

Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia Elétrica e Computação  
Engenharia Elétrica – Ênfase em Sistemas de Energia e Automação

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO EQUIVALENTE NO PONTO DE CONEXÃO DE  
GERADORES SÍNCRONOS DISTRIBUÍDOS SOBRE A FREQUÊNCIA DO  
SISTEMA**

São Carlos  
2014



GABRIELA CRISTINA BACICCHETTI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO EQUIVALENTE NO PONTO DE CONEXÃO DE  
GERADORES SÍNCRONOS DISTRIBUÍDOS SOBRE A FREQUÊNCIA DO  
SISTEMA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo  
como exigência parcial para obtenção do  
título de Engenheira Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo Andrade  
Ramos

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B116a      Bacichetti, Gabriela Cristina  
                 Avaliação da influência do equivalente no ponto de  
                 conexão de geradores síncronos distribuídos sobre a  
                 frequência do sistema. / Gabriela Cristina Bacichetti;  
                 orientador Rodrigo Andrade Ramos. São Carlos, .

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,

1. Geração Distribuída. 2. Sistemas Elétricos de  
Potência. 3. Perturbações. 4. Sistemas fracos. 5.  
Constante de inércia. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gabriela Cristina Bacichetti

Título: "Avaliação da influência do equivalente no ponto de conexão de geradores síncronos distribuídos sobre a frequência do sistema"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 24/11/2014,

com NOTA 6,0 (SEIS, ZERO), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Rodrigo Andrade Ramos - (Orientador -  
SEL/EESC/USP)

Mestre Camila dos Anjos Fantin - (Doutoranda - SEL/EESC/USP)

Mestre Daniel Motter - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



*Aos meus pais, que me deram incentivo e  
conforto durante toda a vida.*



## **Agradecimentos**

Agradeço a minha mãe Vera por todo o carinho e paciência a mim dedicados, durante os momentos mais difíceis, foi quem esteve segurando minha mão.

Ao meu pai Antonio por todo o sacrifício em me proporcionar educação de qualidade, além de valores éticos para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Ao meu irmão Junior, o exemplo que sempre quis seguir e quero continuar seguindo, por ser motivo de tanto orgulho e admiração para mim.

A todos meus familiares, em especial a minha avó Carmen que foi um exemplo de amor e perseverança durante toda sua vida.

Ao meu namorado Mychel que me deu amor, apoio e força nos momentos em que tive medo.

Aos meus professores durante todo meu percurso como estudante, com destaque ao meu orientador, o Prof. Rodrigo Andrade Ramos, por ter se mostrado um grande docente durante a graduação e durante a orientação deste trabalho.

Aos doutorandos Edson Luis Geraldi Junior e Tatiane Cristina Costa Fernandes que me ajudaram muito na construção deste trabalho.

À Universidade de São Paulo por me proporcionar ensino de qualidade e crescimento não só profissional, mas também pessoal.

Aos meus amigos que acreditaram no meu potencial e se orgulham de mim.



## Resumo

**BACICHETTI, G. C., Avaliação da Influência do Equivalente no Ponto de Conexão de Geradores Síncronos Distribuídos sobre a Frequência do Sistema.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

O surgimento de geradores de pequeno porte impulsionou o início da geração distribuída, estes são localizados próximos às cargas e então conectados a sistemas de distribuição ou sub-transmissão. Este tipo de geração de energia ganha mais evidência de acordo com a evolução tecnológica e consequente aumento em sua eficiência e competitividade em relação a geradores de grande porte. Com tanta visibilidade é necessário um maior controle da qualidade da energia a ser entregue ao consumidor, principalmente quando ocorre algum tipo de perturbação no sistema. Para que esse controle seja eficiente é fundamental que os sistemas em questão sejam modelados e simulados em softwares adequados, além disso, é imprescindível que essa modelagem represente de forma satisfatória o sistema real. Quando se trata de geradores distribuídos conectados a sistemas cuja inércia agregada é alta em relação ao gerador em questão, a modelagem é normalmente feita na forma de um equivalente representado por um barramento infinito. Porém, para geradores distribuídos conectados a sistemas com baixa inércia agregada é necessária uma análise detalhada para assegurar que esta mesma modelagem é a mais adequada em termos de retratar mais fielmente a realidade. O objetivo do trabalho é encontrar a modelagem mais adequada para sistemas de geração distribuída conectada a sistemas com baixa inércia agregada, e determinar o correspondente ajuste dos parâmetros do modelo equivalente para conexão de GD. Os resultados mostram que a modelagem proposta, substituindo o barramento infinito por uma máquina síncrona, foi adequada para a situação apresentada.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída, Sistemas Elétricos de Potência, Perturbações, Sistemas fracos, Constante de inércia.



## Abstract

BACICHETTI, G. C., **Evaluation of the Influence of Equivalent Connection Point of Distributed Synchronous Generators on the System Frequency**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The small generators appearance propelled the start of distributed generation, these are located near to the loads, and then connected to distribution systems or sub-transmission. This type of power generation gains more evidence according to technological progress and the consequent increase in their efficiency and competitiveness against large generators. With such visibility, a better energy quality control that is delivered to the consumer is needed, especially when some kind of disturbance occurs in the system. It is fundamental that these systems are modeled and simulated at appropriated software in order to reach its efficient control. In addition, it is essential that this model represents satisfactorily the real system. When it comes to distributed generators connected to aggregate systems whose inertia is high in relation to the generator in question, the modeling is usually done in the form of an equivalent represented by an infinite bus. However, for distributed generators connected to systems with low aggregated inertia, detailed analysis is required to ensure that this same model is the most appropriate in terms of more accurately portray reality. The aim of the work is to find the most suitable model for distributed generation connected to systems with low aggregated inertia systems and to determine the corresponding parameters adjustment of the equivalent model for connecting GD. The results show that the proposed model by replacing the infinite bus for a synchronous machine, suited the presented situation.

**Keywords:** Distributed Generation, Electric Power Systems, Disorders, Weak systems, Constant of inertia.



## **Lista de Figuras**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Diagrama unifilar esquemático de um SEP convencional.....   | 1  |
| Figura 2.1 – Corte transversal da máquina síncrona de dois polos (extraído de [6])...                                | 6  |
| Figura 2.2 – Representação de máquina de polos salientes, à esquerda e polos lisos, à direita (extraído de [7])..... | 7  |
| Figura 2.3 – Diagrama de blocos para representação do regulador de velocidade...                                     | 10 |
| Figura 2.4 – Diagrama de blocos para representação do regulador de tensão.....                                       | 11 |
| Figura 2.5 – Diagrama de blocos para representação do modelo geral.....  | 11 |
| Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema estudado.....  | 13 |
| Figura 3.2 – Sistema de GD conectado a barramento infinito.....  | 15 |
| Figura 3.3 – Sistema de GD conectado a uma máquina síncrona.....   | 17 |
| Figura 4.1 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 1.....   | 20 |
| Figura 4.2 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 2.....   | 20 |
| Figura 4.3 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 3.....   | 21 |
| Figura 4.4 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 4.....   | 21 |
| Figura 4.5 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 5.....   | 23 |
| Figura 4.6 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 6.....   | 23 |
| Figura 4.7 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 7.....   | 24 |
| Figura 4.8 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 8.....   | 24 |
| Figura 4.9 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 6 em 25 segundos.....                          | 25 |
| Figura 4.10 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 9.....  | 26 |
| Figura 4.11 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 10.....                                       | 27 |
| Figura 4.12 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 11.....                                       | 28 |
| Figura 4.13 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 12.....                                       | 28 |
| Figura 4.14 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 13.....                                       | 29 |



## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

|         |  |
|---------|--|
| ATP     | <i>Alternative Transient Program</i>   |
| GD      | Geração Distribuída  |
| M1      | Máquina Síncrona 1   |
| M2      | Máquina Síncrona 2   |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| p.u.    | Por Unidade  |
| SEP     | Sistemas Elétricos de Potência   |



# Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                       | 1  |
| 1.1. Proposta do trabalho.....                           | 3  |
| 1.2. Estrutura da Monografia.....                        | 3  |
| 2. ASPECTOS RELACIONADOS À MODELAGEM DE GD .....         | 5  |
| 2.1. Conexão Síncrona .....                              | 5  |
| 2.2. Gerador Síncrono .....                              | 5  |
| 2.2.1. Descrição e princípio de funcionamento .....      | 6  |
| 2.2.2. Modelo do Gerador Síncrono.....                   | 8  |
| 2.3. Modelo do regulador de velocidade .....             | 9  |
| 2.4. Modelo do regulador de tensão .....                 | 10 |
| 2.5. Modelo geral .....                                  | 11 |
| 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ESTUDADO .....                  | 13 |
| 3.1. O software ATP.....                                 | 13 |
| 3.2. Equivalente na forma de um barramento infinito..... | 14 |
| 3.3. Sistema fraco .....                                 | 16 |
| 3.4. Questionamentos .....                               | 16 |
| 3.5. Equivalente como modelo clássico .....              | 16 |
| 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....                         | 19 |
| 4.1. Barramento infinito.....                            | 19 |
| 4.2. Modelo clássico .....                               | 22 |
| 4.3. Simulações com variação de estatismo (R) .....      | 22 |
| 4.4. Simulações com variação de inércia.....             | 26 |
| 5. CONCLUSÕES.....                                       | 31 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                         | 33 |
| APÊNDICE – DADOS DO SISTEMA SIMULADO.....                | 35 |



## 1. INTRODUÇÃO

---

Inicialmente, os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) se resumiam a geração, transmissão e distribuição de energia, conforme ilustra a figura 1. Porém essa configuração usual onde predominam grandes centrais fornecedoras de energia elétrica vem sendo questionada quanto a sua eficácia, custo e seus impactos ambientais. O fato da matriz energética do planeta ser, em sua maior parte, dependente de matérias-primas finitas estimula o surgimento de meios alternativos na produção de energia elétrica, mais limpos e com recursos renováveis.

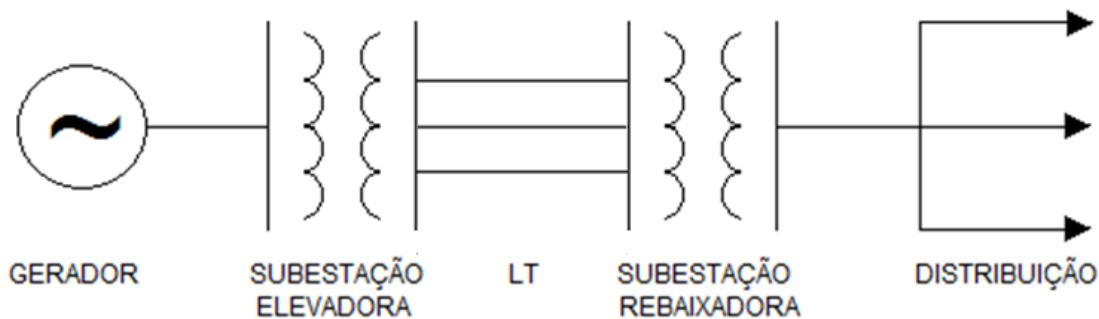


Figura 1.1 - Diagrama unifilar esquemático de um SEP convencional

Na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, quanto maior a distância dos consumidores, maiores são as perdas elétricas, sem contar as possíveis perdas durante a fase de geração de energia. As perdas elétricas somadas aos custos ambientais, econômicos e sociais de se construir e manter grandes matrizes produtoras de energia elétrica impulsionam o surgimento de novas fontes produtoras de energia, como, por exemplo, os aproveitamentos solares, eólicos, das marés e biomassa (em especial o bagaço de cana). [1]

Diante deste contexto surge o conceito de geração distribuída, ou seja, pequenos geradores começam a ser instalados próximos aos centros consumidores, conectados ao sistema de distribuição. O PRODIST define geração distribuída (GD)

como sendo geração de energia elétrica, de qualquer potência, conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo NOS [2]. Esta é, portanto, a definição adotada por esse trabalho.

