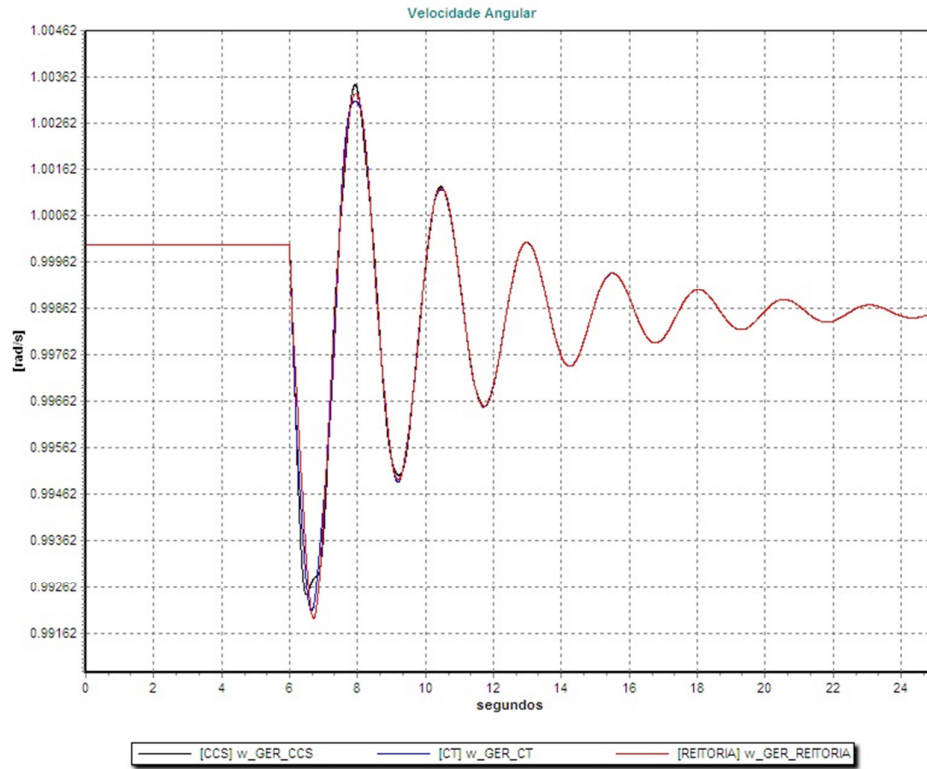


Figura 18 - Velocidade angular dos geradores

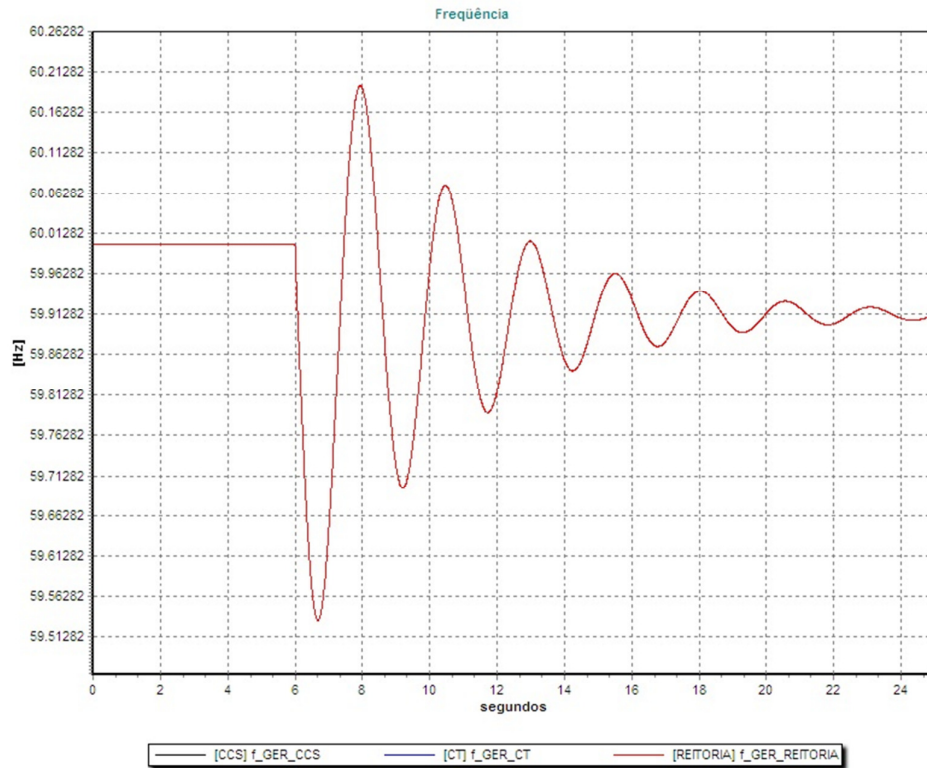


Figura 19 - Frequência dos geradores

Na Figura 19 temos a variação da frequência e por verificação podemos claramente observar que esta, é proporcional à variação da velocidade angular e, portanto, sua variação também é pouco significativa, uma vez que a oscilação acontece no transitório e não varia mais de 0,5 Hz, se estabilizando ao final em 59,9 Hz. É possível perceber que os geradores estão oscilando em “fase”, ou seja, sentem juntos a variação de potência proposta pelo ilhamento.

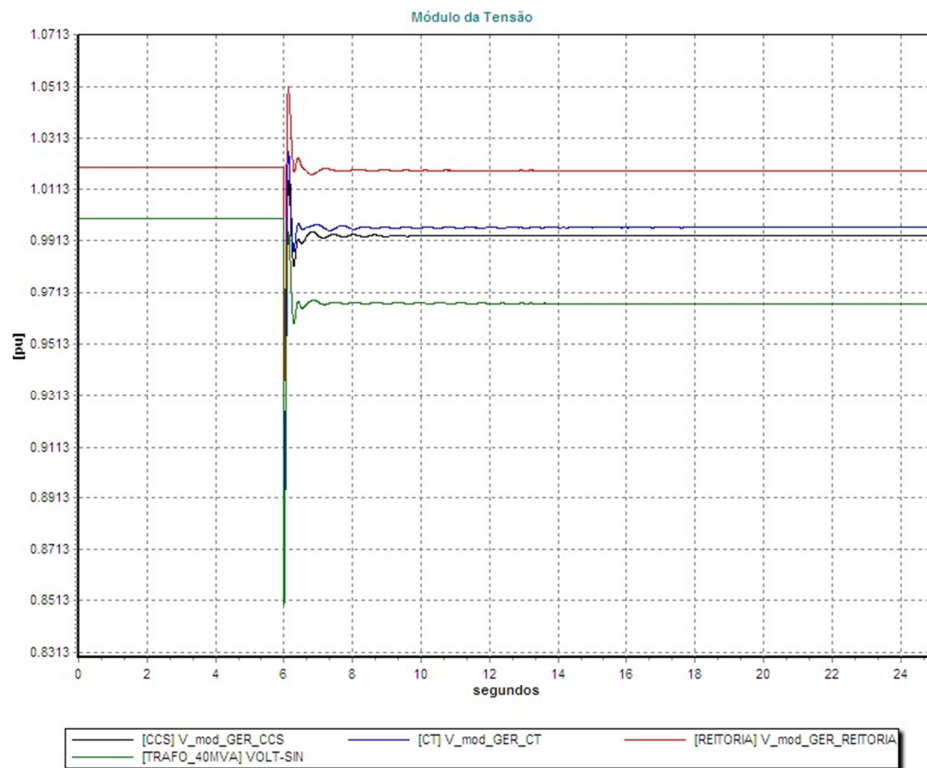


Figura 20 - Módulo da tensão nos barramentos dos geradores

Na Figura 20 temos o módulo das tensões nos barramentos onde se localizam os geradores. Para os geradores internos, vemos que há uma variação no instante em que ocorre o Ilhamento e em seguida o valor de tensão, que era de 1 pu, passa a ser um pouco menor para as barras dos geradores GER_CCS e GER_CT devido ao fato de assumirem mais carga e não conseguirem manter a tensão fixada em 1 pu. Para o gerador GER_REITORIA a tensão fica mantida em 1,02 pu. Interessante, também, é observar que

há uma queda de tensão no barramento de 138 kV e esse fato não distorce da realidade, uma vez que antes naquele local encontrava-se um gerador que mantinha a tensão alta e agora com a perda do mesmo o barramento apresenta-se afastado da geração.

4.2.2 – Caso 2- Intercâmbio de 10MW

Para uma análise mais completa foi modificado o valor da potência fornecida pelos geradores a fim de obter um maior intercâmbio de potência e, por conseguinte um maior impacto quando ocorrer o Ilhamento. Desta forma, a geração ficou da seguinte forma:

Gerador localizado no CT → Gerando 5 MW

Gerador localizado no CCS → Gerando 5 MW

Gerador localizado na REITORIA → Gerando 8 MW

Na Figura 21 observa-se o comportamento do ângulo delta dos geradores para este caso.

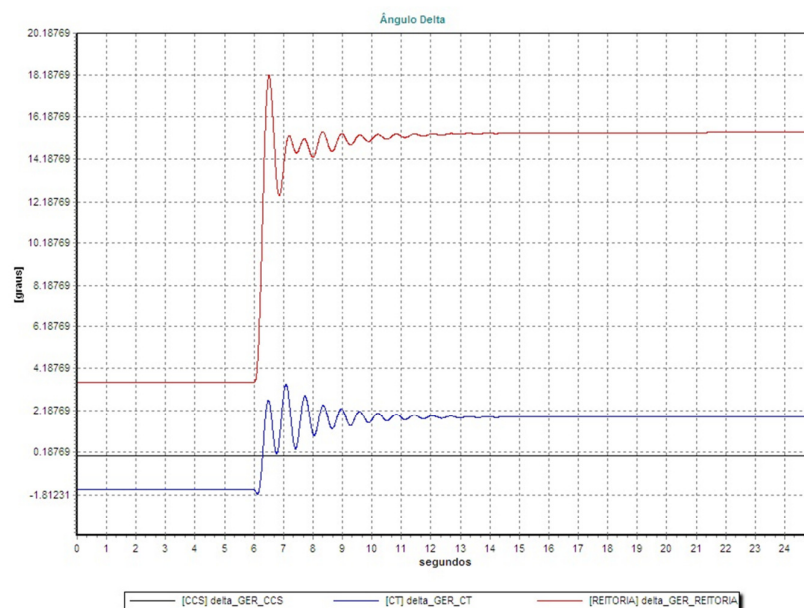


Figura 21 - Ângulo delta utilizando GER_CCS como referência e Intercâmbio de 10MW

Para este caso temos uma oscilação um pouco maior de ângulo delta, porém com mesma frequência de oscilação e com aproximadamente mesma duração, caracterizando, também um sistema estável para a atuação desse evento.

A potência elétrica, conforme pode ser observada na Figura 22 também apresenta variações mais intensas, porém com comportamento bem semelhante ao caso anterior no que se refere à frequência de oscilação e tempo para atingir a estabilidade. O mesmo também acontece com a potência mecânica, como pode ser observado na Figura 23, onde esta se difere do caso anterior apenas no valor assumido de potência gerada e na intensidade da variação, após a abertura do DJ 1683, tendo um “pico” de potência que já chega ao valor nominal de geração da máquina.

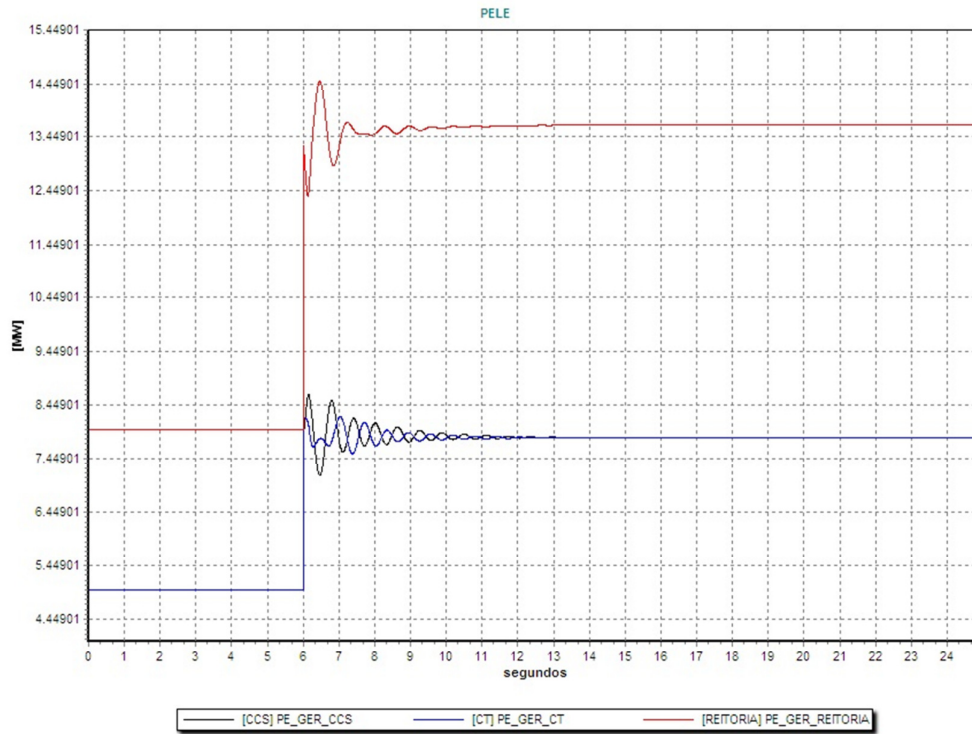


Figura 22 – Comportamento da Potência Elétrica para Intercâmbio de 10MW

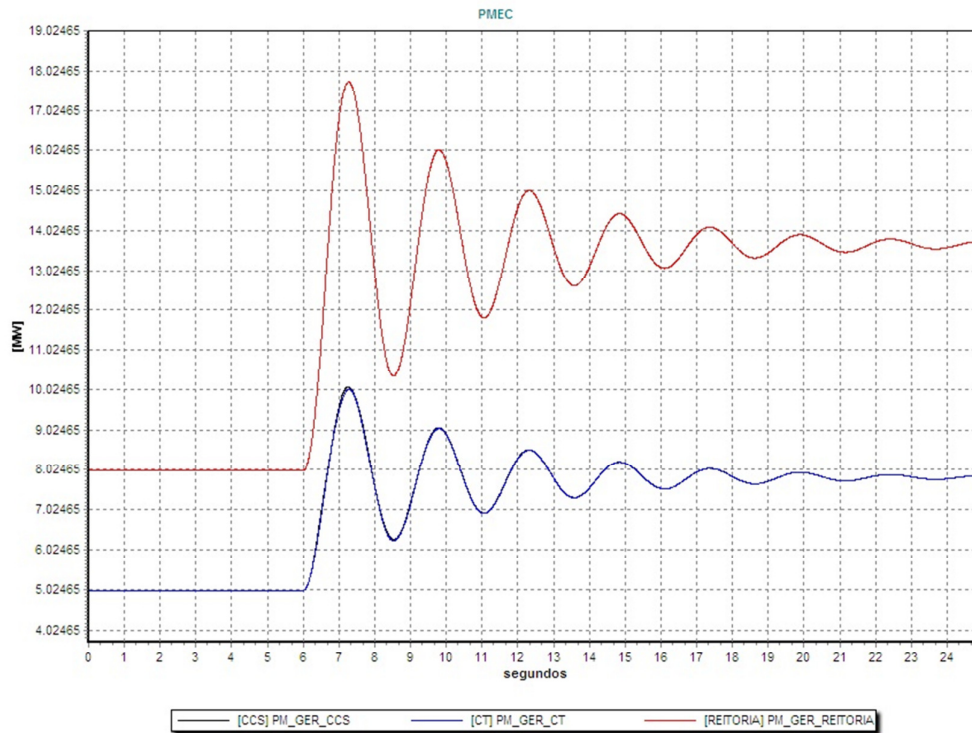


Figura 23- Comportamento da Potência Mecânica para Intercâmbio de 10MW

Para a velocidade angular, conforme Figura 24, o seu comportamento inicial é semelhante ao apresentado no caso anterior, porém variações mais intensas também são observadas, o que é justificado, já que assume repentinamente, com a perda do Intercâmbio externo, mais potência que no caso anterior. O valor final após estabilidade também se equipara com o caso anterior e ao final fixa-se em aproximadamente 0,988 pu.

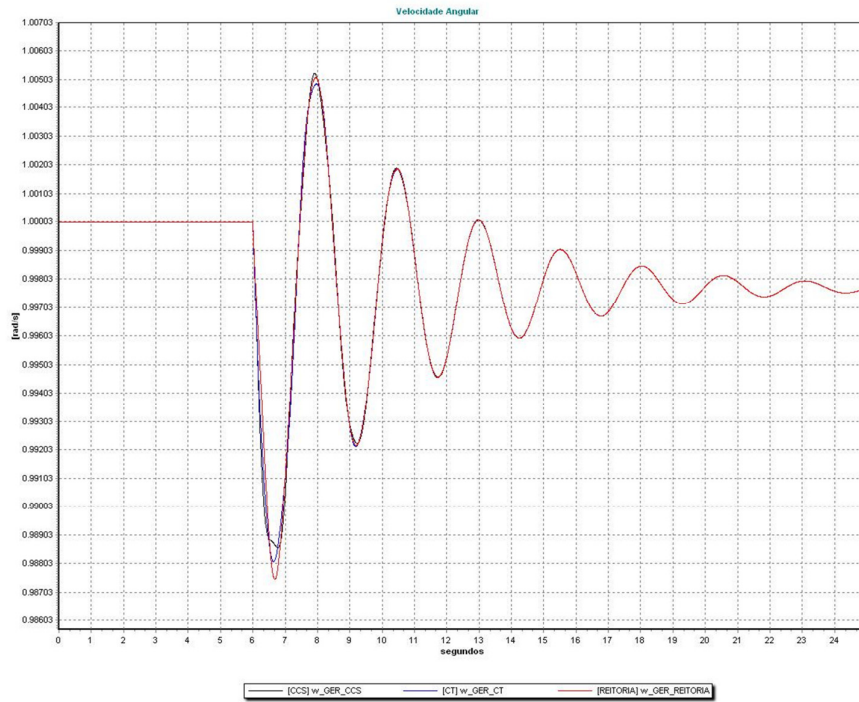


Figura 24 - Velocidade angular par intercâmbio de 10MW

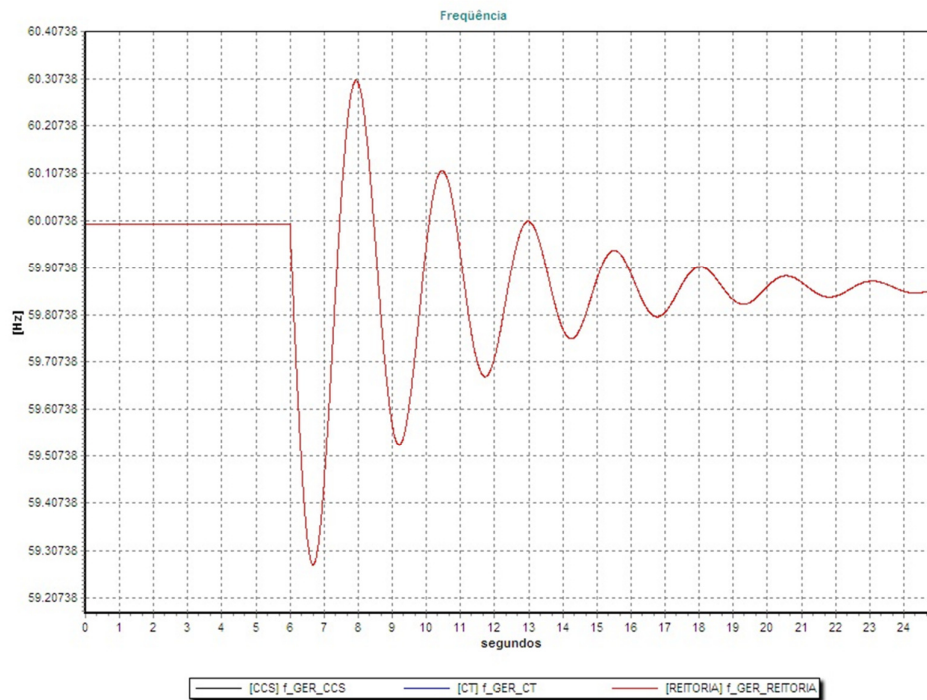


Figura 25 - Frequência para Intercâmbio de 10MW

Na Figura 25 é possível observar um comportamento de frequência respeitando a proporcionalidade à velocidade angular e conseqüentemente apresentando uma variação semelhante, porém mais intensa com relação ao caso anterior. Para o caso de Intercâmbio de 10MW vemos que a frequência varia mais chegando a alcançar o valor 59,27 Hz e ao final se estabiliza em 59,8 Hz, 0,1 Hz a menos que no caso anterior.

Na Figura 26 observamos que o modulo da tensão segue com o mesmo comportamento observado no caso anterior, chegando a valores idênticos de tensão após estabilidade. Portanto, conclui-se que apesar de termos variáveis que oscilam mais intensamente neste caso, o comportamento do sistema é estável e possui comportamento muito semelhante ao caso anterior.

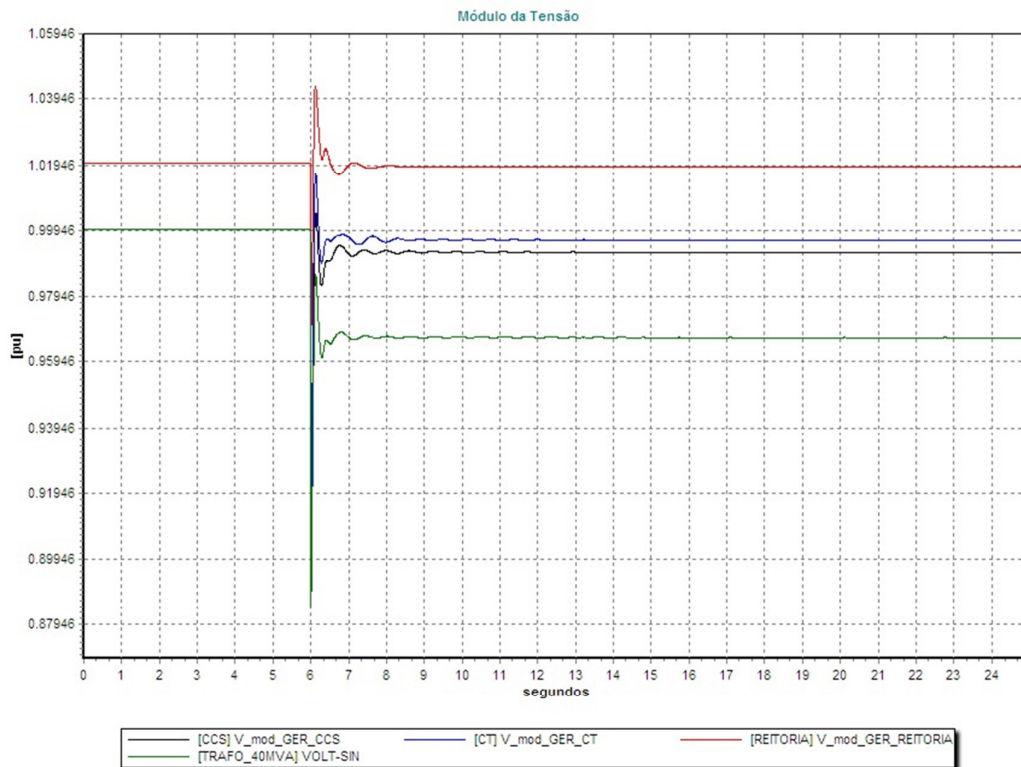


Figura 26 - Módulo da tensão nas barras dos geradores para intercâmbio de 10MW

4.2.2 – Caso 3- Intercâmbio de 15MW

Neste Caso a configuração do sistema foi ajustada para que tenhamos uma geração interna de 13MW, sendo a geração distribuída da seguinte forma:

Gerador localizado no CT → Assumindo 3 MW de carga

Gerador localizado no CCS → Assumindo 3 MW de carga

Gerador localizado na REITORIA → Assumindo 7 MW de carga

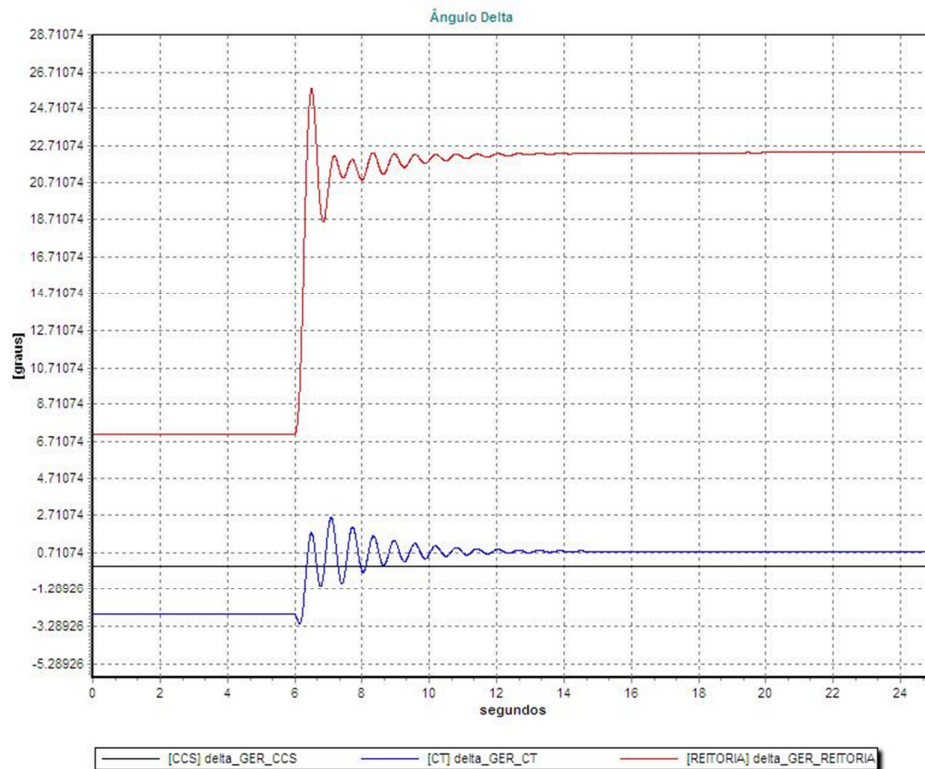


Figura 27 - Ângulo delta dos três geradores internos com GER_CCS como referência

Na Figura 27 a variação do ângulo δ a partir da abertura do DJ, porém há uma convergência desse ângulo, significando um sistema estável para o caso abordado. Apesar disso, percebe-se na figura que para este caso há uma oscilação bem mais intensa que nos

casos anteriores, porém ainda com comportamentos similares, aproximadamente mesma frequência de oscilação e demorando o mesmo tempo para atingir a estabilidade.

Para a potência elétrica vemos na Figura 28 que o seu comportamento segue o mesmo escopo observado em outras variáveis, tendo uma variação mais brusca de potência fazendo como que o gerador GER_REITORIA que antes gerava 7 MW agora assume 15,3 MW e os geradores do CT e CCS que antes geravam 3 MW cada um, agora passem a gerar 7 MW.

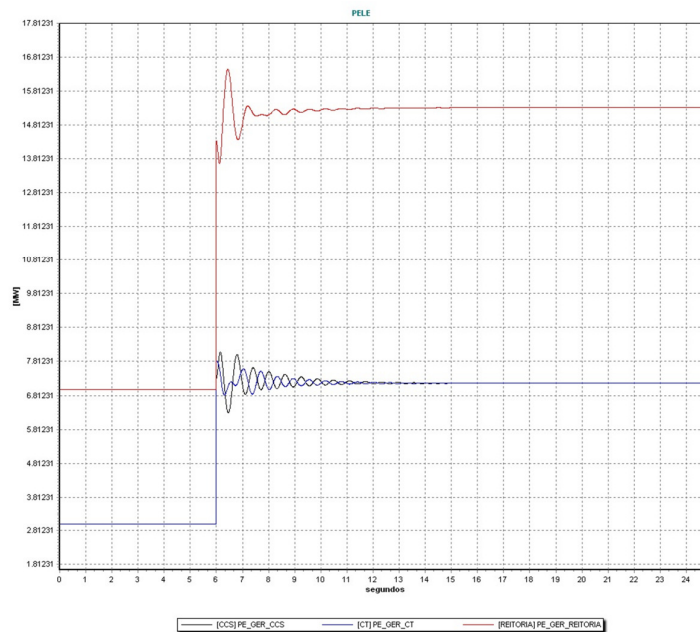


Figura 28 - Comportamento da potência elétrica do sistema

Tendo este caso como caso mais crítico, a seguir realizaremos uma observação no esforço sofrido pelos geradores. Este critério que avalia esse esforço no eixo das máquinas consiste em método empírico proposto em [9] que avalia a diferença de potência ativa gerada imediatamente antes e imediatamente depois da perturbação, conforme (10):

$$\Delta P = P_e(t = 0^-) - P_e(t = 0^+) < 0,5 \text{ pu} \quad (10)$$

A seguir nas figuras 29,30 e 31 observa-se a torção sofrida pelos geradores.