Muito antes que a GD fosse regulamentada como tal, na primeira metade do século XX, praticamente toda a energia industrial era gerada localmente, porém a partir da década de quarenta tornou-se mais viável economicamente utilizar a energia proveniente de centrais elétricas de grande porte, com isso o setor foi perdendo estímulo de crescimento. Não levaria muito tempo para que as crises do petróleo e a preocupação com o uso desenfreado de matérias-primas não renováveis, como citado no início do texto, trouxessem novamente a GD em destaque. [3]

O avanço no reconhecimento da GD como possível fonte de geração de energia ocorreu quando a mesma foi mencionada na Lei 10.848/04, em 2004. Atualmente, O PRODIST é responsável pela normatização e padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, incluindo a GD. [4]

Cada vez mais os sistemas de GD se tornam competitivos em relação aos sistemas de grande porte, devido principalmente ao avanço da tecnologia. Dentre as principais vantagens no uso deste tipo de geração distribuída, de acordo com [5] e [6], pode-se citar:

- Qualidade e confiabilidade da energia entregue ao consumidor;
- Redução na emissão de gases poluentes a atmosfera, visto que as fontes de energia podem ser as mais diversas;
- Custo e tempo reduzidos para a construção de uma unidade de GD;
- Localização próxima à carga, diminuição dos custos na implementação de linhas de transmissão e das perdas associadas ao transporte de energia elétrica.

Visto que a GD ainda é uma forma de obtenção de energia elétrica recente, é necessária uma modelagem correta da mesma, para que sejam feitos os estudos necessários. Quando se trata de sistemas de grande porte conectados ao

gerador distribuído a modelagem é conhecida. Este trabalho vem como um questionamento sobre se essa modelagem é adequada quando os sistemas conectados tem pequeno porte, a definição utilizada para sistemas de pequeno porte conectados ao gerador distribuído é a de sistema fraco, que será explicado ao longo do texto.

### **1.1. Proposta do trabalho**

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso são:

- i) Realizar simulações com o modelo equivalente de um sistema de geração distribuída, utilizando uma carga conectada a uma linha que será chaveada em determinado tempo.
- ii) Encontrar a melhor modelagem para casos onde a conexão da GD com o sistema é fraca.
- iii) Ajustar os parâmetros do modelo equivalente escolhido de modo a representar melhor a realidade.

### **1.2. Estrutura da Monografia**

O texto está organizado de maneira a fornecer os conceitos necessários à compreensão dos estudos realizados. A estrutura completa do trabalho de conclusão de curso está descrita nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: É apresentada uma revisão dos aspectos relacionados à modelagem da GD, ressaltando o uso de conexão assíncrona em países do exterior e o potencial brasileiro em produção de GD com conexão síncrona. É apresentada também a modelagem dos elementos utilizados no trabalho, são eles: o modelo do gerador síncrono, o modelo do controlador de excitação (controlador de tensão) e o modelo do controlador de velocidade.

Capítulo 3: Este capítulo apresenta a proposta do trabalho bem como as considerações iniciais do mesmo, mostrando a modelagem como barramento infinito, inicialmente utilizado, e os posteriores questionamentos sobre sua validade.

Capítulo 4: Neste capítulo são apresentadas todas as simulações executadas ao longo do trabalho e as respectivas interpretações para cada uma delas.

Capítulo 5: São discutidas as principais conclusões obtidas com as simulações mostradas no capítulo anterior, bem como a perspectiva de trabalhos futuros.

## 2. ASPECTOS RELACIONADOS À MODELAGEM DE GD

---

Neste capítulo serão descritos o modelo do gerador utilizado na representação do gerador distribuído e os modelos dos reguladores de velocidade e de tensão conectados ao mesmo.

### 2.1. Conexão Síncrona

O Brasil possui grande potencial na conexão de GD síncrona, ou seja, são usualmente utilizadas máquinas síncronas operando como geradores síncronos conectados diretamente às linhas de distribuição, a exemplo disso têm-se as PCHs, e o uso da biomassa. A GD permite, por exemplo, que se use os resíduos de processos como a biomassa da cana de açúcar como combustível para geração de energia de forma bastante eficiente. [3]

De acordo com a resolução nº 394 - 04-12-1998 da ANEEL – Agência nacional de Energia Elétrica, PCH (Pequena Central Hidrelétrica) é toda usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1MW e inferior a 30MW. Além disso, a área do reservatório deve ser inferior a 3km<sup>2</sup>. Os geradores utilizados nas PCHs podem ser tanto síncronos quanto assíncronos, porém os síncronos são mais utilizados. [7]

Os geradores de indução (assíncronos) são normalmente utilizados para potências menores que 1MW, não possuem excitação própria e apresentam fator de potência mais baixo, necessitando possível instalação de bancos de capacitores. As vantagens do uso dos geradores síncronos são sua maior eficiência e fator de potência mais elevado além de proporcionarem melhor controle de potência e de tensão fornecidos. Os lados negativos são que estes precisam de um sistema de excitação do campo do rotor, reguladores de velocidade e de tensão, resultando em um custo maior. [8]

### 2.2. Gerador Síncrono

### 2.2.1. Descrição e princípio de funcionamento

O gerador síncrono é responsável por converter energia mecânica em energia elétrica. O termo síncrono deve-se ao fato desta máquina possuir valores iguais para sua velocidade de rotação e a frequência da tensão elétrica aplicada em seus terminais. São utilizados essencialmente em centrais elétricas, responsáveis por praticamente toda a energia elétrica disponível. Podem ser utilizados também, para geração de energia em centrais de pequeno porte, que dão origem à chamada GD, conforme explicado anteriormente, em que o foco do estudo neste trabalho. A figura 2.1 mostra o corte transversal de uma máquina síncrona operando como gerador e seus respectivos componentes.

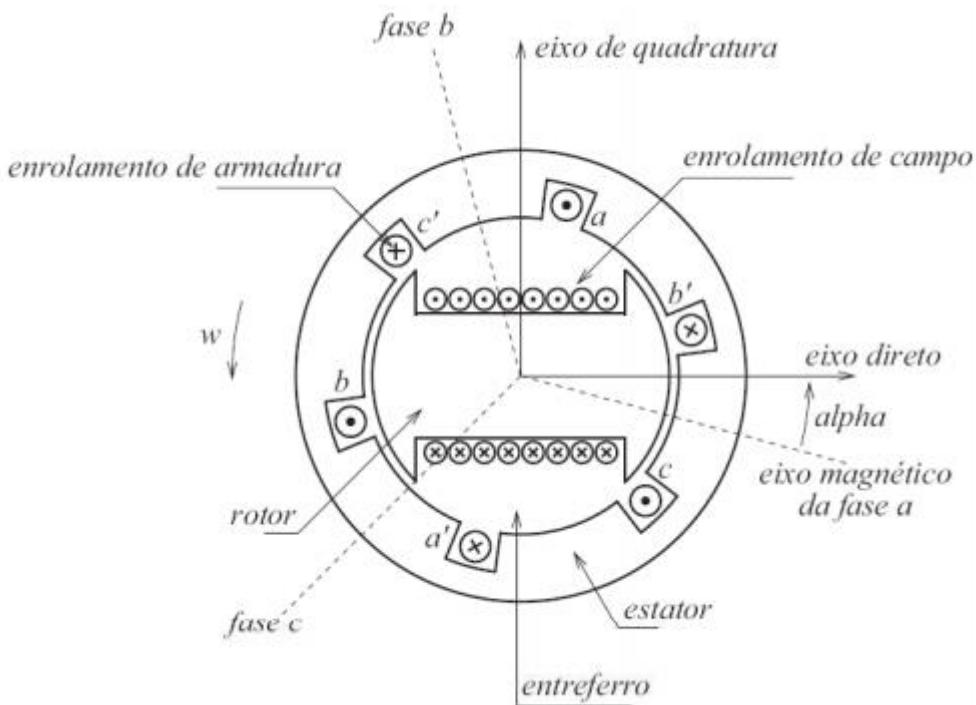
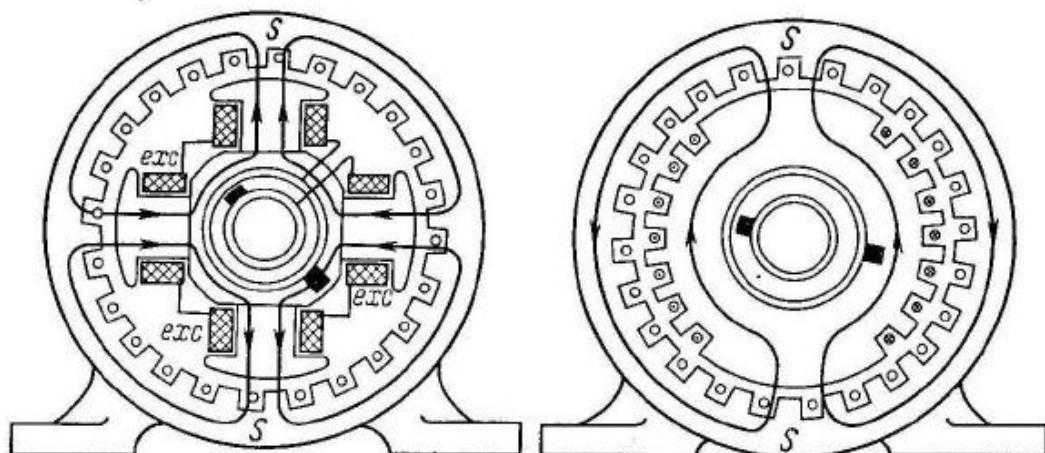


Figura 2.1 – Corte transversal da máquina síncrona de dois polos (extraído de [9])

Uma máquina síncrona é composta por dois elementos, o estator e o rotor. O estator é a parte fixa da máquina síncrona, é alocado em volta do rotor, de maneira que o segundo possa girar no interior do primeiro. O estator é constituído de chapas laminadas feitas de um material ferromagnético que possuem ranhuras axiais onde é alojado o seu enrolamento (enrolamento de armadura), este constituído por condutores de cobre. As chapas, construídas de material com

características magnéticas de alta permeabilidade, criam um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, o que diminui o fluxo disperso e concentra o campo magnético no entreferro, além da diminuição de perdas provocadas pelas correntes de Foucalt. Os enrolamentos do estator são alimentados por corrente alternada, sendo, na maioria dos casos, trifásicos. Os monofásicos são utilizados apenas em pequenas potências, ou em áreas remotas onde não exista rede trifásica disponível. Tanto a tensão quanto a corrente elétrica que circulam nesta parte da máquina são bastante elevadas em relação à outra parte (rotor).