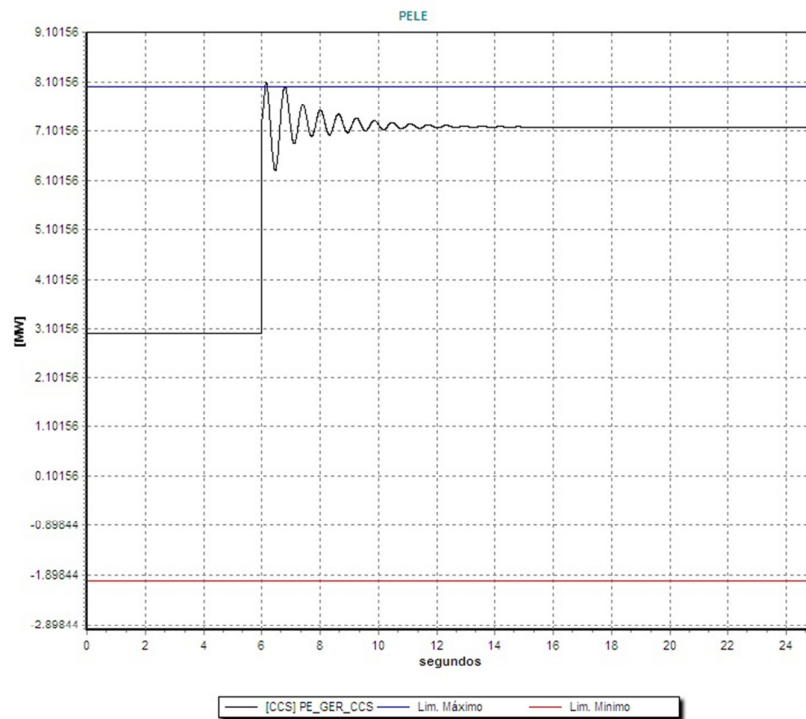


Figura 29 - Torção Gerador CCS para Ihamento sem curto

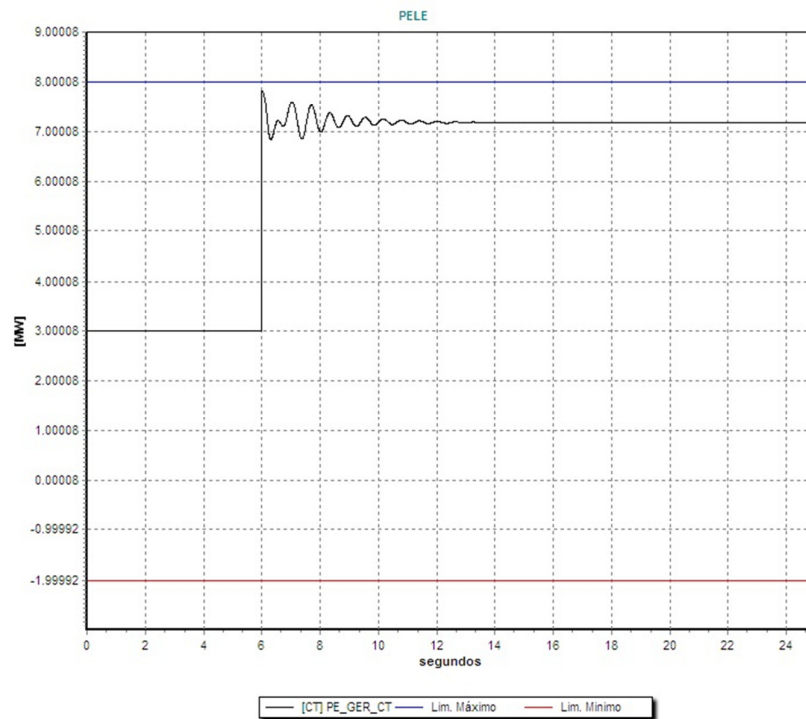


Figura 30 - Torção Gerador CT para Ihamento sem curto

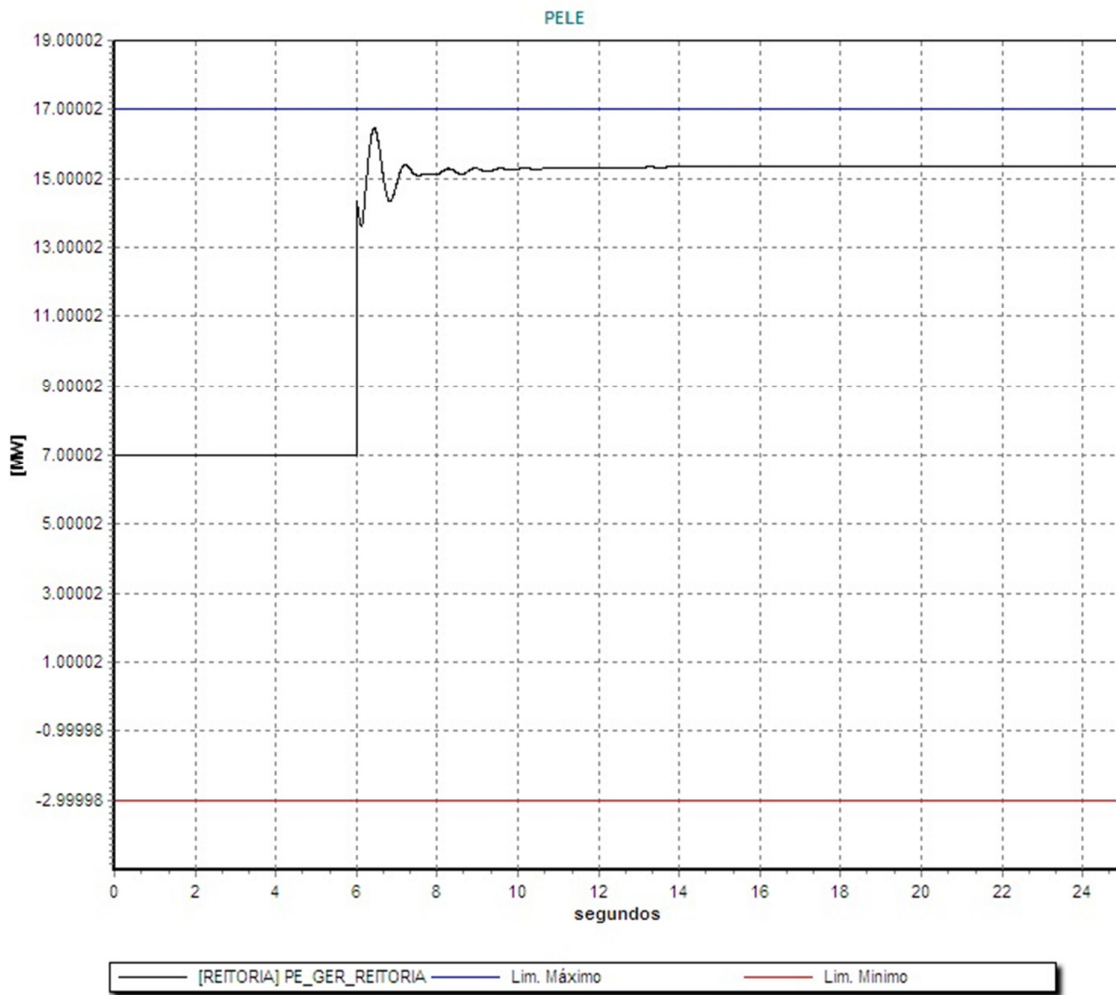


Figura 31 - Torção Gerador Reitoria para Ilhamento sem curto

Assim como observado para a potência Elétrica, também acontece com a potência Mecânica, conforme Figura 32, onde essa variação intensa de potência faz com que as máquinas atinjam valores maiores que seus valores nominais de geração

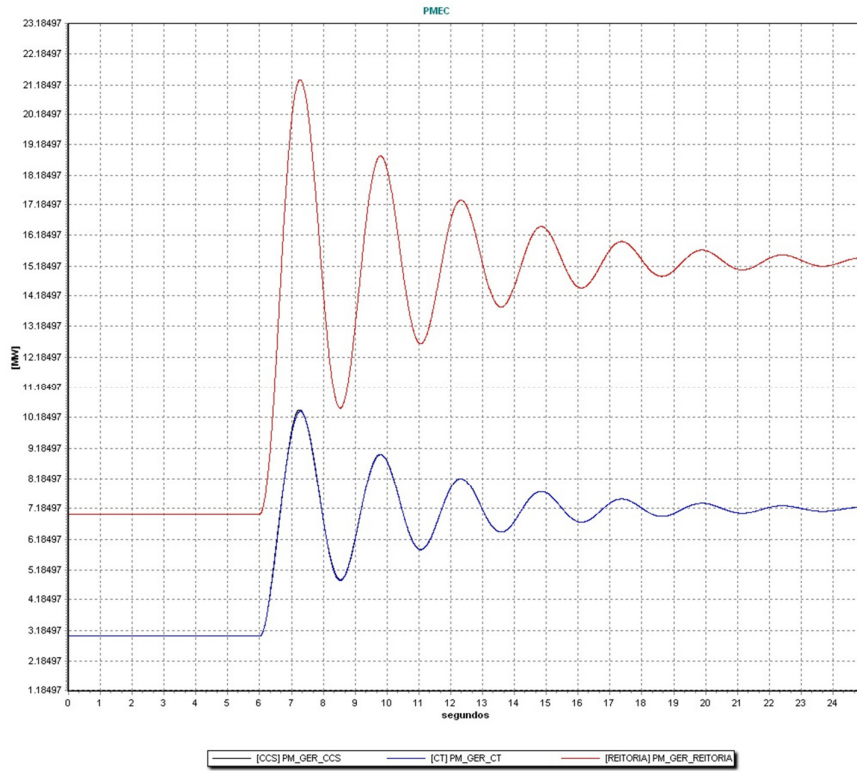


Figura 32 - Potência mecânica dos geradores

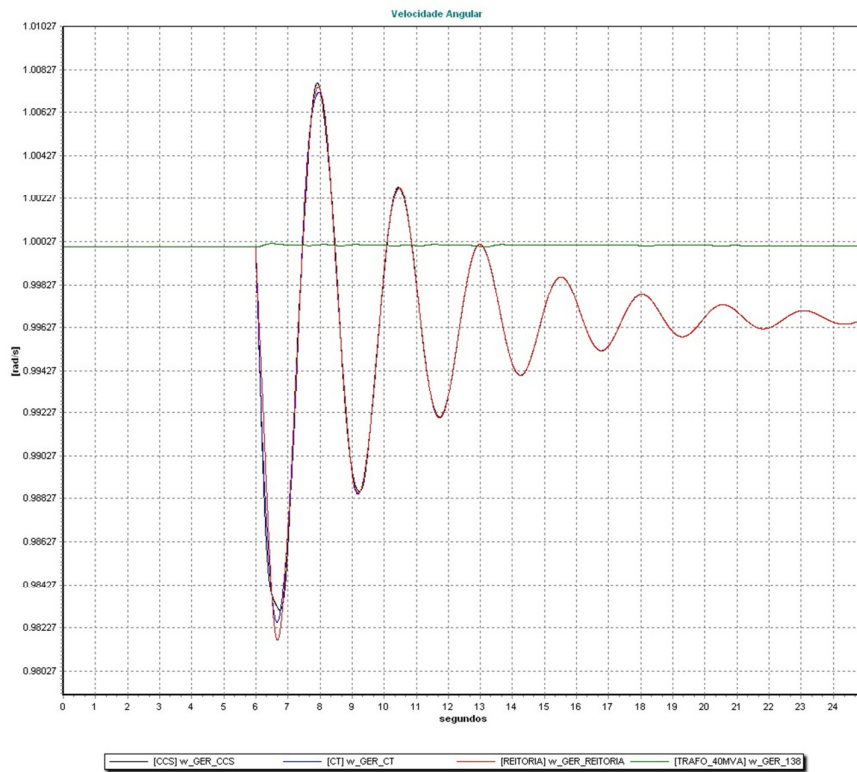


Figura 33 - Velocidade angular dos geradores

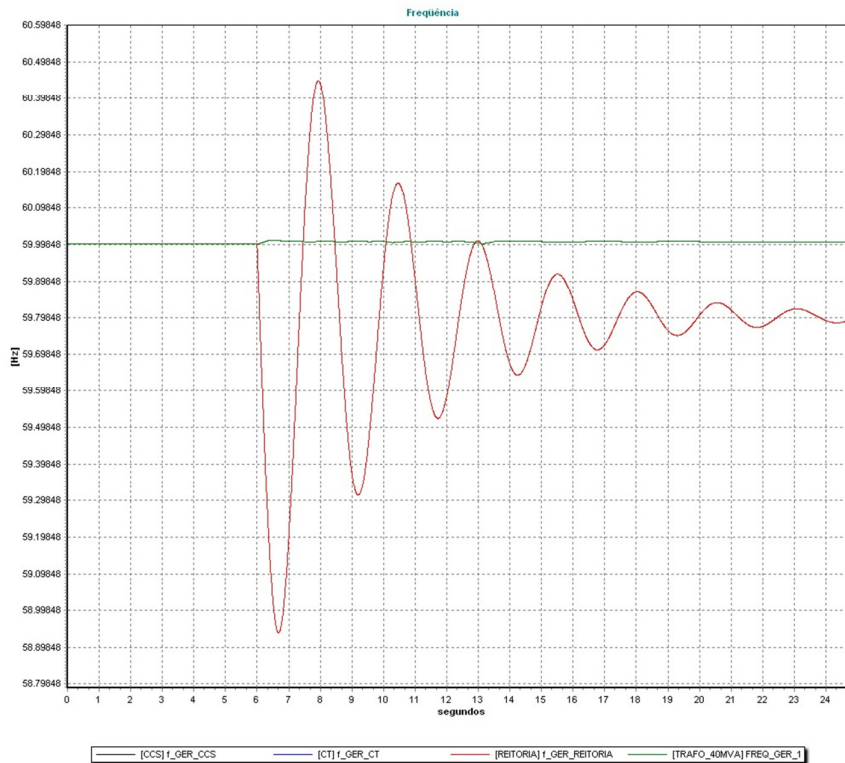


Figura 34 - Frequência dos geradores

A velocidade angular e a frequência, conforme Figura 33 e Figura 34, também apresentam comportamento dentro do esperado, variando mais intensamente e chegando a valores estáveis próximos a valores iniciais. A velocidade angular após oscilações retorna a um valor próximo a 1radiano/segundo. Já a frequência chega a variar aproximadamente 1,1 Hz e após alguns segundos de oscilação fixa-se em 59,8 Hz.

Na Figura 35 observamos que, conforme os casos anteriores, temos os módulos das tensões chegando a mesmos valores, onde as barras que antes do ilhamento estavam mais próximas da geração, após o evento, passam a obter tensões menores.

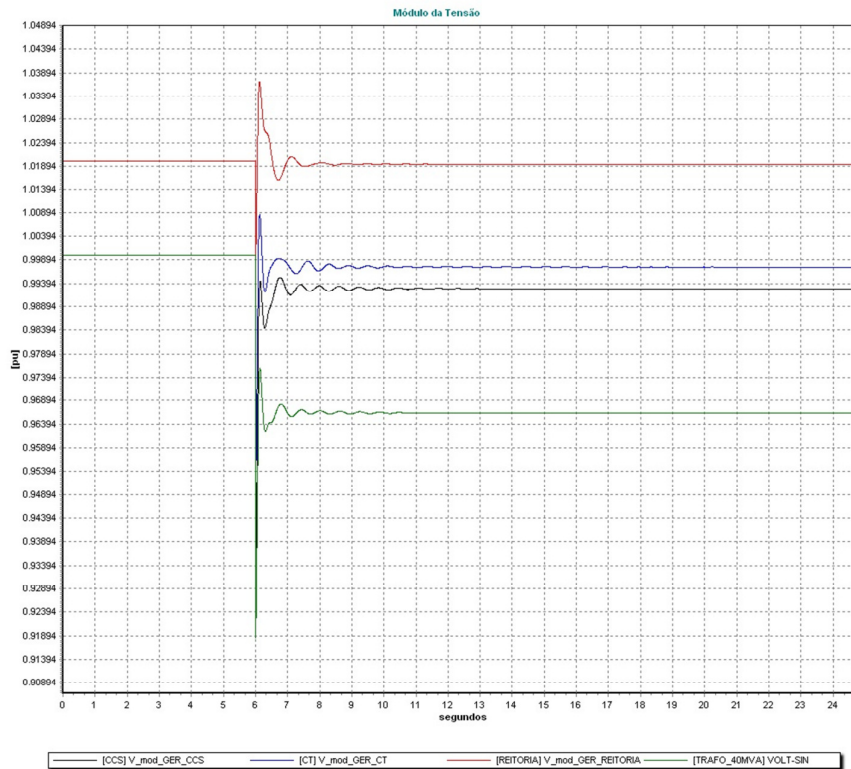


Figura 35 - Módulo da tensão nos barramentos dos geradores

4.3 – Curto-circuito no barramento principal (FUNDÃO—138)

Neste tipo de simulação foi aplicado um curto trifásico no barramento Fundão—138 no instante igual a três segundos, fazendo os três disjuntores ligados ao barramento atuarem após 200ms, com o curto se auto extinguindo neste mesmo instante e com os disjuntores se fechando no instante igual a 10s.

Para melhorar os resultados obtidos após a observação de erros persistentes, devido ao fato do gerador, que representa o restante do sistema elétrico, ficar alimentando diretamente o curto-circuito, o desenho do sistema foi modificado, de maneira a obtermos uma carga ligada a um novo barramento (Adicioal_138) junto com o gerador, onde essa barra liga-se com a barra Fundão--138 através de um DJ, conforme pode ser observado na Figura 36.

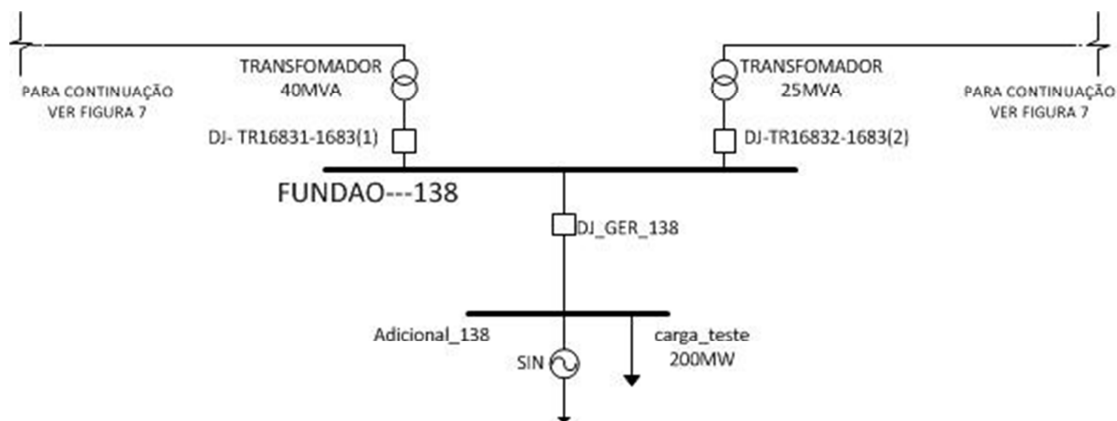


Figura 36 - Modificação realizada no Sistema para a aplicação de cc na barra FUNDAO-138

Para essa simulação a geração interna da Ilha do Fundão foi fixada em 22MW, sendo o restante da carga suprida pelo sistema externo.

Na Figura 37 é possível observar o comportamento do ângulo δ de cada gerador oscilando em relação ao gerador localizado no CCS e podemos também notar que o comportamento tanto do ângulo do gerador da REITORIA quando do CT é bem oscilatório no momento de aplicação do curto, chegando a estabilizar aproximadamente 6s depois. Ao chegar no instante de 10s é realizado o fechamentos dos três disjuntores que liga a barra FUNDAO—138 ao sistema, e nesse instante é notável o comportamento oscilatório, mas também tende ao mesmo valor inicial quando próximo de 20s. Por isso conclui-se que o sistema é estável para este tipo de evento.