O rotor é alimentado por corrente contínua e constitui a parte girante da máquina síncrona, também formado de chapas laminadas justapostas que, em geral, são do mesmo material que o estator. Pode conter dois ou mais enrolamentos (enrolamentos de campo), estes sempre em número par e todos conectados em série, cada enrolamento é responsável pela produção de um dos polos do eletroímã. O rotor possui dois tipos básicos de construção, os rotores de polos lisos e os rotores de polos salientes, conforme a figura 2.2. Os rotores de polos lisos são utilizados usualmente em sistemas que necessitam trabalhar em altas rotações, pois possuem baixo número de polos. Já os rotores de polos salientes, por conter maiores números de polos, se comparados com as máquinas de polos lisos são utilizados para baixas rotações. A tensão aplicada nos enrolamentos do rotor é contínua e a intensidade da corrente suportada por esse enrolamento é muito menor que a corrente suportada no enrolamento do estator. [10], [11] e [12]



**Figura 2.2 – Representação de máquina de polos salientes, à esquerda e polos lisos, à direita (extraído de [13])**

Para que o gerador síncrono entre em funcionamento é necessário que o enrolamento de campo seja alimentado por uma fonte de tensão contínua de forma que este gire a uma velocidade constante de forma a produzir o campo magnético girante no rotor. Este campo magnético girante induz uma tensão alternada nos enrolamentos da armadura do estator, com a frequência dessa tensão determinada de acordo com a velocidade angular da máquina. [12]

### 2.2.2. Modelo do Gerador Síncrono

Para entendimento da operação do gerador síncrono é necessário compreender as equações que relacionam o balanço de potência na máquina com a variação de velocidade angular da mesma, baseado em [14]. Considerando a figura 2.1 tem-se a equação do movimento rotacional da máquina:

$$J \ddot{\theta}_m = T_a \quad \text{com} \quad T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Onde  $J$  é o momento de inércia,  $\Theta_m$  é o ângulo mecânico do eixo direto do rotor em relação a um eixo estacionário,  $T_a$  é o torque de aceleração do rotor,  $T_m$  é o torque mecânico e  $T_e$  é torque elétrico.

Para estudo neste trabalho é necessária uma equação que relate o parâmetro  $H$  (constante de inércia) com as potências do gerador. Para tanto, tem-se a equação:

$$H = \frac{W_k}{S_B} = \frac{J\omega_{0m}^2}{2S_B} \quad \text{ou} \quad J = \frac{2HS_B}{\omega_{0m}^2} \quad (2.2)$$

Sendo  $W_k$  é a energia armazenada no rotor,  $S_B$  é a potência de base e  $\omega_{0m}$  a velocidade síncrona do sistema. Nota-se que  $S_B/\omega_{0m}$  define um torque base  $T_B$ , portanto pode-se reescrever a equação como:

$$\frac{2H}{\omega_{0e}} \omega_e = \frac{T_m}{T_B} - \frac{T_e}{T_B} \quad (2.3)$$

Definindo  $\omega_u = \omega_e/\omega_{0e}$ ,  $T_{mu} = T_m/T_B$  e  $T_{eu} = T_e/T_B$  como valores em p.u., obtem-se a **equação de swing**:

$$2H\dot{\omega}_u = T_{mu} - T_{eu} \quad (2.4)$$

Desta equação pode-se escrever, relacionando o balanço de potência da máquina síncrona com a oscilação da mesma, sem introduzir nenhum erro, a equação:

$$2H\dot{\omega}_u = \frac{P_{mu}}{\omega_{mu}} - \frac{P_{eu}}{\omega_{mu}} \quad (2.5)$$

Onde  $P_{mu}$  e  $P_{eu}$  são valores em p.u. das potências mecânica e elétrica, respectivamente, e  $\omega_{mu}$  a velocidade angular absoluta em p.u. Para um detalhamento maior nos procedimentos para obtenção das equações, além de considerações acerca de outras equações, consulte [3].

Neste trabalho será estudada a influência da variação do parâmetro  $H$  no sistema, inicialmente têm-se um barramento infinito, possuindo um  $H$  infinito, e depois este é substituído por uma máquina síncrona de valor  $H$  variável, assumindo valores bem menores.

### 2.3. Modelo do regulador de velocidade

O sistema estudado neste trabalho possui um regulador de velocidade conectado à máquina síncrona, a qual representa o gerador distribuído. O objetivo do uso desse regulador é que após a ocorrência de uma perturbação no sistema, a qual pode gerar variações na velocidade da máquina síncrona, o mesmo possa retomar a uma condição de equilíbrio. O modelo do regulador de velocidade utilizado está descrito no diagrama de blocos da figura 2.3, de acordo com [15] e [16].

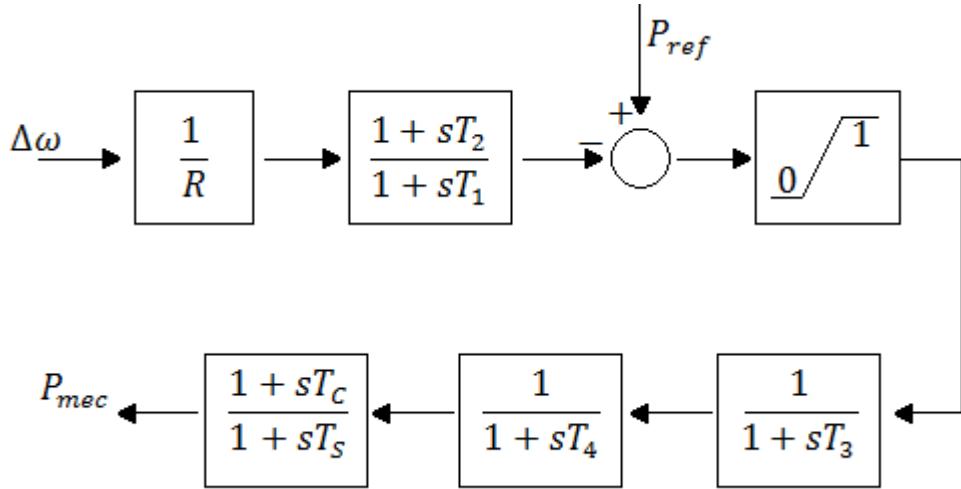


Figura 2.3 – Diagrama de blocos para representação do regulador de velocidade

Onde  $T_3$  refere-se à constante de tempo do regulador de velocidade e  $T_4$  é constante de tempo da turbina. As outras constantes que aparecem no diagrama  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_c$  e  $T_s$ , possuem valores que se cancelam e não produzem ganho à malha. Todos os valores dos parâmetros utilizados durante as simulações se encontram no apêndice deste documento.

Um parâmetro em especial foi estudado e modificado de acordo com a necessidade de cada teste, o estatismo (R). O estatismo é o inverso do ganho estático da máquina de controle, por esse motivo aparece no diagrama de blocos como  $1/R$ , é responsável pela regulação da frequência do sistema. O ajuste desse parâmetro é fundamental para que seja possível que o sistema alcance a estabilidade desejada após uma perturbação. Ocorre uma queda e frequência e depois o sistema se estabiliza em um determinado valor.

#### 2.4. Modelo do regulador de tensão

O controle de tensão utilizado é um modelo simplificado do modelo regulador de tensão ST1A [17]. A figura 2.4 apresenta o diagrama de blocos do mesmo. Os valores utilizados nos parâmetros  $K_a$  e  $T_a$ , encontram-se no apêndice deste trabalho.

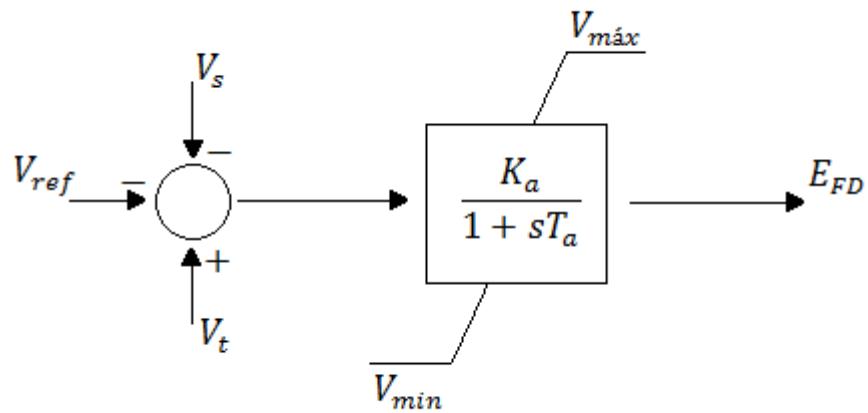


Figura 2.4 – Diagrama de blocos para representação do regulador de tensão

## 2.5. Modelo geral

Os reguladores de velocidade e tensão estão conectados ao gerador distribuído, portanto, todo o controle do sistema encontra-se ao lado do gerador distribuído, que será responsável pela estabilidade do sistema e, portanto, este trabalho analisará se este controle é suficiente. A figura 2.5 mostra uma representação geral das conexões no gerador distribuído.

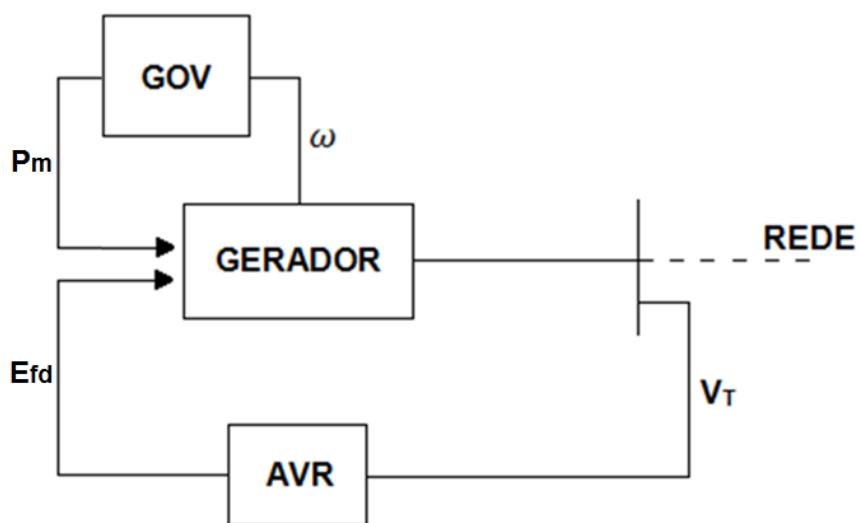


Figura 2.5 – Diagrama de blocos para representação do modelo geral



### 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ESTUDADO

---

O sistema utilizado para as análises neste trabalho é uma adaptação do sistema utilizado em [11], correspondente a uma versão simplificada do SEP localizado no interior de São Paulo responsável pela cogeração de bagaço de cana-de açúcar, uma aplicação comum de GD. Maiores detalhes deste sistema podem ser vistos em [12]. A figura 3.1 ilustra o diagrama unifilar do mesmo.