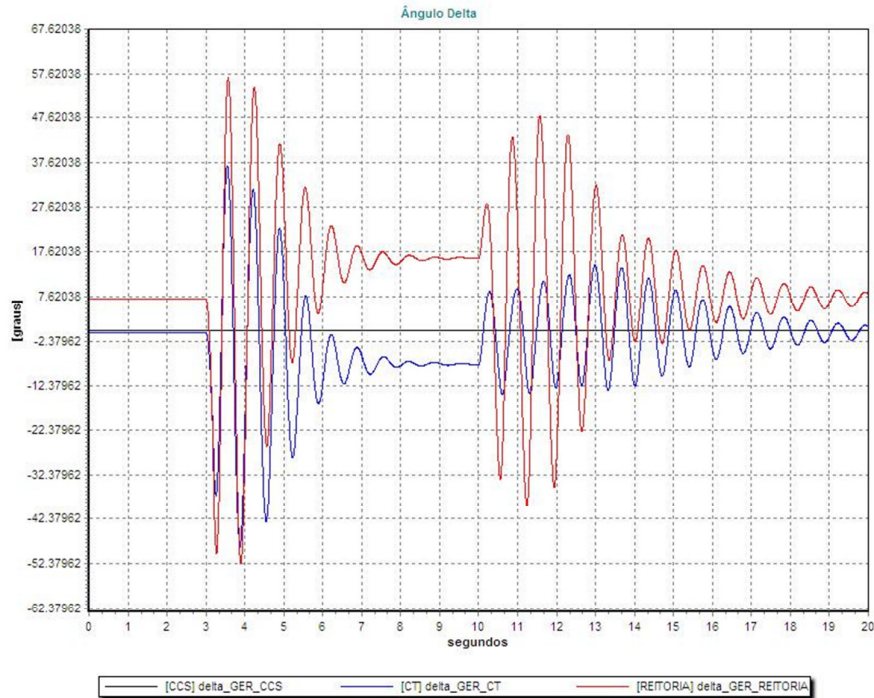


Figura 37 – Ângulo delta para cc em FUNDÃO--138 utilizando GER_CCS como referência

Na Figura 38 tem-se a potência elétrica do sistema que nos permite entender os motivos da variação do ângulo δ bem como saber se o comportamento apresenta-se satisfatório e dentro do esperado.

Percebemos que no momento do curto até o instante de sua eliminação há um aumento súbito na potência elétrica dos geradores do CT e Reitoria, chegando no segundo caso a ultrapassar o limite nominal no gerador. O gerador que representa CCS chega a funcionar como motor e o restante do sistema de geração assumiu a carga. Por ter o gerador GER_CCS mais próximo do ponto de ocorrência, vemos uma queda de potência elétrica no instante do curto. Já os outros geradores, suprem a maior parte da demanda do sistema, suprimo também, o consumo de potência do motor.

Após a eliminação do curto e abertura do disjuntor acontece um movimento oscilatório onde os geradores alocados no CT e na REITORIA oscilam em fases mais próximas e o gerador

GER_CCS oscila em fase inversa aos dois, e juntamente com GER_REITORIA, ora funciona como motor, ora como gerador.

Assim que há o fechamento dos disjuntores o sistema já se encontrava estabilizado, porém devido à atuação do Disjuntor sem qualquer verificação de sincronismo ocorre uma elevação repentina de potência ainda mais brusca, forçando uma oscilação de potência com fases mais próximas, mas ainda apresentando em pelo menos um dos geradores a alternância de funcionamento como motor e como gerador até aproximadamente o quarto ciclo.

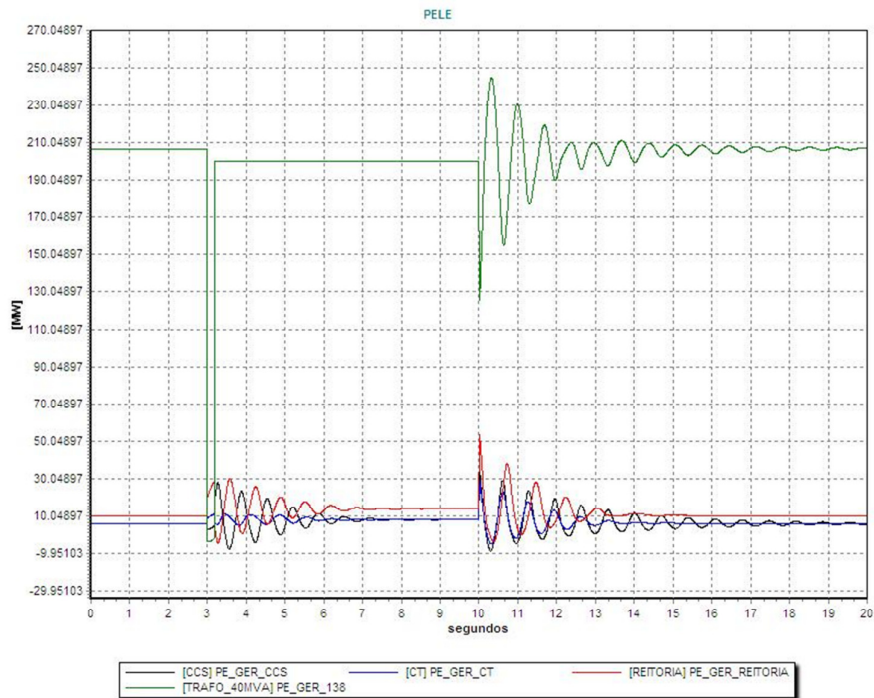


Figura 38 - Potência elétrica para curto na barra FUNDÃO -138

Nas figuras 39, 40 e 41 podemos entender melhor o efeito dessa variação súbita de potência para os geradores.

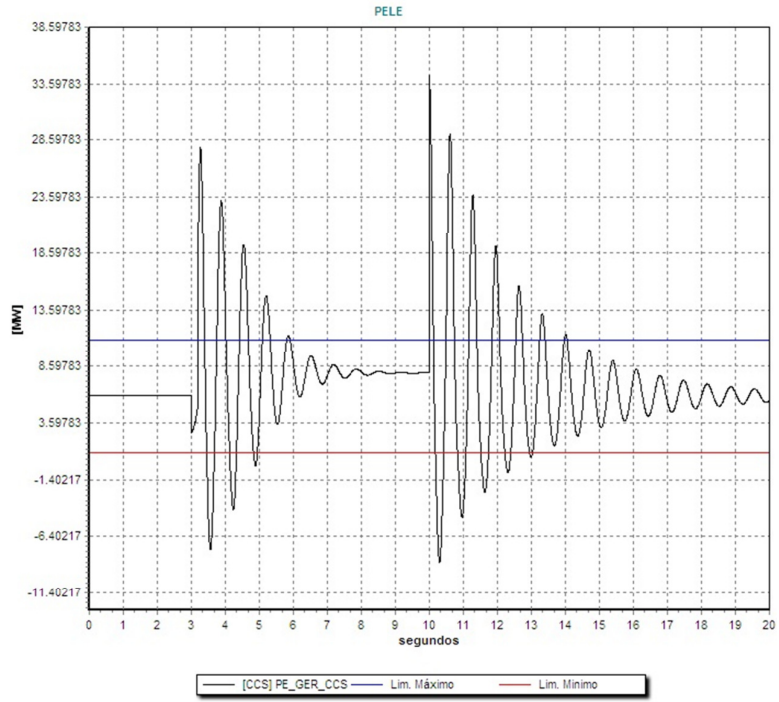


Figura 39 – Torção GERADOR_CCS

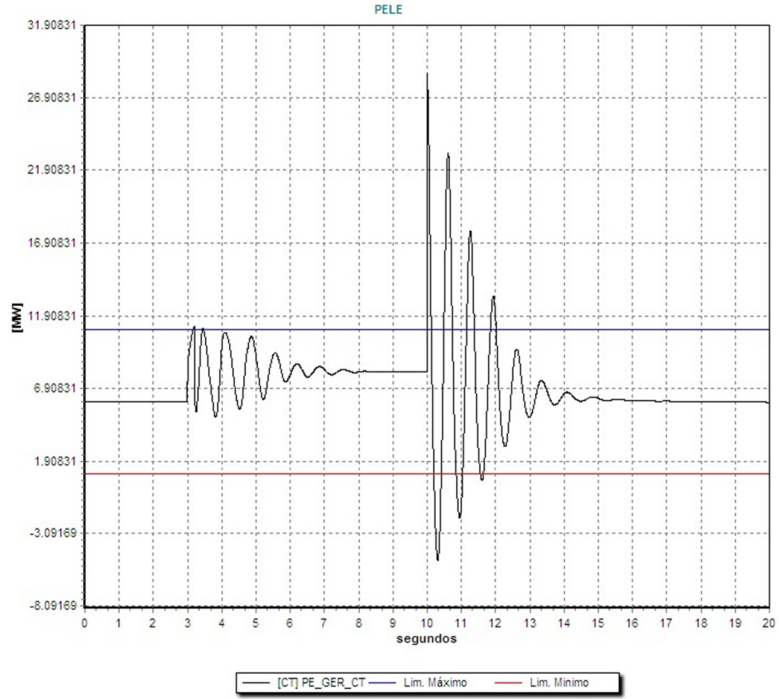


Figura 40 – Torção GERADOR_CT

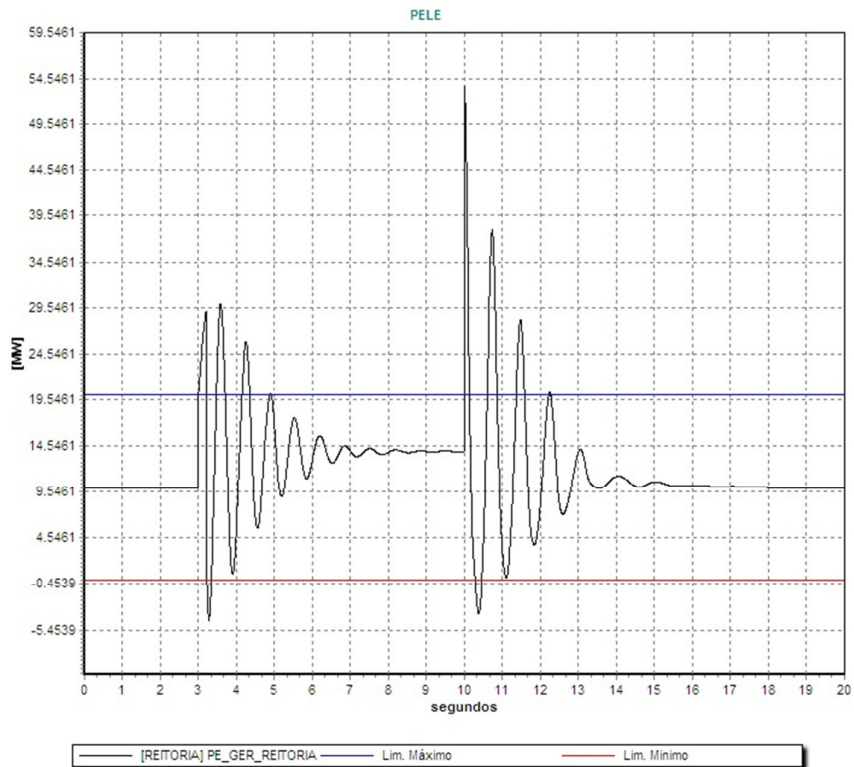


Figura 41 - Torção GERADOR_REITORIA

Na Figura 39 notamos a torção que o gerador localizado no CCS sofre, tendo em vista que tanto no momento da extinção do curto-circuito, quanto no momento de fechamento do Disjuntor os limites de potência elétrica são extrapolados.

Para o Gerador localizado na Reitoria a variação de potência é ainda mais brusca, no entanto que mesmo com gerador possuindo uma tolerância maior a ultrapassem ainda representa um esforço negativo, podendo ocasionar danos no caso de incidências sucessivas.

Já para o gerador localizado no CT temos a torção mais considerável ocorrendo no momento em que há o fechamento do disjuntor, atingindo picos bem elevados.

Para efeito de verificação tem-se na Figura 42 a potência mecânica dos geradores que sofrem pequenas variações nos momentos de ocorrência de eventos, porém permanecem praticamente constantes.

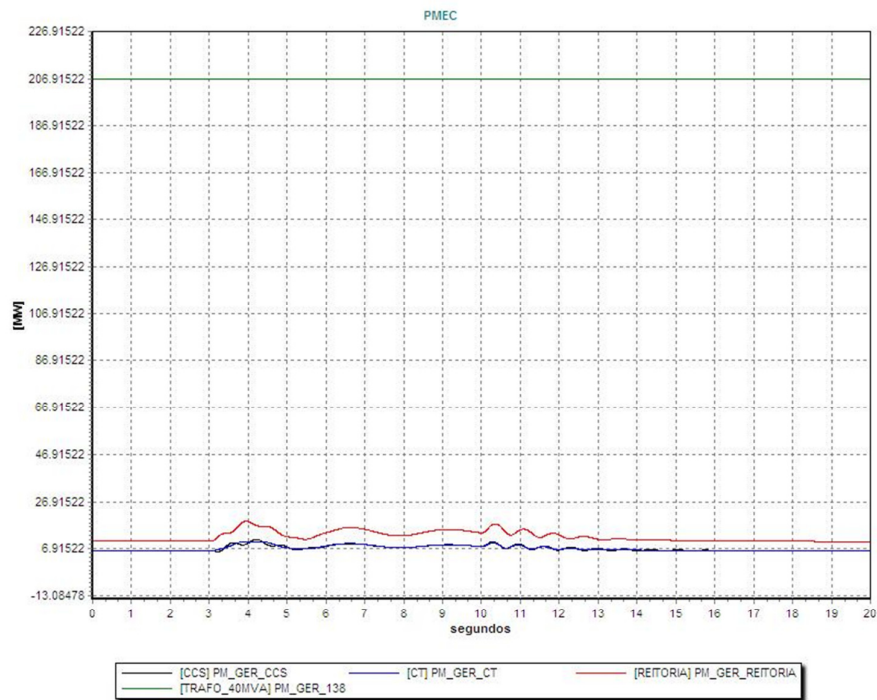


Figura 42 - Potência mecânica dos Geradores

Observando a velocidade angular dos geradores, conforme Figura 43, podemos ter uma noção real do que acontece no momento em ocorrem os eventos.

No momento em ocorre a eliminação do curto a velocidade do gerador do CCS varia inversamente com relação aos outros dois, ou seja, enquanto os dois aceleram o GER_CCS reduz a velocidade e isso ocorre até aproximadamente 7 segundos. A partir deste momento eles começam a alcançar a estabilidade, porém com o fechamento dos disjuntores ocorrem novamente variações, agora em mesmo sentido. Por volta de 11,5 segundos o Gerador Reitoria começa a inverter sua variação de velocidade com relação aos outros geradores, momento no qual o Gerador do CCS está começando a funcionar como motor. Após, entre

13 e 14 segundos a estabilidade começa a aparecer e o sistema demonstra um ajuste considerável.

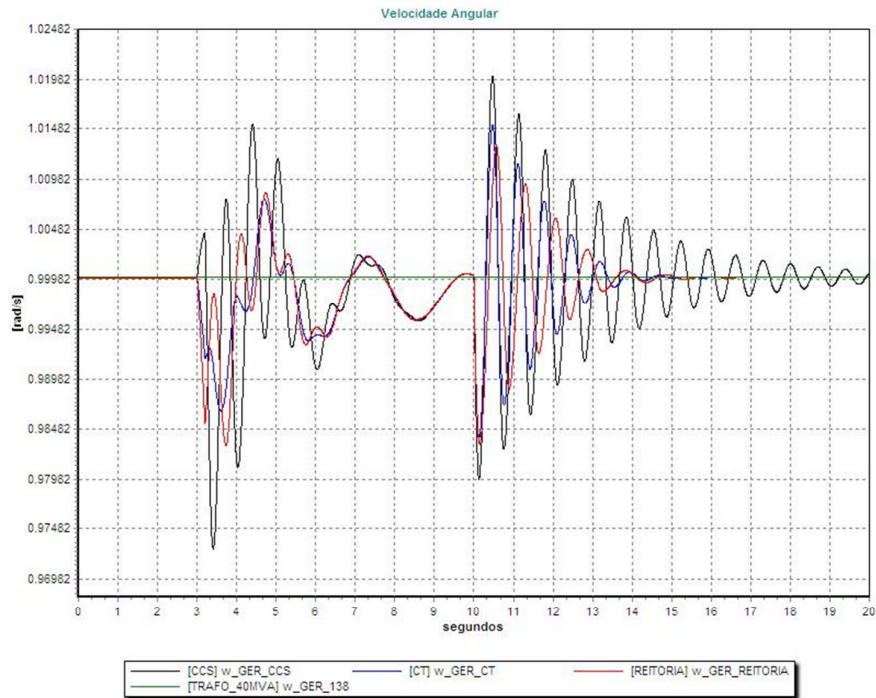


Figura 43 - velocidade angular para curto no Barramento FUNDÃO 138

Para a frequência, como pode ser observado na Figura 44 o sistema não apresenta variações inesperadas que cheguem a comprometer o funcionamento dos equipamentos mais comuns. Mesmo atingindo o pico de variação no momento de fechamento dos disjuntores (chegando a 58,4 HZ) a maior parte das oscilações não passam de 0,9 Hz de amplitude.