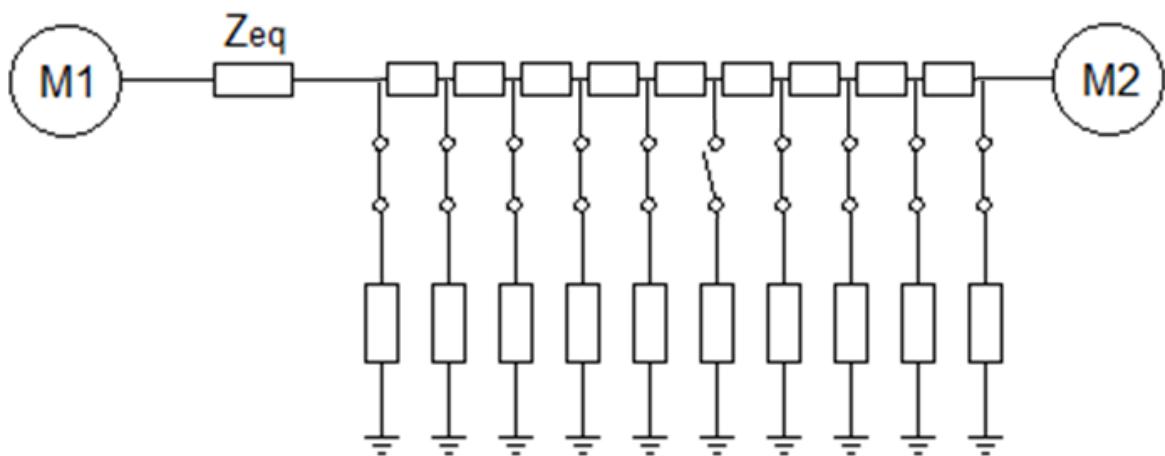


Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema estudado

$M2$  é a máquina síncrona 2 operando como o gerador distribuído,  $Zeq$  é a impedância equivalente. A figura 3.1 também mostra as impedâncias da linha e as cargas conectadas à mesma, nove cargas estão conectadas e uma será chaveada em determinado tempo de simulação.

#### 3.1. O *software* ATP

Todos os sistemas foram implementados e simulados no *software* ATP (*Alternative Transient Program*). O ATP é comumente utilizado para representação e simulação de sistemas elétricos de potência. Como o objetivo deste trabalho não é a implementação do SEP, mas sim os resultados obtidos com suas simulações, não será descrito o procedimento para implementação do mesmo, porém o mesmo já foi mencionado no início do capítulo, com suas respectivas referências.

O software escolhido tem como diferencial a simulação eficiente de condições transitórias do sistema, mesmo que ocorra desbalanço entre as fases. Os sistemas foram implementados com o recurso ATPDraw.

### **3.2. Equivalente na forma de um barramento infinito**

Para início de estudo, foi considerada uma modelagem onde o gerador distribuído é representado por uma máquina síncrona, com seus devidos controladores de velocidade e tensão. O equivalente do sistema conectado ao gerador distribuído é representado por um barramento infinito, que em termos de modelagem, é uma fonte de tensão ideal. A linha que liga o gerador ao barramento infinito possui nove cargas conectadas, que possuem os mesmos valores de resistência e indutância e uma carga de valores diferentes que será chaveada durante a simulação. A figura 3.1 mostra o modelo simulado no software ATP, ao lado esquerdo encontra-se o sistema equivalente representado pelo barramento infinito, ao lado direito o gerador distribuído e seus respectivos controladores e medidores e ao longo da linha as cargas conectadas.

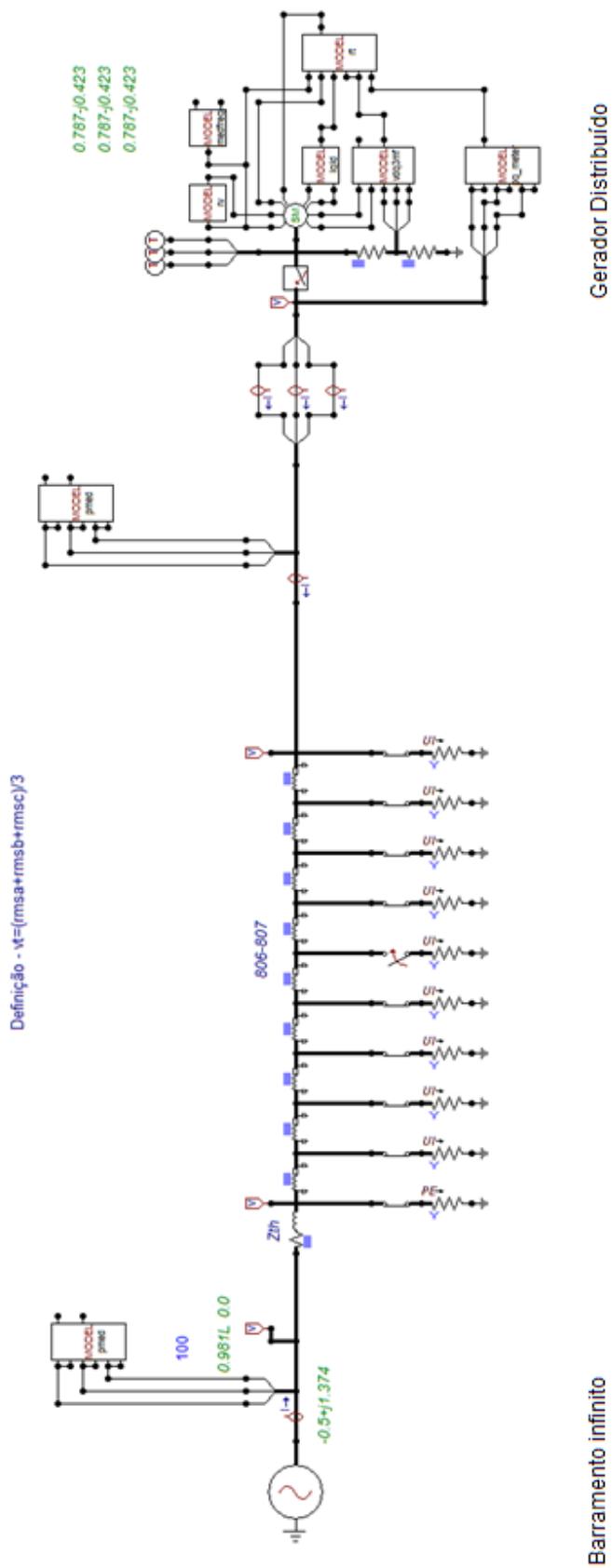


Figura 3.2 – Sistema de GD conectado a barramento infinito

### 3.3. Sistema fraco

Os sistemas cuja inércia agregada é baixa em relação à inércia do gerador distribuído conectado constituem o conceito de sistema fraco utilizado neste trabalho, ou seja, quando menor for a relação entre a inércia do gerador distribuído e do sistema equivalente conectado a ele, mais fraco é este sistema equivalente.

A modelagem apresentada no tópico anterior é usual para sistemas de geração distribuída e o objetivo deste trabalho é avaliar sua eficácia em casos de conexões fracas com a GD.

### 3.4. Questionamentos

- 1) O equivalente com o barramento infinito continua válido no caso de sistemas onde a conexão da GD com o sistema é fraca?
- 2) Se não for válido, qual a modelagem alternativa?
- 3) Como ajustar os parâmetros dessa modelagem?

### 3.5. Equivalente como modelo clássico

Para responder a estes questionamentos foi proposta a mudança da fonte de tensão ideal (barramento infinito), representando o equivalente do sistema, por uma máquina síncrona onde é possível o ajuste do parâmetro  $H$ , constante de inércia, tornando-se possível a configuração de sistemas em que o ponto de conexão com a GD é considerada fraca. A figura 3.2 mostra este sistema com a devida alteração, onde agora, a máquina síncrona representa o equivalente do sistema, a qual não possui nenhum tipo de controle, apenas a máquina que representa o gerador distribuído é responsável pelo controle do sistema, como já discutido no capítulo anterior.

Para que o equivalente fosse mais realista seria necessário um controle no mesmo, com a utilização de um regulador de velocidade isócrono e um controlador de tensão, que é o objetivo de trabalhos futuros.