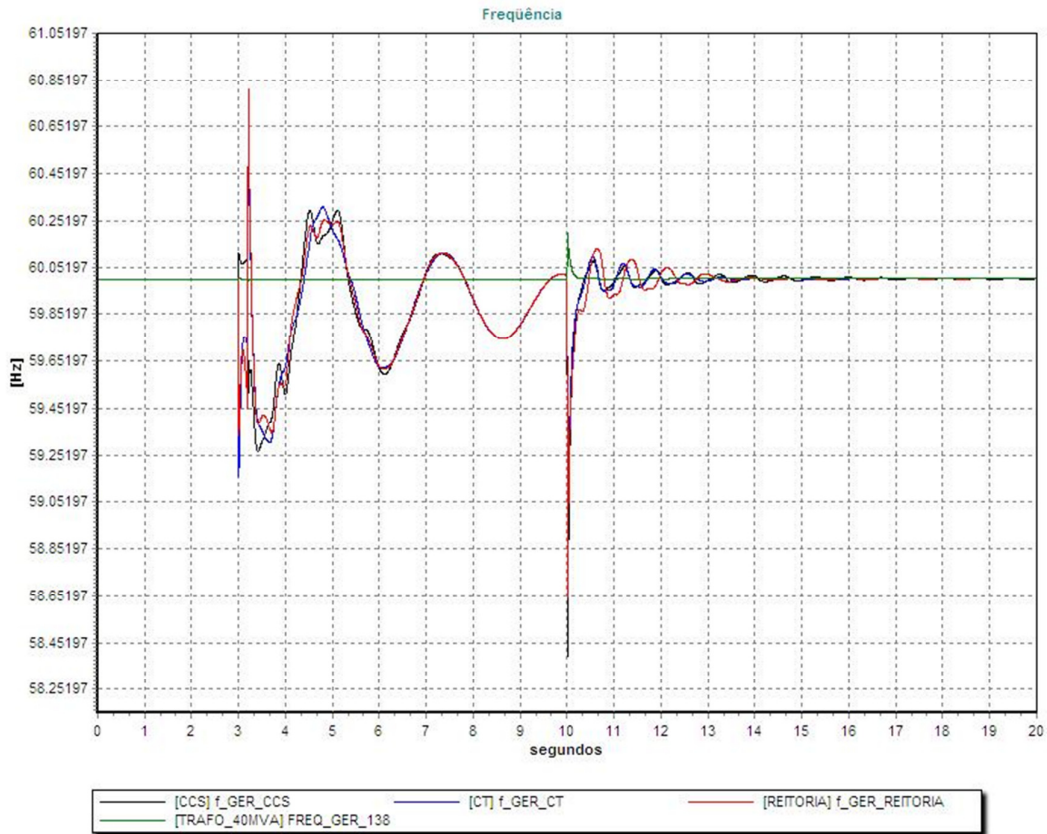


Figura 44 - frequência dos Geradores para cc em FUNDÃO—138

Notamos que na exibição das figuras o instante mais crítico ocorre no fechamento dos disjuntores e podemos dar ênfase ao fato observando a Figura 45 que traz a plotagem do módulo das tensões e permite destacar a diferença de tensão entre o barramento dos geradores e o da ilha inativa que tem tensão zero. No momento de fechamento, supondo que os disjuntores dos transformadores fechem antes, o módulo da tensão no barramento FUNDÃO—138 encontra-se bastante menor que no barramento Adicional_138 e então o fechamento é forçado sem que exista condições favoráveis para isso. Além disso, é importante lembrar que ainda devem ser verificadas a fase da tensão e frequência.

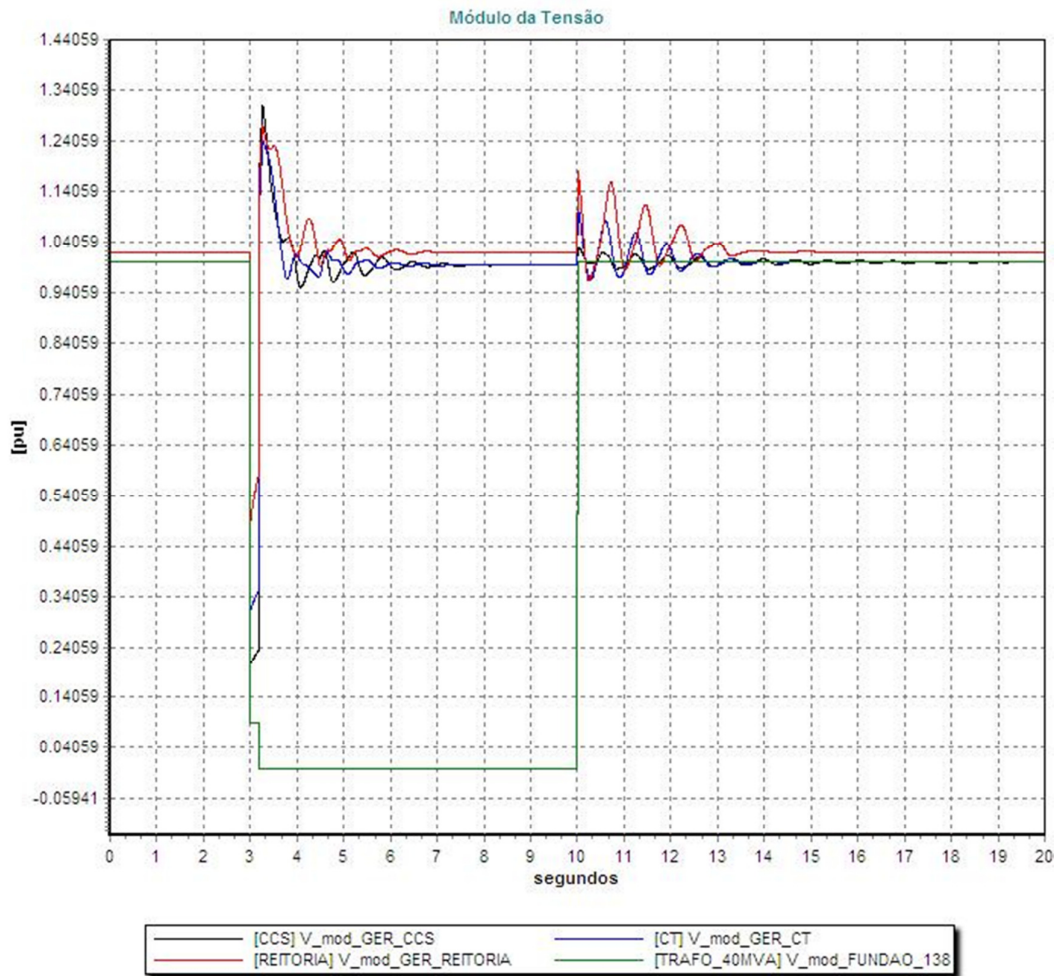


Figura 45 - módulo da tensão para cc no barramento FUNDÃO—138

Ao final, para um entendimento das condições em que os transformadores estarão sujeitos na ocorrência dos eventos, podemos observar na Figura 46 a potência aparente que passa nos transformadores e verificar que os limites são respeitados e a não ser por um transitório que não passa de 5ms, não chegando a representar risco ao Trafo, que tem as condições iniciais retomadas logo em seguida.

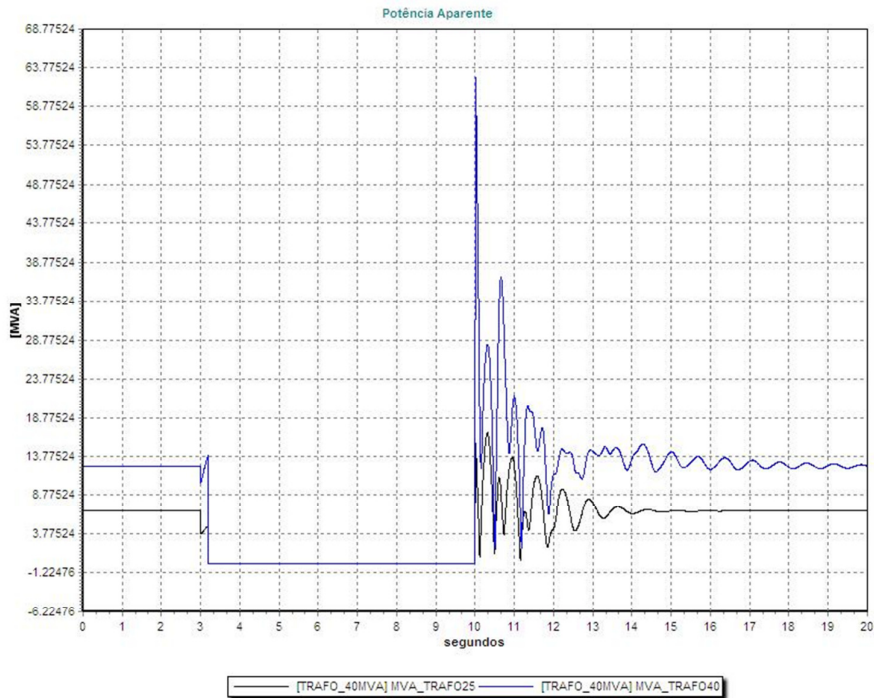


Figura 46 - Potência aparente nos transformadores

Tendo em vista que o desempenho do sistema desviou do ideal, pois no momento de fechamento do disjuntor pode-se facilmente perceber que se encontram as maiores oscilações, decidiu-se colocar um Relé 25 (Dispositivo de conferência d sincronismo) no barramento FUNDÃO—138 para que seja verificado o sincronismo com a barra Adicional_138 antes de fechar o disjuntor DJ-GER_138.

Para a instalação deste Relé foi ajustado um “pick-up” de 0,1, ou seja, que a tensão de um barramento esteja em uma margem máxima de 10% de diferença da outro e também um tempo (T_r) de 0,1 s, que representa o mínimo tempo em as tensões devem permanecer dentro desta margem estipulada. Podemos entender melhor esse procedimento na Figura 47 onde observamos uma tensão usada como referência e onde a outra deve ficar na área destacada para que haja atuação do relé e, além disso, as tensões devem permanecer nessa área pelo período de tempo estipulado, significando assim uma diferença de frequência aceitável.

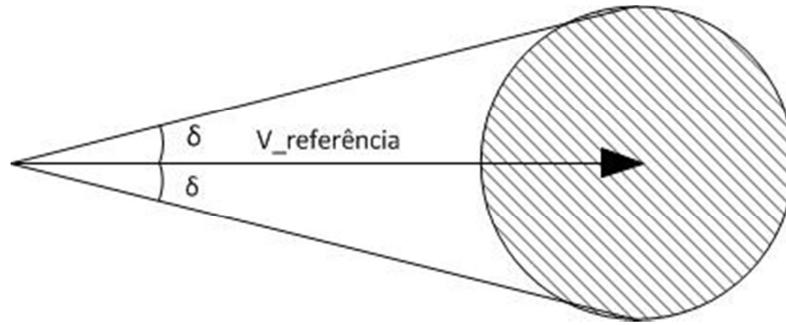


Figura 47 - forma de atuação Relé 25

Desta forma ajustando o Relé para ser acionado a partir dos 10s podemos observar nas figuras 48, 49, 50, 51 e 52 a melhoria obtida com a verificação de sincronismo entre as barras.