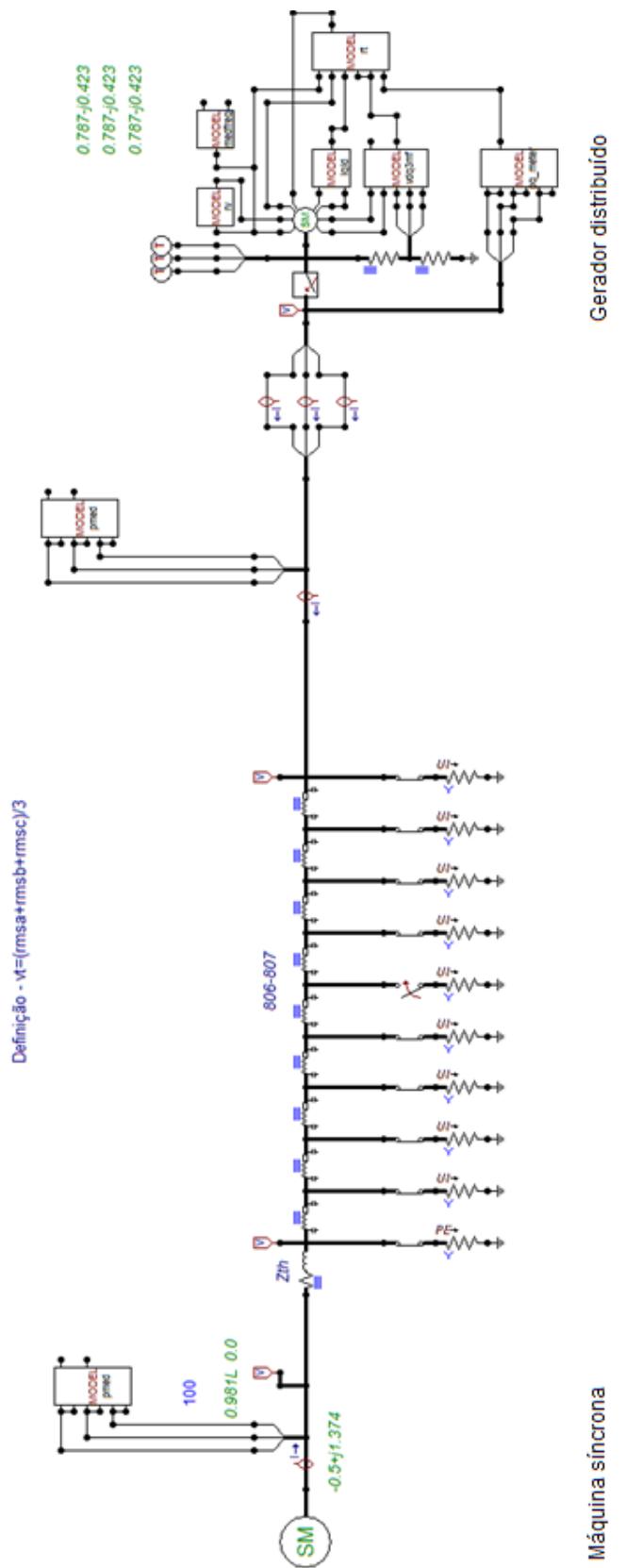


Figura 3.3 – Sistema de GD conectado a uma máquina síncrona



## 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

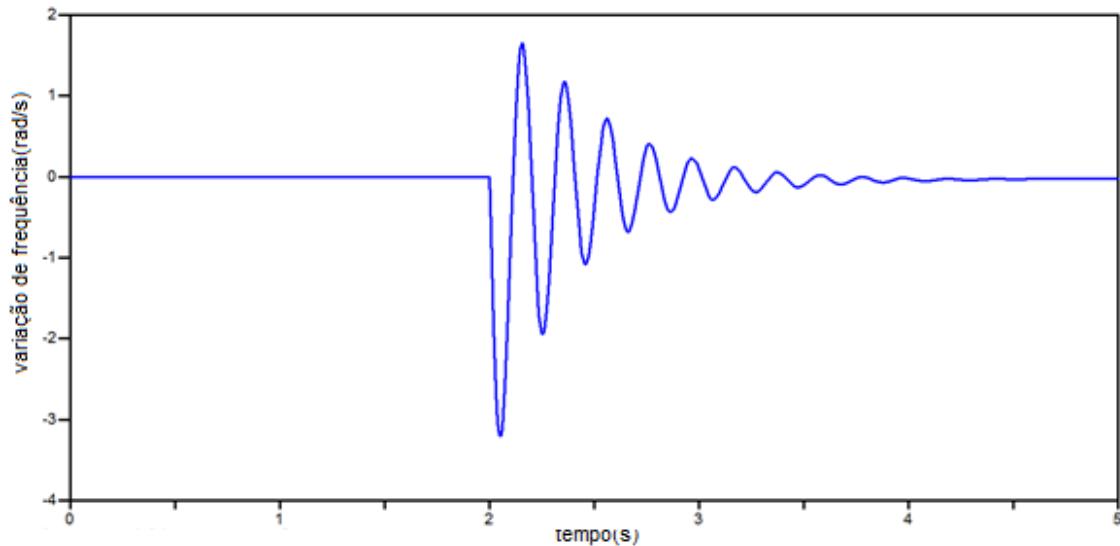
---

Este capítulo apresenta os resultados realizados através de três tipos de simulações. A primeira simulação é feita com o modelo equivalente (barramento infinito) da figura 3.2, alterando o valor do estatismo do regulador de velocidade conectado ao gerador distribuído para análise do comportamento da velocidade. A segunda simulação é realizada com o modelo da figura 3.3 em que a fonte de tensão do barramento infinito é substituída por um gerador síncrono e o estatismo é alterado da mesma forma da simulação anterior. Por fim, a terceira simulação a inércia do gerador representando o equivalente do sistema é alterada, para analisar a queda de frequência da máquina. A seguir as simulações são apresentadas com maiores detalhes.

### 4.1. Barramento infinito

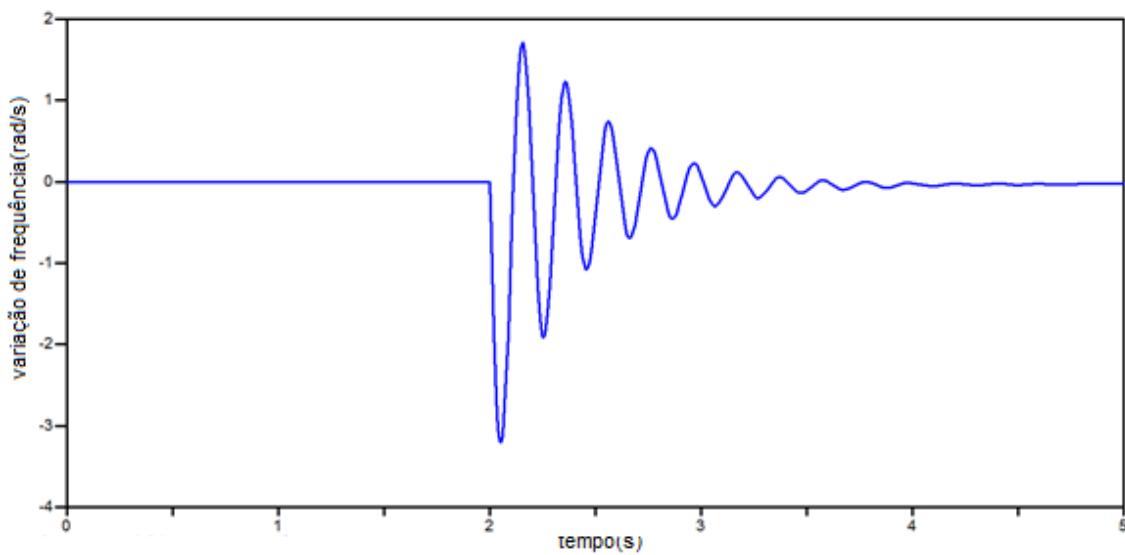
A primeira simulação foi realizada com o modelo equivalente do barramento infinito, onde depois de dois segundos uma carga foi conectada ao sistema através de uma chave, na figura 3.1 pode-se perceber que uma carga está com a chave aberta, essa chave se fecha aos dois segundos inserindo a carga ao sistema. Após a inserção da carga foi observado o comportamento da velocidade da máquina que representa o gerador distribuído. A simulação foi feita com diferentes valores de estatismo do controlador de velocidade do gerador distribuído, conforme os casos 1, 2, 3 e 4, de forma a obter um melhor resultado. Também foram comparadas as frequências de oscilação para cada um dos casos, conforme descrito a seguir.

Caso 1 – Foi utilizada a constante de estatismo ( $R = 0.6$  p.u.) e a frequência de oscilação obtida ( $f = 5.0021$  Hz), através dos cursores disponíveis no software ATP, a partir da diferença entre a frequência da primeira oscilação e da segunda, convertida para Hertz. A figura 4.1 mostra o gráfico do comportamento da velocidade ao longo de 5 segundos.



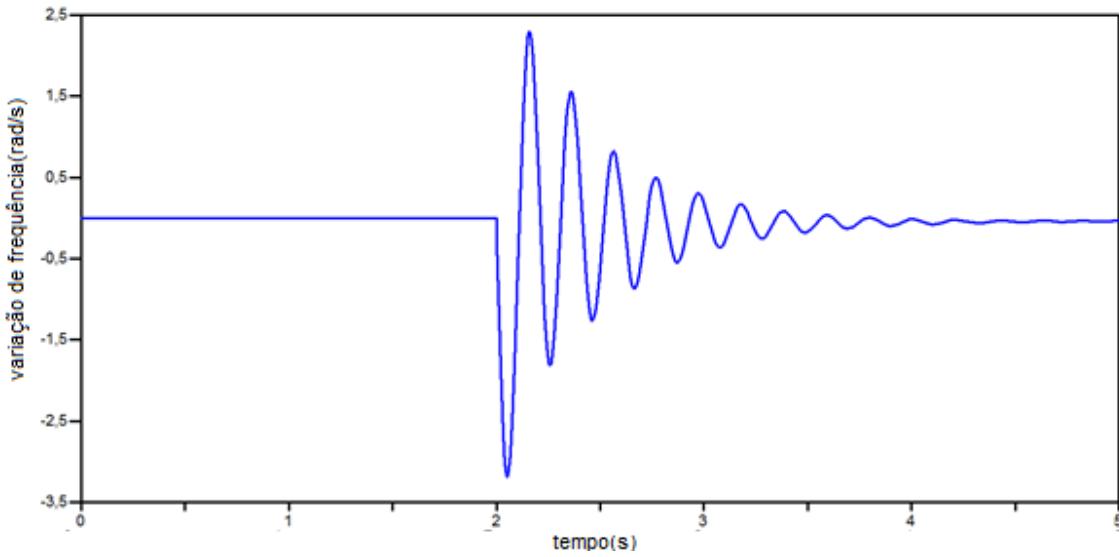
**Figura 4.1 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 1**

Caso 2 – Foi utilizada constante de estatismo ( $R = 0.06$  p.u.) e a frequência de oscilação obtida ( $f = 4.8889$  Hz). A figura 4.2 mostra o gráfico do comportamento da velocidade ao longo de 5 segundos.



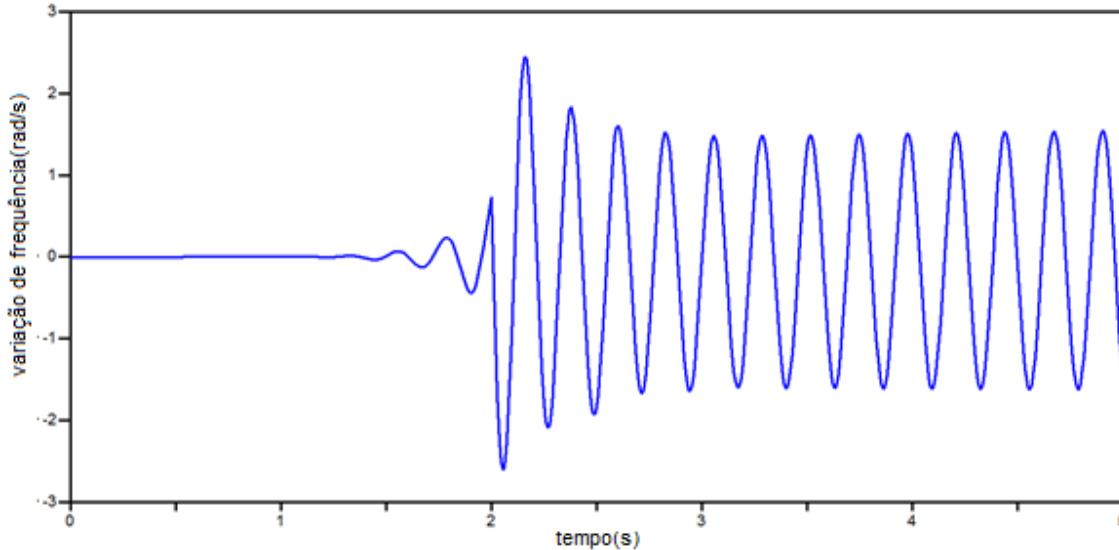
**Figura 4.2 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 2**

Caso 3 – Foi utilizada a constante de estatismo ( $R = 0.006$  p.u.) e a frequência de oscilação obtida ( $f = 4.5603$  Hz). A figura 4.3 mostra o gráfico do comportamento da velocidade ao longo de 5 segundos.