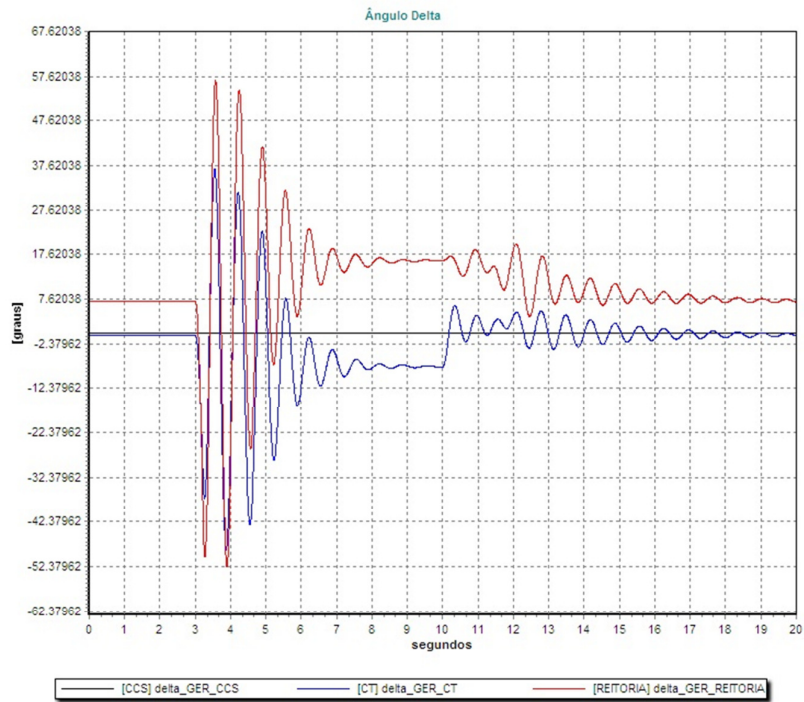


Figura 48 - Ângulo delta para Sistema com Relé 25

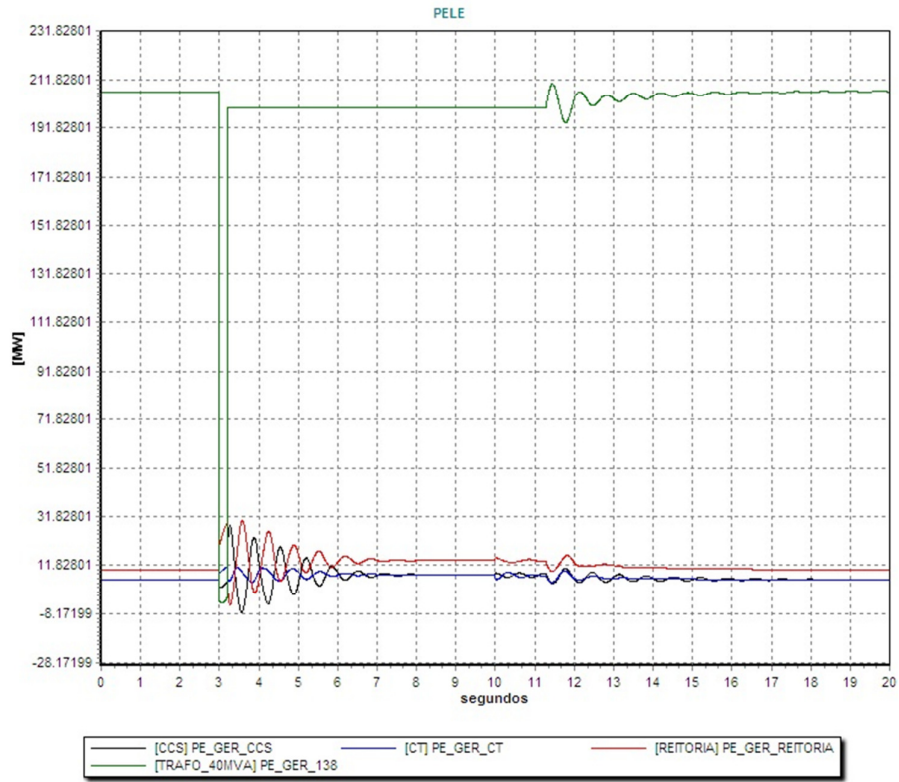


Figura 49 - Potência elétrica para sistema com atuação do Relé 25

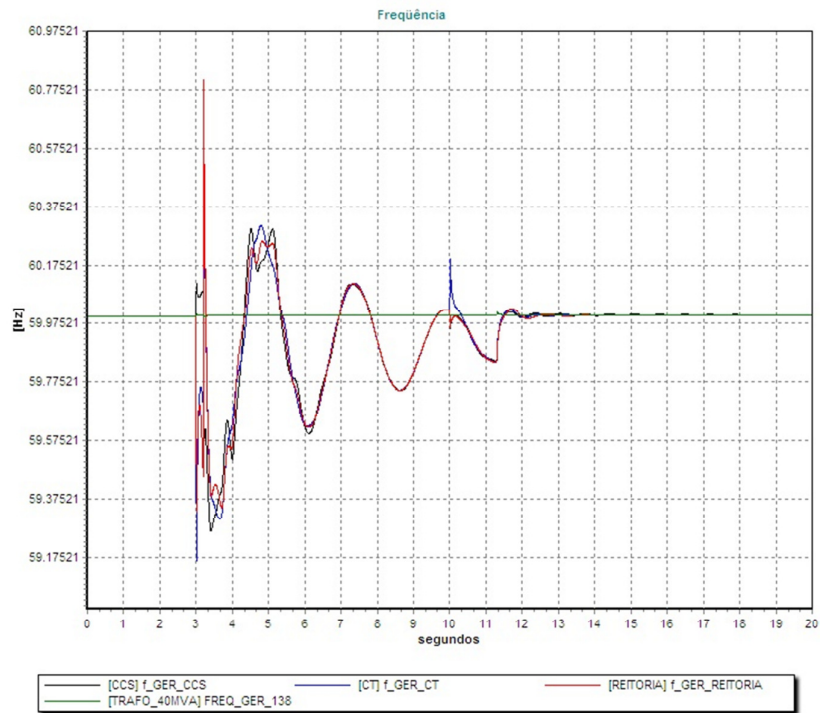


Figura 50 - Frequência para sistema com atuação do Relé 25

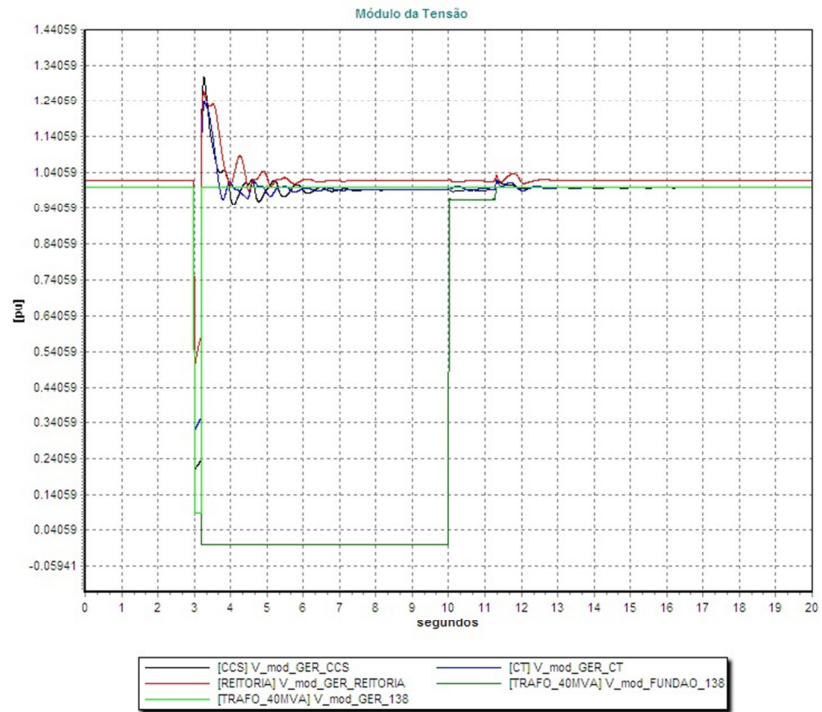


Figura 51 - módulo das tensões para sistema com atuação do Relé 25

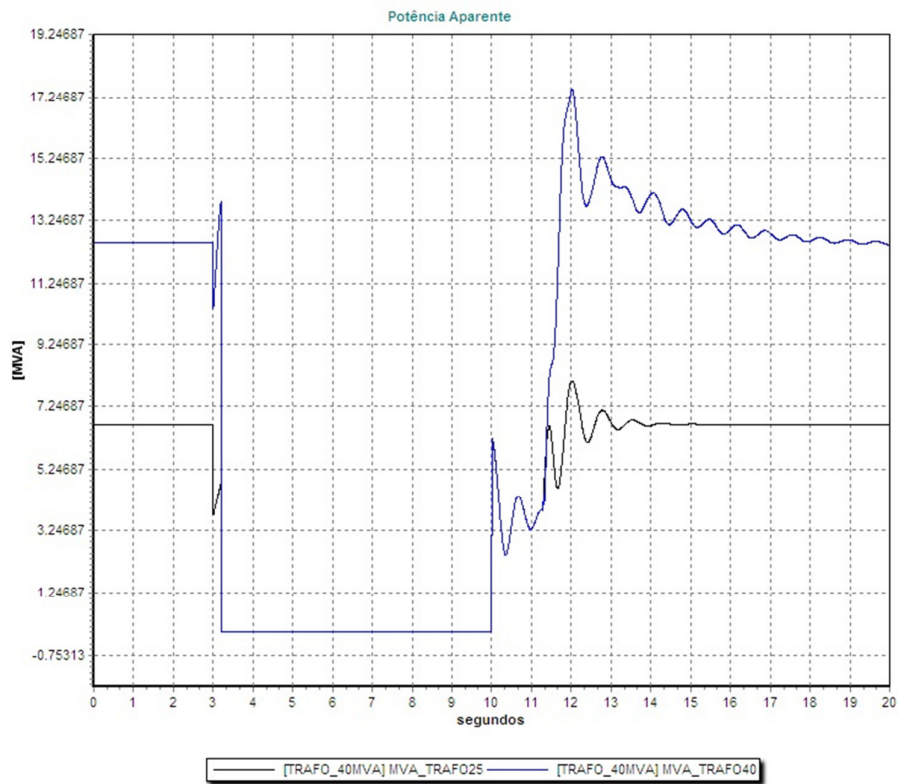


Figura 52 - Potência aparente nos transformadores para o sistema com atuação do Relé 25

A partir da observação dessas figuras, temos que é perceptível e considerável a mudança que ocorre quando fechamos o disjuntor de maneira correta. Um exemplo é o ângulo δ mostrado na Figura 48 que encontra-se com oscilações bem suaves e atingindo a estabilidade mais rapidamente. Na Figura 49 observa-se a suavidade da variação da potência elétrica, que evita a alternância de funcionamento motor-gerador e exemplifica a importância do relé 25 para o bom funcionamento do sistema. O mesmo pode ser percebido para a tensão e frequência, que atingem a estabilidade rapidamente e no momento do fechamento do disjuntor apresentam variações mínimas. Também há uma diminuição na potências aparentes que passam nos transformadores, que variam menos, chegando mais rapidamente ao valor final, não apresentando riscos ao equipamento.

Nas figuras 53, 54 e 55 tem-se a percepção da diferença que essa proteção representa para os geradores, pois agora, a partir da atuação desta, os limites de torção são respeitados com folga.

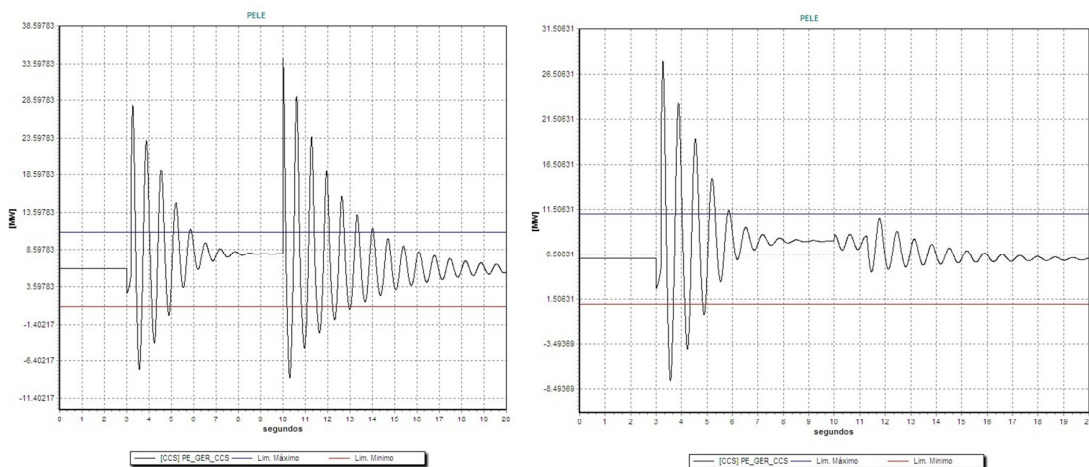


Figura 53 - Comparação da Torção do Gerador CCS antes e depois do relé 25 respectivamente

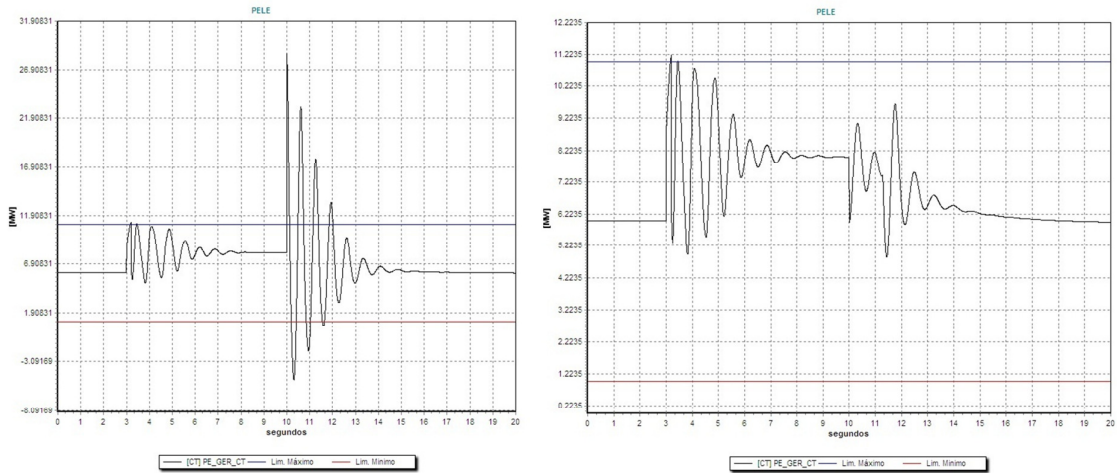


Figura 54 - Comparação da Torção do Gerador CT antes e depois do relé 25 respectivamente

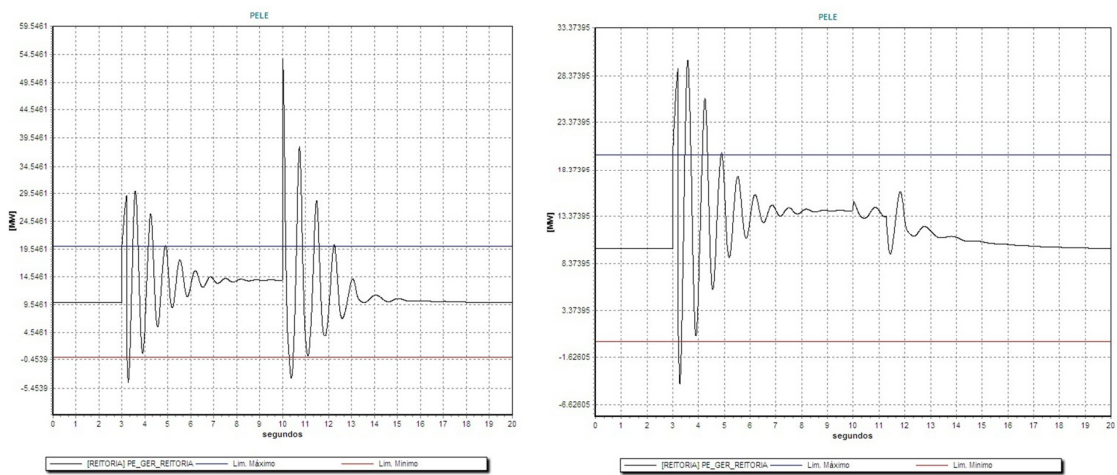


Figura 55 - Comparação da Torção do Gerador Reitoria antes e depois do relé 25 respectivamente

4.4 – Curto-circuito nas Barras dos geradores internos

Para este tópico a análise a ser realizada será baseada em um curto-circuito ocorrendo nos respectivos barramentos em que se encontram os geradores internos, a fim de observar como o sistema responde ao evento que consiste na abertura do disjuntor, eliminação do curto e fechamento do disjuntor.

As análises irão ocorrer considerando para cada gerador dois casos específicos:

1. Sistema com Intercâmbio de 6MW
2. Sistema Ilhado

4.4.1 - Gerador CCS

Para o sistema com intercâmbio de 6MW após aplicação do curto no barramento do CCS observamos que para nenhum dos outros geradores houve uma oscilação que significasse perigo para o sistema. Temos na Figura 56 uma variação de ângulo delta querendo explodir após eliminação do curto, mas com o fechamento do disjuntor encontra a estabilidade em poucos segundos, representando um sistema estável.

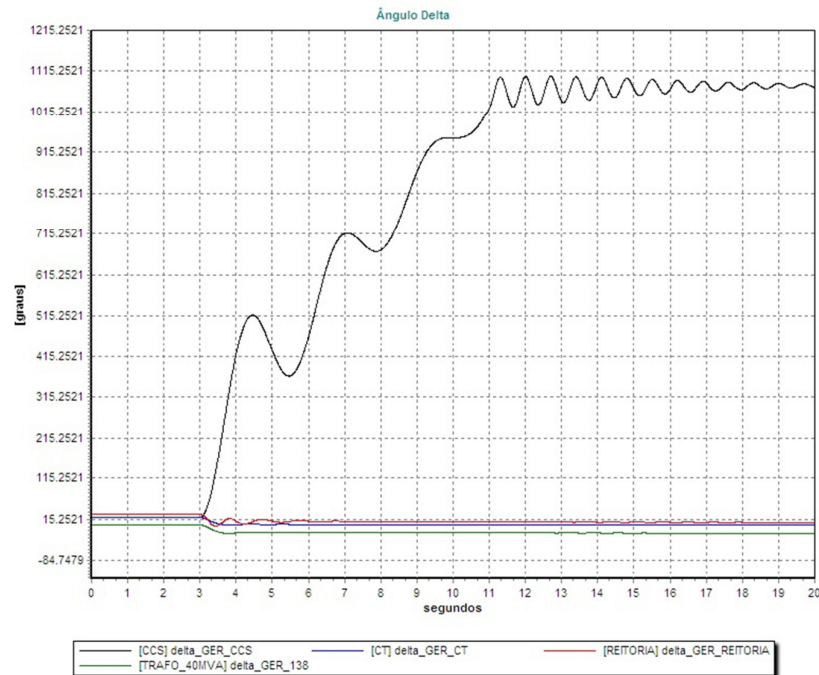


Figura 56 - Ângulo delta para curto no CCS com Intercâmbio de potência do Sistema externo

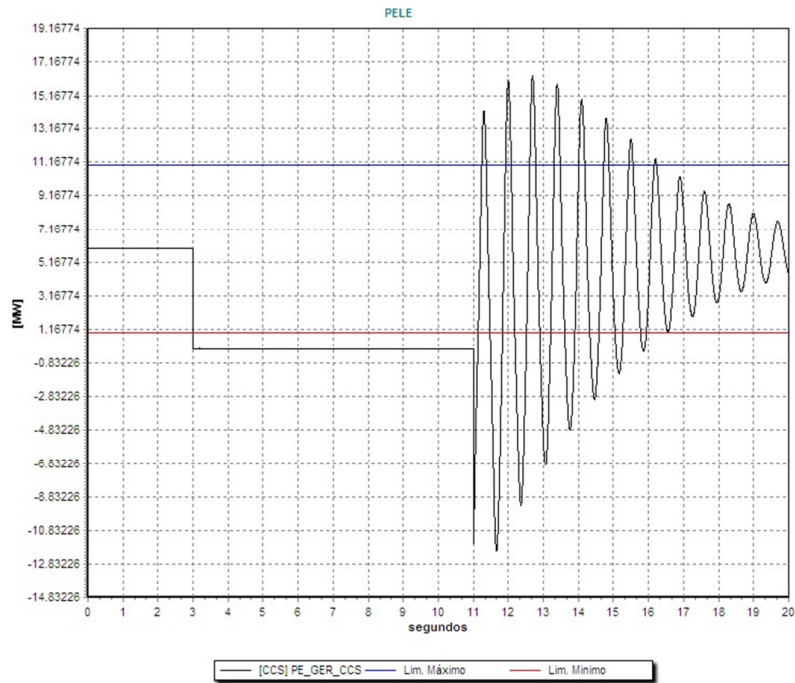


Figura 57 - Torção Gerador CCS

Embora tenhamos observado um ângulo delta atingindo a estabilidade, vemos na Figura 57 a variação de potência elétrica é bem elevada e ultrapassa os valores limite, ocasionando uma torção nociva ao rotor do gerador.

Outra grandeza a ser observada é a potência mecânica que esta compreendida na Figura 58 e demonstra uma oscilação razoável e nos permite perceber que o regulador de velocidade utilizado está lento.

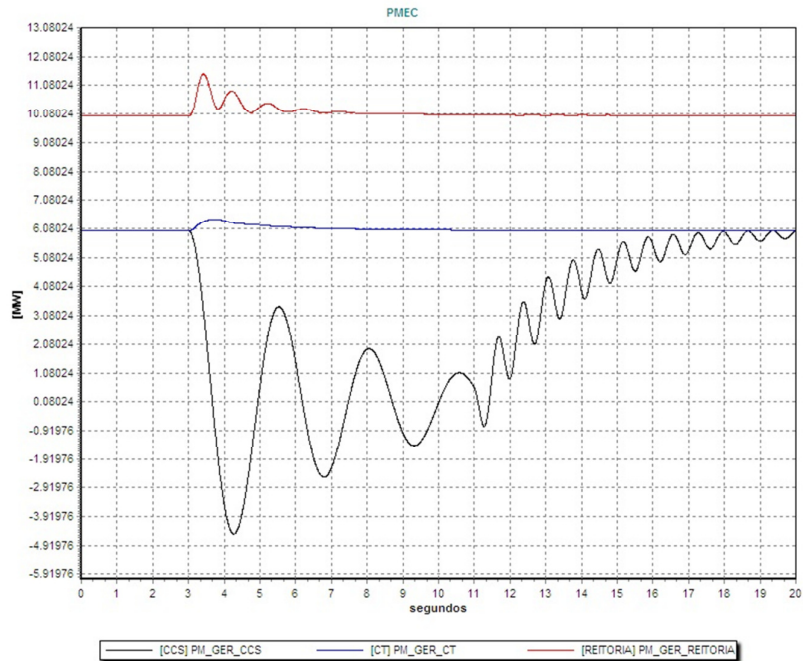


Figura 58 - Potência Mecânica para cc no Gerador CCS com Intercâmbio

Para o sistema ilhado, temos variações muito mais bruscas representando, então perigos ainda mais excessivos. Um exemplo é a excessão de potência elétrica que agora afeta os outros geradores, como mostrado na Figura 59, pois por eles gerarem mais potência, ficam mais suscetíveis às variações.

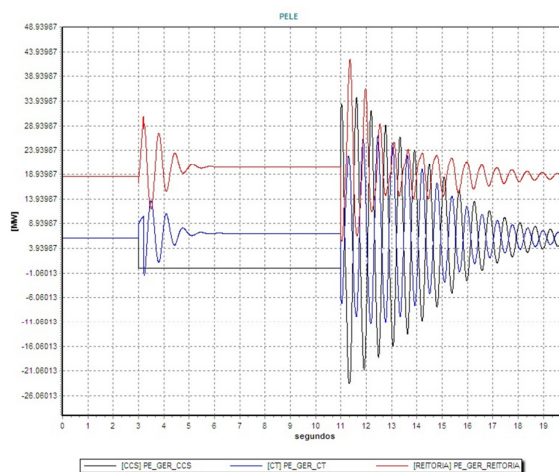


Figura 59 - Potência elétrica para cc no CCS com Ilhamento

Observamos na a potência mecânica, que demonstra uma oscilação razoável, pois no caso da Reitoria por momentos a geração atinge valores de potência acima de seu limite nominal, mas não representa perigo eminente por não passar de poucos segundos.

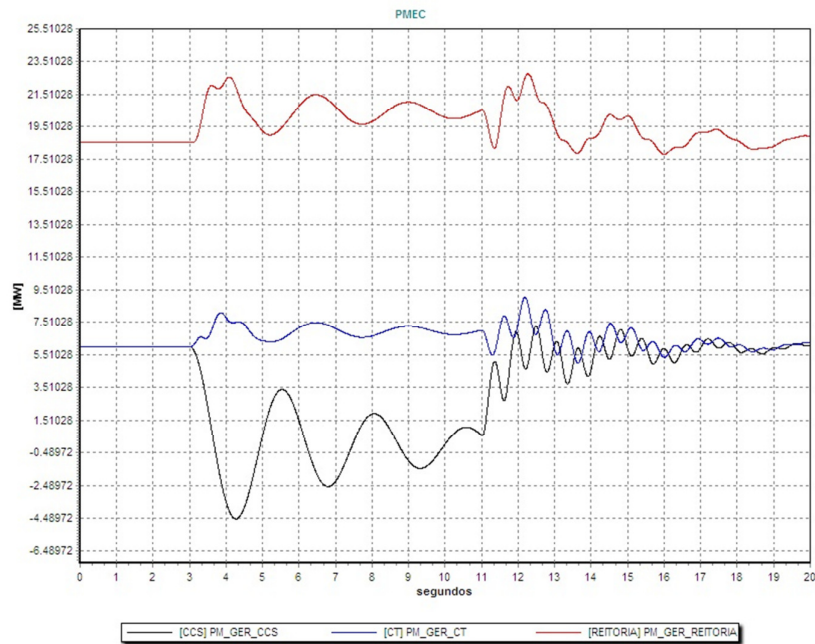


Figura 60 -- Potência Mecânica para cc no Gerador CCS com Ilhamento

Observando as tensões no barramento dos geradores percebemos que as tensões que atingem níveis mais baixos são as mais próximas da contingência e que a elevação de tensão no momento da perda do gerador CCS é brusca, significando uma possível atuação da proteção contra sobretensão, com talvez a perda de outro gerador e afetando o funcionamento e a confiabilidade do sistema.

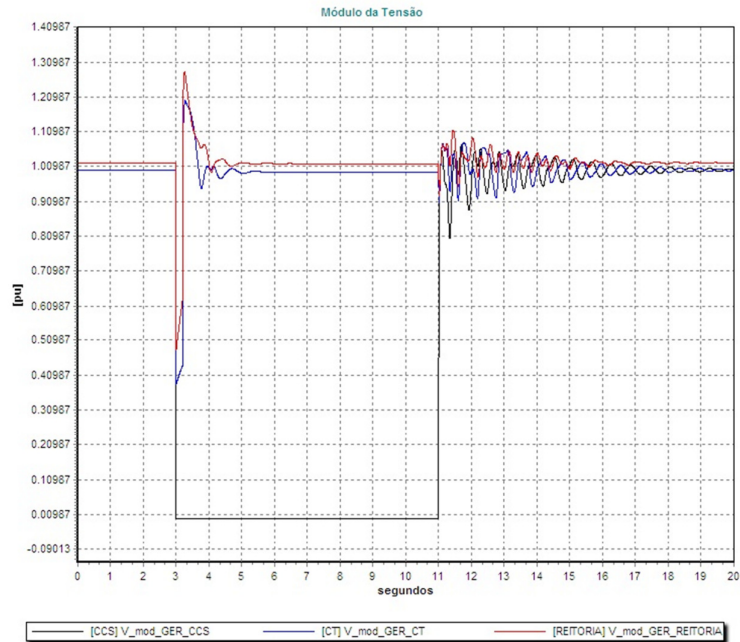


Figura 61 - tensão para cc no CCS com sistema Ilhado

4.1.2 - Gerador CT

Para uma análise mais sucinta e para dar ênfase a comparação entre os dois casos abordados, serão plotadas figuras comparativas.

Teremos então como evento a aplicação de um curto no barramento do CT seguido de desligamento e religamento do disjuntor DJ-LT_4410-16832 no instante igual a 5 s.

Tendo o sistema com intercâmbio similar ao caso anterior podemos fazer a comparação do ângulo delta para o sistema com e sem ilhamento e verificar um crescimento de oscilações, porém sem perda de estabilidade, conforme Figura 62.

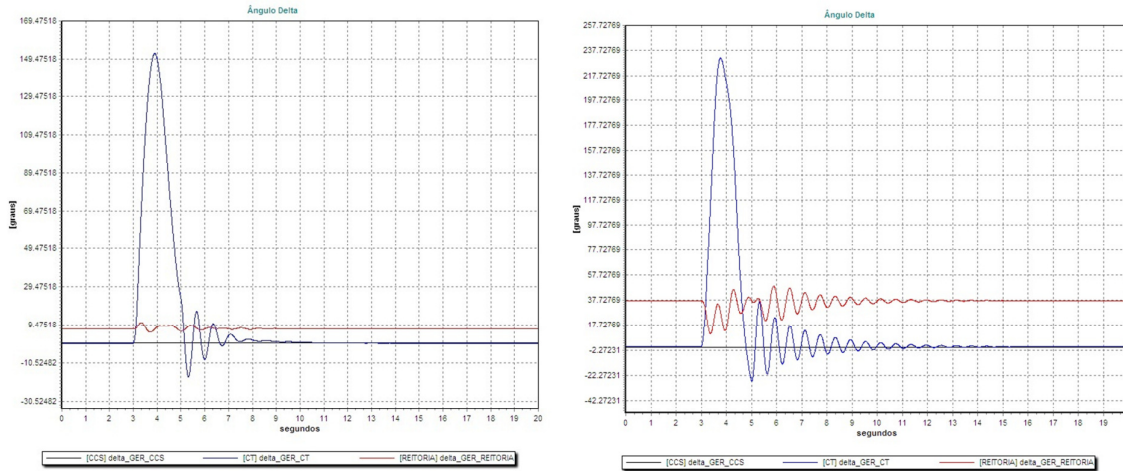


Figura 62 - Comparação de ângulo delta para cc em CT sem e com Ilhamento

Para a potência elétrica, conforme Figura 63, temos que no caso do sistema ilhado os outros geradores (CCS e Reitoria) sentem mais ao curto aplicado no CT por serem eles apenas os responsáveis por suprir a carga do sistema e para o caso da reitoria por estar gerando próximo de sua potência nominal o torna mais vulnerável. Já o gerador do CT sofre menos com o fechamento do disjuntor com o sistema ilhado, pois a diferença de tensão dos barramentos, neste caso esta mais ajustada.

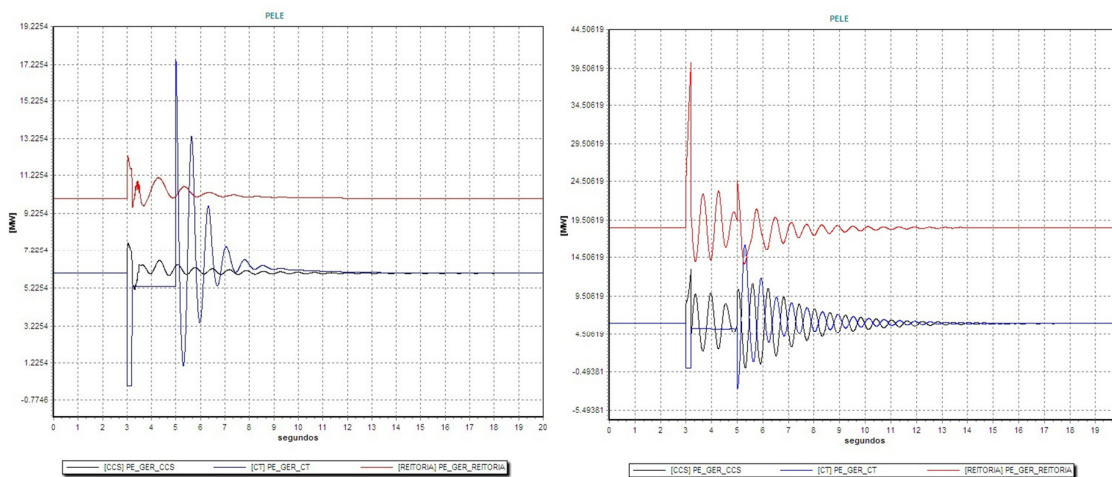


Figura 63 - Comparação PE para cc no CT sem e com Ilhamento

Observando a tensão no barramento dos geradores, vemos a diferença de comportamento d sistema com e sem ilhamento, o que permite entender o quanto um sistema ilhado necessita de melhor planejamento. Na Figura 64 temos que os geradores apresentam uma elevação de tensão mais eminente no o sistema ilhado e dependendo do ajuste da proteção o sistema pode ficar sem abastecimento de energia.

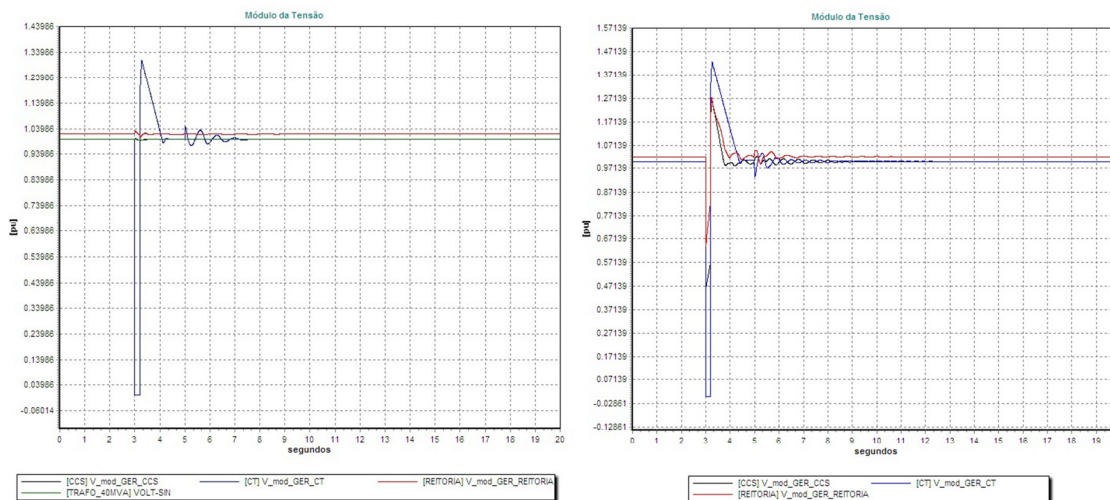


Figura 64 - Comparação de tensão para cc no CT sem e com ilhamento

4.1.3 - Gerador Reitoria

Para um curto no Gerador na Reitoria foi proposto o mesmo escopo das análises anteriores, ou seja, um caso com o sistema realizando intercâmbio de potência do sistema externo e outro com o sistema ilhado.

Para este caso será aplicado um curto circuito no barramento do gerador da Reitoria no instante de 3 segundos, seguido de eliminação do curto 200ms depois, abertura do disjuntor DJ-LT 67-Reitoria e fechamento no instante igual a 5 segundos.

Seguem as figuras 65, 66 e 67 que realizam uma comparação das grandezas para o sistema com Intercâmbio e o sistema ilhado.