**Figura 4.3 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 3**

Caso 4 – Foi utilizada a constante de estatismo ( $R = 0.0006$  p.u.). A figura 4.4 mostra o gráfico do comportamento da velocidade em relação ao tempo ao longo de 6 segundos.



**Figura 4.4 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 4**

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 ilustram um comportamento esperado nas simulações utilizando o barramento infinito representando o sistema equivalente conectado ao gerador distribuído. Observa-se que para o caso 4 que possui o menor valor de estatismo ocorre uma oscilação com amplitude constante na máquina, caracterizando uma resposta oscilatória, portanto esse estatismo não configura um

valor de constante válido para o controlador de velocidade. Já para os casos 1, 2 e 3 ocorre uma queda de frequência quando a carga é chaveada e então uma oscilação amortecida em torno do valor inicial que aparece na resposta da máquina até que o sistema retome o equilíbrio, no mesmo valor que se encontrava inicialmente, a única diferença entre os respectivos casos é a frequência de oscilação que diminui conforme a constante de estatismo é reduzida.

Para sistemas em que a conexão com a GD é forte a configuração acima é válida, uma vez que se considera o sistema equivalente como um barramento infinito, este possui alta potência de curto-circuito e inércia muito maior do que a do gerador distribuído conectado, porém restam dúvidas sobre sua confiabilidade em sistemas de conexão com a GD fraca.

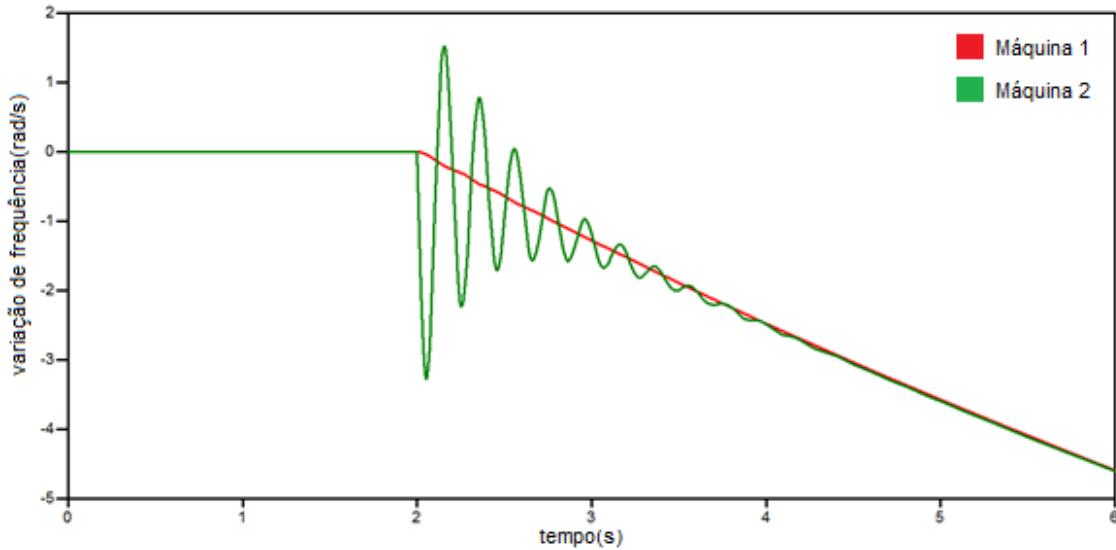
#### 4.2. Modelo clássico

Para os próximos testes considera-se a hipótese da variação da inércia do sistema equivalente, para representar sistemas em que a conexão com a GD é fraca, portanto a inércia é muito menor do que a inércia do barramento infinito. Para tanto, o sistema utilizado nas próximas simulações é o sistema ilustrado na figura 3.2 do capítulo anterior.

#### 4.3. Simulações com variação de estatismo (R)

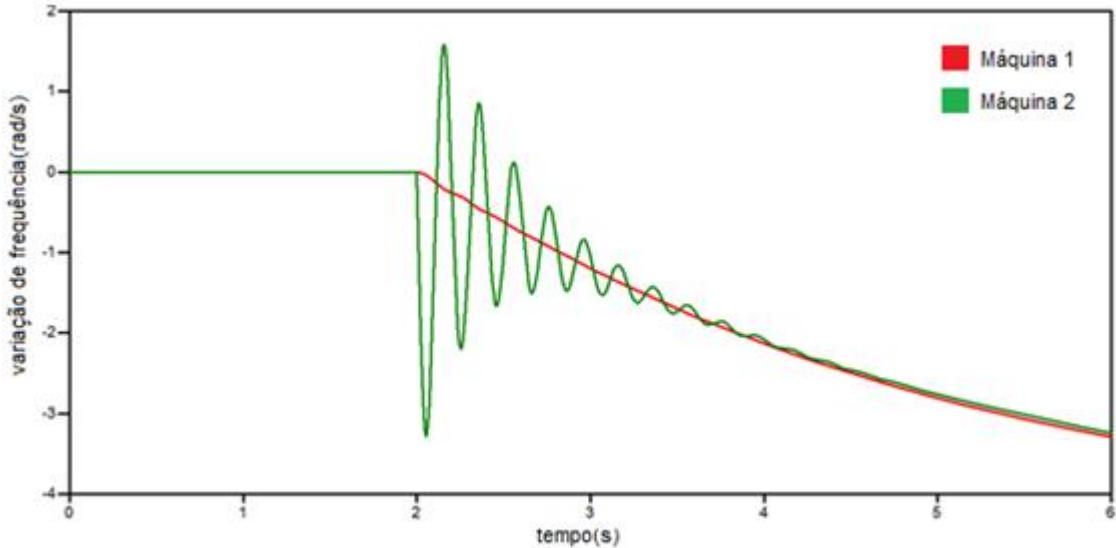
A segunda simulação a seguir foi feita da mesma forma dos casos 1, 2, 3 e 4 e com os mesmos valores de estatismo a fim de encontrar o valor que melhor se ajusta a realidade e com a conexão da carga ao sistema em dois segundos. A máquina síncrona 2, que representa o gerador distribuído, possui 1% da inércia da máquina síncrona 1, que representa o equivalente do sistema conectado, o que configura uma conexão com a GD fraca, visto que seria como se existisse um gerador distribuído conectado a um sistema constituído por cem máquinas de mesma inércia, ou seja, um sistema de pequeno porte, configurando um ponto de conexão fraco.

Caso 5 – Foi utilizada constante de estatismo ( $R = 0.6$  p.u.) e a frequência de oscilação obtida ( $f = 5.9920$  Hz). A figura 4.5 mostra o gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas 1 e 2 ao longo de 6 segundos.



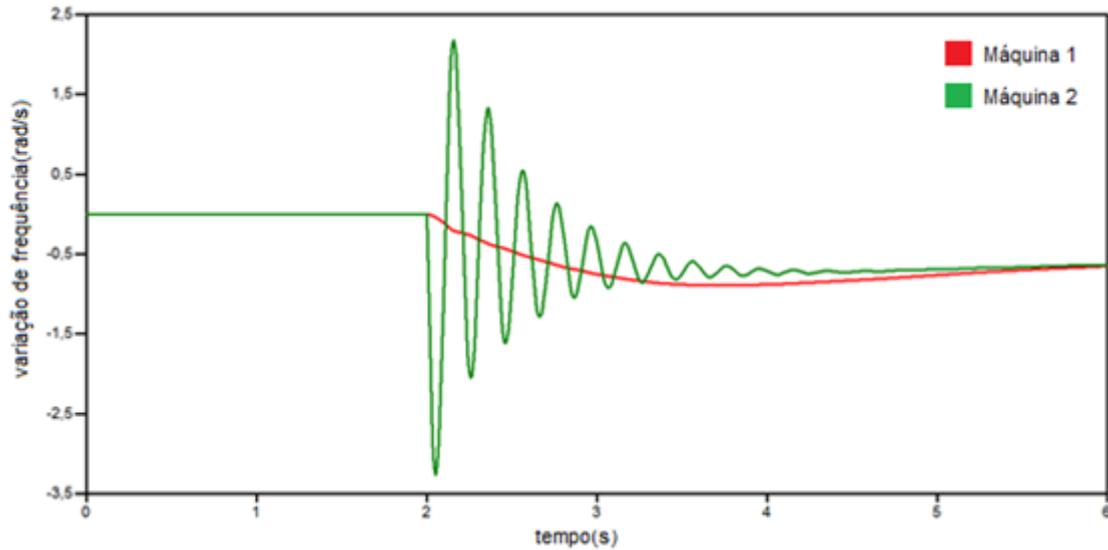
**Figura 4.5 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 5**

Caso 6 – Foi utilizada constante de estatismo ( $R = 0.06$  p.u.) e a frequência de oscilação obtida ( $f = 5.8076$  Hz). A figura 4.6 mostra o gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas ao longo de 6 segundos.



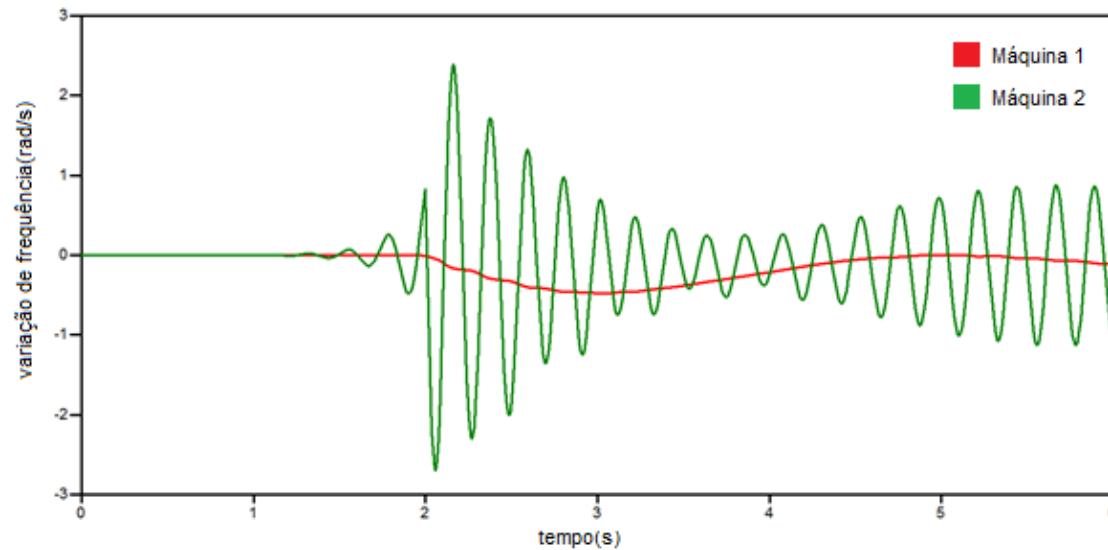
**Figura 4.6 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 6**

Caso 7 – Foi utilizada a constante de estatismo ( $R = 0.006$  p.u.) e a frequência de oscilação obtida ( $f = 5.1527$  Hz). A figura 4.7 mostra o gráfico do comportamento da velocidade ao longo de 6 segundos.