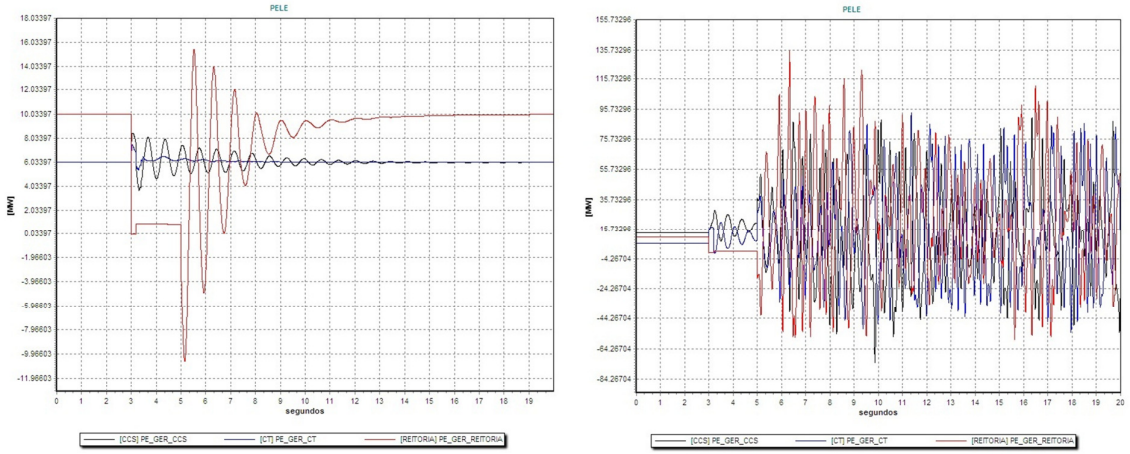


Figura 65 - Potência Elétrica para cc na Reitoria sem e com Ilhamento

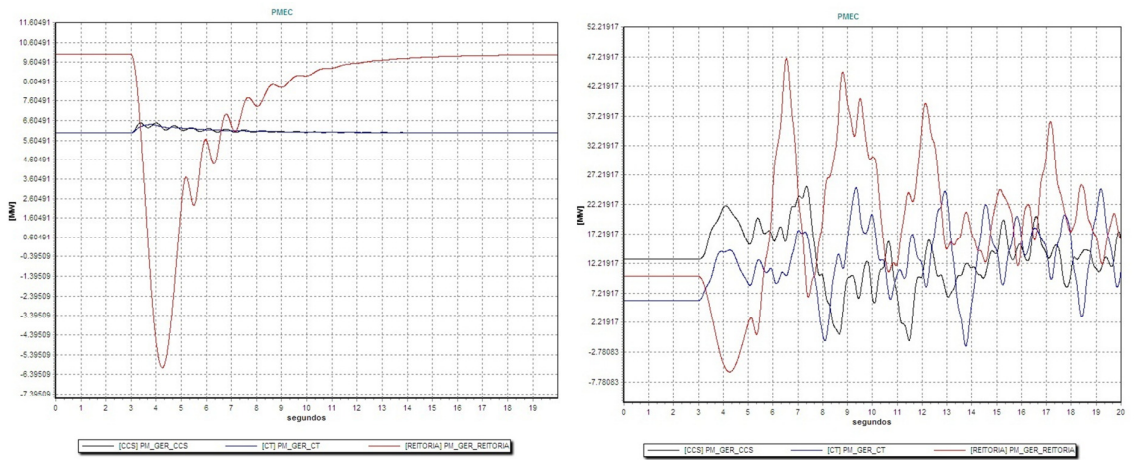


Figura 66 - Potência Mecânica para cc na Reitoria sem e com Ilhamento

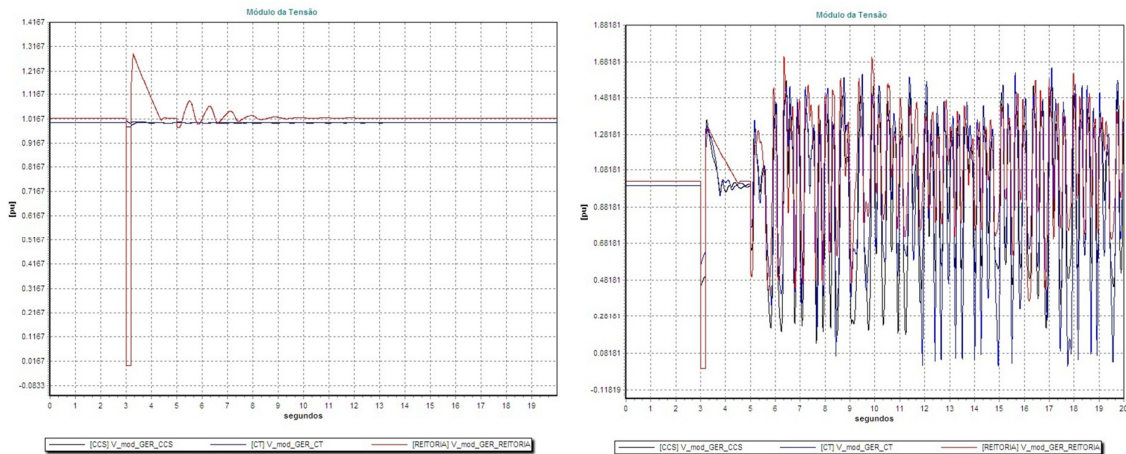


Figura 67 - tensões para cc na Reitoria sem e com Ilhamento

Percebemos que há uma diferença significativa entre as grandezas apresentadas para um sistema sem e com ilhamento, de modo a termos um sistema instável quando ocorre o evento com o sistema ilhado, tendo variações muito bruscas de potência elétrica, potência mecânica e tensão.

Notemos que, nos três gráficos, a oscilação se inicia no momento de fechamento do disjuntor, o que sugere a conclusão de que essa instabilidade se dá por haver uma ligação entre duas barras com tensões bem distintas. Visto isso, foi experimentada a adição de um relé verificador de sincronismo e os seguintes gráficos foram obtidos.

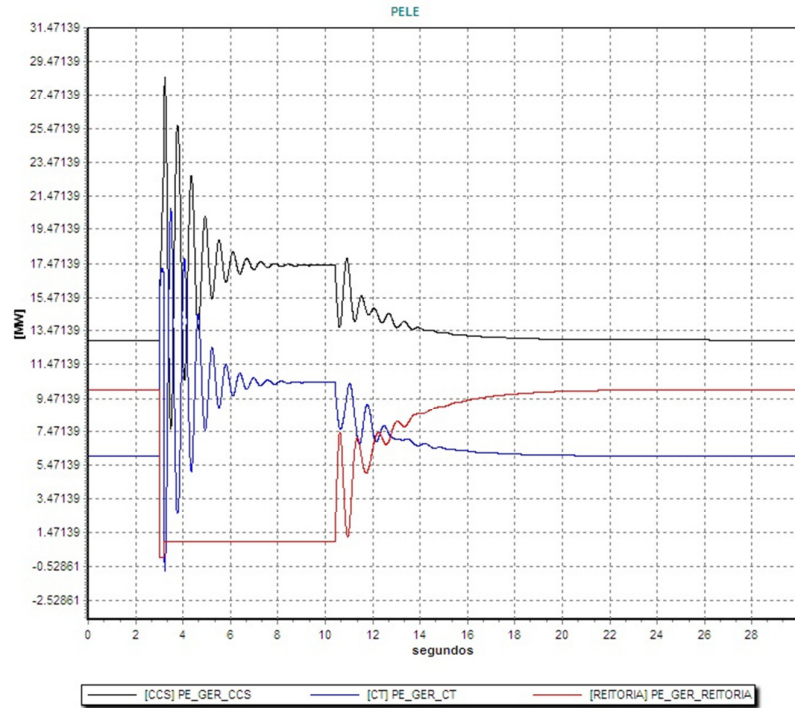


Figura 68 - Potência elétrica para cc na Reitoria com sistema Ilhado possuindo relé 25

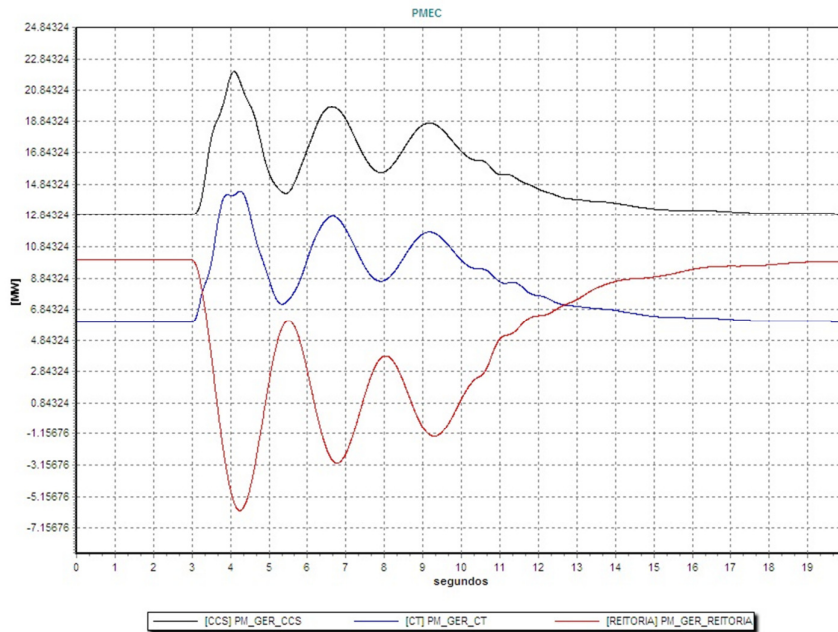


Figura 69 – Potência mecânica para cc na Reitoria com sistema Ilhado possuindo relé 25

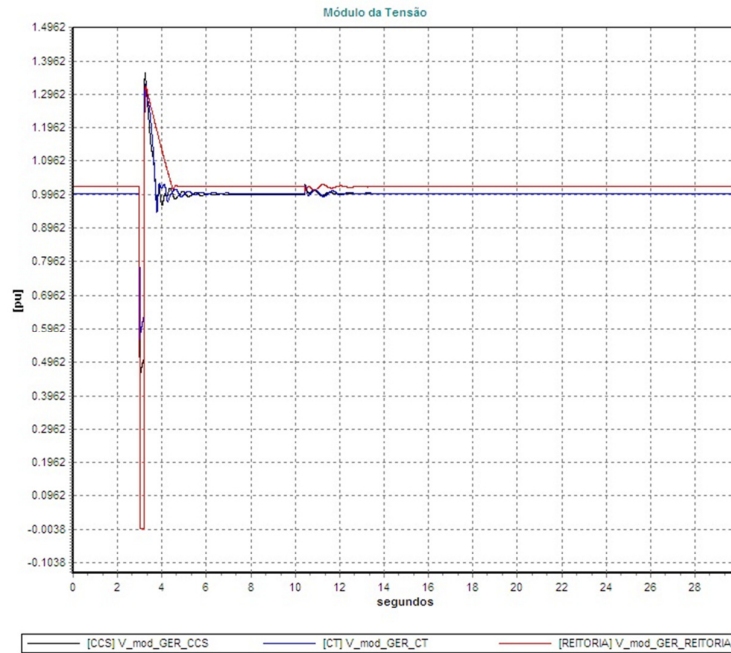


Figura 70 – Tensões para cc na Reitoria com sistema ilhado possuindo relé 25

Torna-se evidente as modificações com a aplicação de um relé de verificação de sincronismo, porém mesmo assim o sistema ainda apresenta alguns riscos quando ilhado e ocorre o curto no gerador REITORIA. Um fato já esperado, já que com a perda deste os outros geradores não são capazes de suprir toda carga. Nesta situação analisada o sistema não perde a estabilidade quando o relé 25 é utilizado, porém demonstra o risco que o sistema está sujeito se houver falha na proteção. Além disso há uma exploração da capacidade máxima dos demais geradores, fazendo-os sofrer torções durante alguns segundos.

Capítulo 5

Conclusão, trabalhos futuros e Referências

5.1 - Conclusão

Através deste trabalho pôde-se conhecer o comportamento do Sistema Elétrico da Ilha do Fundão através da simulação de determinados eventos. Portanto, para facilitar a compreensão do trabalho e tornar a conclusão mais evidente, esta será tomada em tópicos, sendo um para cada evento.

5.1.1 – Ilhamento

Através do estudo proposto e em função dos resultados obtidos, temos que o sistema se comporta de maneira satisfatória para todos os valores simulados de geração, uma vez que mesmo passando por variações, chega a estabilidade em alguns segundos, o que não afeta o funcionamento seguro do Sistema. Realizando uma análise tendo como base o Procedimento de distribuição (PRODIST), temos que até para o caso mais crítico os valores de tensão e frequência encontram-se dentro das faixas de segurança para um fornecimento satisfatório de energia. Baseado em [10] tem-se que para um funcionamento qualificado, o sistema deve possuir tensões com módulo entre 0,95 pu e 1,05pu e garantir que em regime a frequência esteja entre 59,5Hz e 60,5 Hz, podendo fugir desta faixa por no máximo 30s. Para distúrbios temos que, não exceder 66 Hz ou manter-se inferior a 56,5 Hz, pode permanecer acima de 62 Hz por 30 segundos, acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos, abaixo de 58,5 por 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos. Assim, embasado neste procedimento temos o sistema funcionando de maneira satisfatória, mesmo após o ilhamento.

Ao verificar a torção dos geradores vemos que para os casos abordados apresentam-se dentro dos limites de segurança e, portanto não representam riscos aos geradores e ao bom funcionamento do sistema, podendo classificar esse sistema como apto a funcionar ilhado.

5.1.2 – Curto-circuito no barramento Fundão--138

Para este evento temos que inicialmente para o curto aplicado e em seguida abertura e fechamento do disjuntor sem qualquer verificação, o sistema respondeu com oscilações agressivas de potência e consequentes variações do ângulo δ , assim como uma quantidade significativa de potência aparente passando pelo transformador de 40 MVA. A soma desses resultados permitiu classificar o comportamento do sistema como indesejado mesmo observando que a tensão nos barramentos e a frequência estavam respeitando os limites estipulados em [10]. Dessa forma, permitiu-se a experimentação de uma alternativa ao qual observamos uma melhora significativa, a adição de um Relé com função 25, que sensibilizou por volta de 10 s e melhorando o comportamento das variáveis e tornando o sistema apto a contornar rapidamente esta contingência.

5.1.3 – Curto circuito nos Barramentos dos Geradores

Para esta análise houve uma diferença significativa no comportamento dos geradores e do sistema em geral do caso em que o sistema funcionava com intercâmbio de potência para o caso do sistema Ilhado. Estas diferenças por serem bem significativas, tornam o sistema muito mais vulnerável a falhas quando este está sem ligação com o sistema externo e enfatiza a necessidade de um sistema de proteção mais apurado para este caso. Mesmo tendo a frequência e a tensão respeitando os limites estipulados pelo PRODIST temos um sistema ilhado vulnerável, a ponto de não suportar curto na barra dos geradores e continuar funcionando satisfatoriamente.

No caso de curto no barramento da Reitoria o sistema fica ainda mais suscetível e torna-se instável quando após a eliminação do curto há fechamento do disjuntor sem a presença do relé 25. Por outro lado, quando é adicionado o relé o sistema se estabiliza, mas mesmo dessa forma havendo uma demora no fechamento do equipamento de manobra o limite dos outros geradores é excedido de forma brusca e os expõem a torções elevadas que podem causar danos à medida que vão ocorrendo reincidências.

5.2 – Proposta de Trabalhos Futuros

Através da realização deste trabalho os questionamentos foram aflorando e novas ideias foram despertando, porém devido ao compromisso com o prazo não foi necessário realizar tudo que foi desejado.

Tendo em vista que o sistema sofrerá modificações tanto na distribuição quanto, principalmente, nas cargas, devido ao sua grande necessidade de expansão. Desta forma, fica como sugestão a realização de uma atualização do Sistema Elétrico da Ilha do Fundão bem como novas análises para esse novo quadro que está por vir. Além disso, seria interessante para fundamentar melhor um projeto de melhoria do sistema, uma análise de viabilidade econômica e de melhoria na confiabilidade do sistema.

Durante o desenvolver deste trabalho ficou claro o quanto o dimensionamento adequado da proteção faz diferença e torna-se primordial para uma durabilidade e bom rendimento de determinados equipamentos. Como o estudo e desenvolvimento da proteção não foi escopo deste trabalho, fica como oportunidade para um trabalho futuro, com o sistema já atualizado, mapeando a proteção existente e projetando eventuais melhorias.

5.3 - Referências bibliográficas

- [1] Disponível em < www.inee.org.br> Acesso em 10/02/2011 às 20:00 h
- [2] STEVERSON, Willian D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. 2.ed. São Paulo:McGraw-Hill, 1986.
- [3] Rio de Janeiro, COPPE, 2010, *Manual Simulight* (versão 2.36).
- [4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [5] OLIVEIRA, Sebastião Ércules Melo, *Notas de Aula de Estabilidade de Sistemas de potência*, Escola Politécnica, DEE – UFRJ, 2010/1
- [6] BORGES, Carmen Lucia Tancredo, *Análise de Sistemas de potência*, Rio de Janeiro: UFRJ- Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.
- [7] Disponível em <www.eletrobras.gov.br> Acesso em 10/02/2011 às 21:00 h
- [8] ANDERSON, P.M; FOUAD, A.A. *Power System and stability*. 1 ed. Iowa, 1977.
- [9] IEEE Working Group Report, “IEEE Screening Guide for Planned Steady-State Switching Operations to Minimize Harmful Effects on Steam Turbine-Generators,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1519-1521, July/August 1980.
- [10] Modulo 8- Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 2 de 01/01/2011. *Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. ANEEL.