**Figura 4.7 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 7**

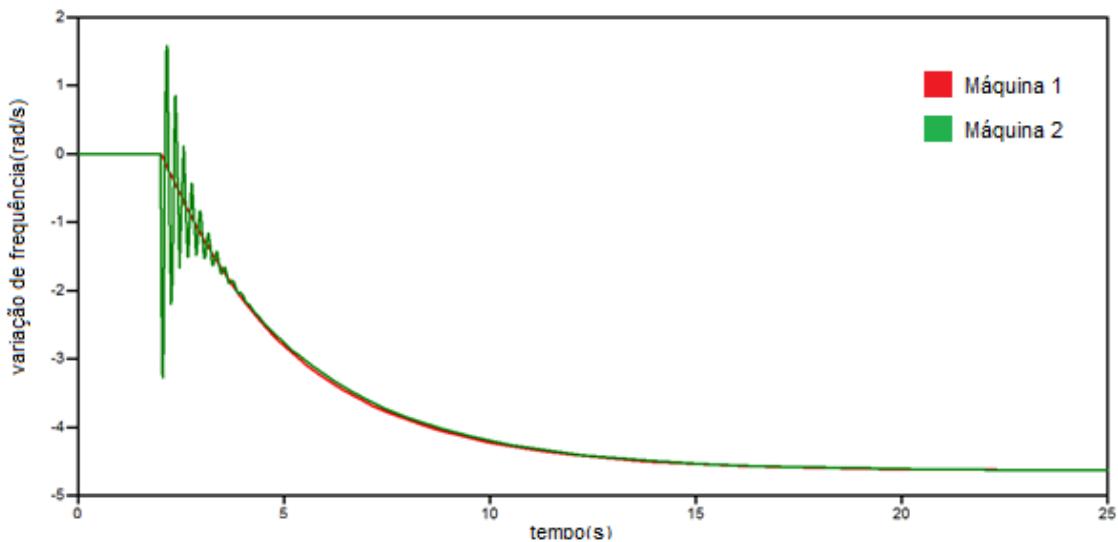
Caso 8 – Foi utilizada constante de estatismo ( $R = 0.0006$  p.u.). A figura 4.8 mostra o gráfico do comportamento da velocidade ao longo de 6 segundos.



**Figura 4.8 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 8**

Analizando os resultados obtidos nesse segundo grupo de simulações, pôde-se perceber que o único valor adequado para o estatismo é 0.006 p.u. (figura 4.7) do caso 7, pois todos os outros casos não possuem uma resposta de velocidade adequada. No caso 5, com o estatismo igual a 0.6 p.u., as velocidades das máquinas decaem linearmente com o tempo, fazendo com que o sistema perca a estabilidade. O caso 8 é semelhante ao que ocorre no caso 4, o gerador

distribuído possui uma resposta oscilatória não amortecida. O caso 6 com estatismo de 0.06p.u. se parece, aparentemente, com o caso 5, porém é possível visualizar uma leve curvatura no decaimento da velocidade, tendo uma análise não conclusiva. Para analisar melhor, este caso foi simulado novamente, agora com um tempo de 25 segundos. Os resultados obtidos estão na figura 4.9.



**Figura 4.9 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 6 em 25 segundos**

Percebe-se que a velocidade nesse caso se estabiliza, porém ocorre uma queda de frequência próxima a 0.8 Hz, o que fará com que a frequência do sistema fique em torno de 59.2Hz. A norma do PRODIST diz que “As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5Hz a 60,5Hz, no prazo de 30 (trinta) segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.”, portanto o sistema viola o limite inferior da frequência.

De posse da informação do PRODIST, no caso 7 observa-se também uma queda na frequência em torno de 0.01 Hz, retornando uma frequência em torno de 59,9Hz, o que não viola o limite determinado pelo PRODIST.

A queda na frequência é a principal diferença observada em relação ao modelo com o barramento infinito. Com a diminuição da inércia no sistema que utiliza a máquina síncrona no lugar do barramento infinito, observa-se que ocorre a

queda de frequência quando este sistema recebe algum tipo de perturbação (representada pela entrada da carga chaveada).

#### 4.4. Simulações com variação de inércia

Na terceira simulação a inércia do sistema equivalente conectado a GD é diminuída e o objetivo é verificar até que ponto é possível obter uma queda de frequência dentro dos limites especificados pelo PRODIST, utilizando apenas o regulador de velocidade na máquina síncrona que representa gerador distribuído.

O valor de estatismo utilizado nos próximos casos com variações de inércia foi de 0.03 p.u. Foi escolhido o valor que retorna uma frequência em Hz para a inércia de 1% com o objetivo de obter valores satisfatórios com a diminuição da inércia do sistema equivalente sem alterar o valor do estatismo. O tempo de simulação foi aumentado para uma maior precisão nas medidas de queda de frequência.

Caso 9 – Inércia de M2 com 1% da inércia de M1, constante de estatismo ( $R = 0.03$  p.u.). A queda de frequência observada foi igual a 0.4257 Hz, retornando o sistema a uma frequência igual a 59.57 Hz. A figura 4.10 mostra o gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas 1 e 2 ao longo de 12 segundos.

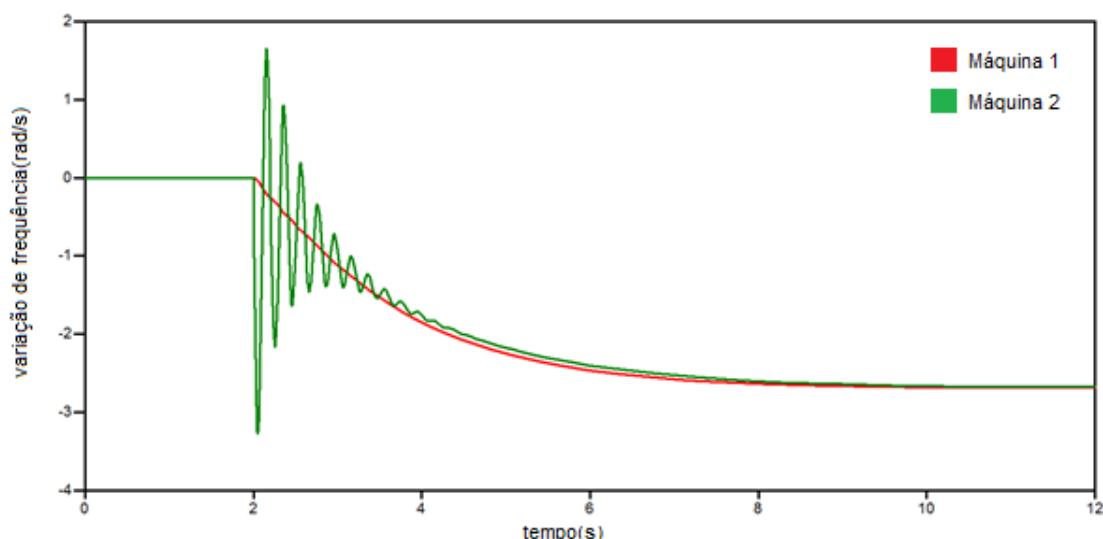
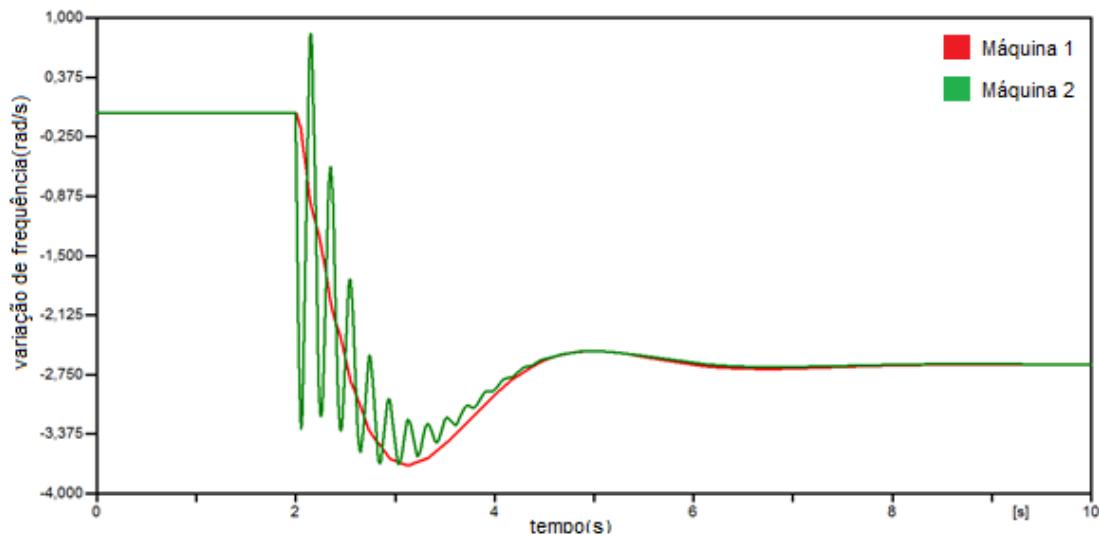


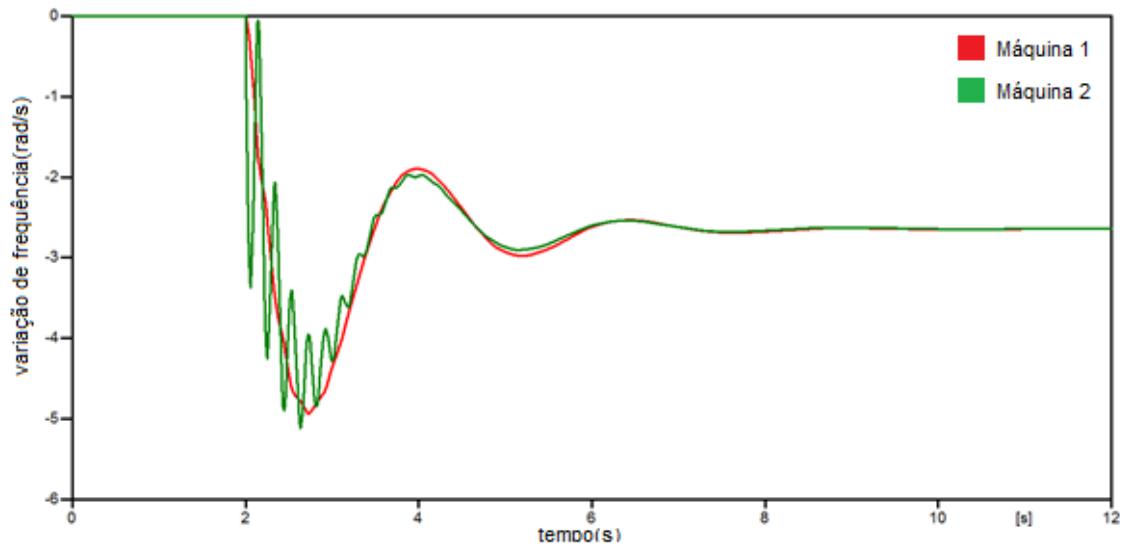
Figura 4.10 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 9

Caso 10 – Inércia de M2 com 5% da inércia de M1, constante de estatismo ( $R = 0.03$  p.u.). A queda de frequência observada foi igual a 0.4206 Hz, retornando o sistema a uma frequência igual a 59.58 Hz. A figura 4.11 mostra o gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas 1 e 2 ao longo de 10 segundos.



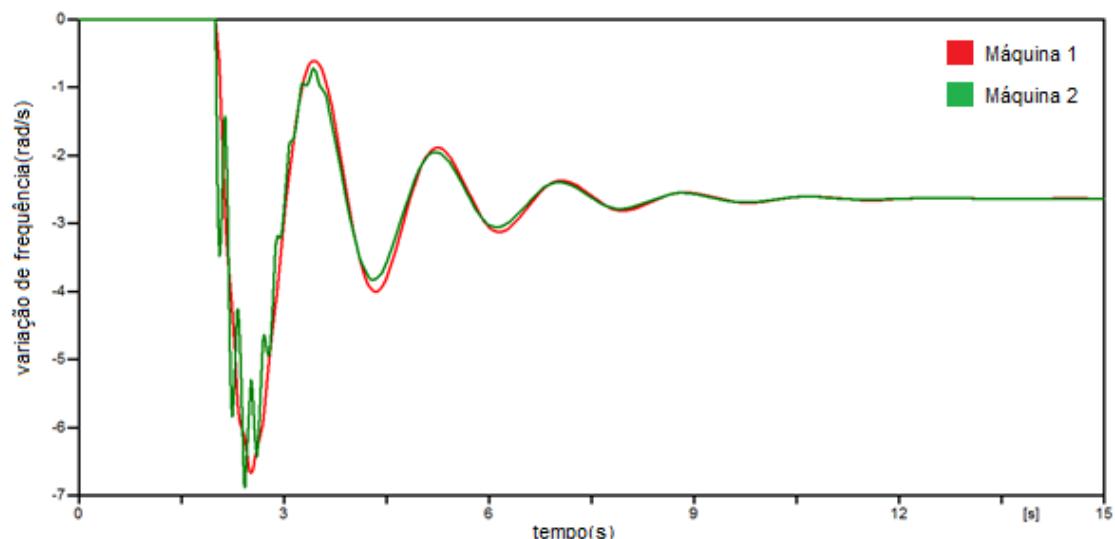
**Figura 4.11 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 10**

Caso 11 – Inércia de M2 com 10% da inércia de M1, constante de estatismo ( $R = 0.03$  p.u.). A queda de frequência observada foi igual a 0.4195 Hz, retornando o sistema a uma frequência igual a 59.58 Hz. A figura 4.12 mostra o gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas 1 e 2 ao longo de 12 segundos.



**Figura 4.12 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do simulação 11**

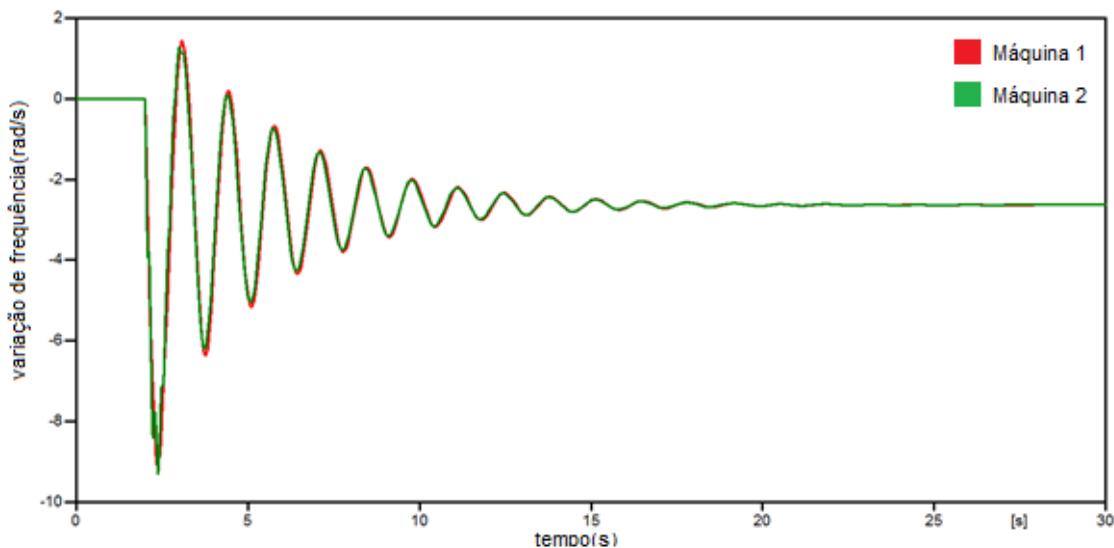
Caso 12 – Inércia de M2 com 20% da Inércia de M1, constante de estatismo ( $R = 0.03$  p.u.). A queda de frequência observada foi igual a 0.4192 Hz, retornando o sistema a uma frequência igual a 59.58 Hz. A figura 4.13 mostra o gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas 1 e 2 ao longo de 15 segundos.



**Figura 4.13 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 12**

Caso 13 – Inércia de M2 com 50% da inércia de M1, constante de estatismo ( $R = 0.03$  p.u.). A queda de frequência observada foi igual a 0.04184 Hz, retornando o sistema a uma frequência igual a 59.58 Hz. A figura 4.14 mostra o

gráfico do comportamento da velocidade das máquinas síncronas 1 e 2 ao longo de 10 segundos.



**Figura 4.14 – Gráfico do comportamento da velocidade com dados do caso 13**

A primeira consideração a ser feita em relação aos casos 9-13 é que o valor escolhido para o estatismo ( $R = 0.03$  p.u.) não é necessariamente o melhor valor para cada situação isoladamente, ou seja, pode existir algum outro valor em que a variação de frequência seja menor do que nos casos mostrados. Entretanto a proposta foi tentar encontrar um valor de estatismo que satisfizesse todos os casos de inércia simulados.

Analizando qualitativamente os gráficos percebe-se que conforme a inércia da M1 é reduzida em relação à inércia da M2, as oscilações da primeira possuem amplitudes maiores. Nos casos 9 e 10, a M1 praticamente não tem oscilação, ela só acompanha a trajetória de M2 ao longo do tempo.

O último caso (M1 sendo o dobro de M2) representa um sistema irreal, pois fazendo a analogia semelhante a do início do capítulo, seria um gerador operando como gerador distribuído e apenas dois geradores de mesma inércia operando no equivalente do sistema, o que não configuraria GD. Entretanto mesmo nesse caso os resultados da simulação foram satisfatórios. Os gráficos acima mostraram que em todos os casos de inércia simulados a frequência retorna dentro da faixa especificada pelo PRODIST, ou seja, o regulador de velocidade é suficiente

para o controle do sistema. Se o ajuste do estatismo for exato para cada um dos casos, obter-se-iam resultados ainda mais satisfatórios.

## 5. CONCLUSÕES

---

Diante dos resultados obtidos com as simulações no capítulo 4 pode-se observar que todos os objetivos do trabalho foram atingidos. Primeiramente foi confirmado que a modelagem do equivalente do sistema como barramento infinito não é adequada para representar equivalentes de conexão fraca, visto que o barramento infinito pode ser definido como uma máquina que possui a capacidade de gerar potência ilimitadamente e possuir uma inércia infinita, o que caracteriza um sistema de conexão forte.

A alternativa sugerida foi a substituição do barramento infinito por uma máquina síncrona operando como gerador síncrono, configurando um modelo clássico, assim foi possível variar a inércia, caracterizando sistemas de GD com conexões fracas. Para que essa variação fosse possível, foi necessária a implementação de um regulador de velocidade e um bom ajuste dos parâmetros do mesmo. Desta maneira foram feitas inúmeras simulações variando inicialmente o estatismo e depois a inércia do sistema equivalente.

Destas simulações foi observado que a variação da inércia e do estatismo do regulador de velocidade não provocaram variações significativas na frequência de oscilação do modo eletromecânico, todos os valores de frequência de oscilação obtidos encontram-se junto aos dados de cada simulação.

A conclusão mais importante obtida através dos resultados dos últimos testes é que o regulador de velocidade conectado apenas na máquina síncrona que representa o gerador distribuído é suficiente na regulação de frequência do sistema, não necessitando de controles conectados às máquinas contidas no sistema equivalente conectado. O gerador distribuído em estudo é suficientemente responsável pelo controle de frequência do sistema, visto que em todos os casos estudados, após uma perturbação no sistema (representada pela entrada da carga no sistema), a frequência do mesmo se estabilizou em um valor dentro dos limites regulamentados e em menos de 30 segundos.

Por fim, como perspectivas de trabalhos futuros tem-se a utilização de um laço de regulação de velocidade no equivalente para representar a contribuição dos demais geradores para o controle de frequência e, eventualmente, o desenvolvimento de um procedimento para a construção do equivalente a partir dos dados do sistema completo. Todas as implementações e simulações sendo feitas no *software ATP*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Geração Distribuída. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757>>. Acesso em 28 Oct.2014.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>. Acesso em 25 Oct. 2014.
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (INEE). O que é Geração Distribuída. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd)>. Acesso em 30 Oct. 2014.
- [4] INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (INEE). Sobre GD e Cogeração. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_sobre\\_gd\\_cg.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_sobre_gd_cg.asp?Cat=gd)>. Acesso em 30 Oct. 2014.
- [5] BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. (2014). Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens. Fundação Estadual do meio Ambiente – FEAM.
- [6] ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA (COGEN). Geração Distribuída – Novo Ciclo de Desenvolvimento. Disponível em: <[http://www.cogen.com.br/workshop/2013/Geracao\\_Distribuida\\_Calabro\\_22052013.pdf](http://www.cogen.com.br/workshop/2013/Geracao_Distribuida_Calabro_22052013.pdf)>. Acesso em 29 Oct. 2014.
- [7] ATIAIA ENERGIA. O que são PCHs. Disponível em: <<http://www.atiaiaenergia.com.br/oQueSaoPchs/oQueSaoPchs.php>>. Acesso em 30 de Oct. 2014.
- [8] NOGUEIRA, V. F.G. Geração distribuída usando geradores síncronos trifásicos. . Dissertação (Mestrado), UNICAMP, 2011.

- [9] SALIM, R. H. Uma nova abordagem para a análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores síncronos distribuídos. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [10] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, C.; UMANS, S. D. Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [11] GERALDI JUNIOR, E.L. Estimação modal para medidas com ruído em sistemas com geração síncrona distribuída. Trabalho de Conclusão de curso, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [12] FERNANDES, T. C. C. (2012). Aplicação de técnicas de estimação modal para análise de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas de distribuição com geração distribuída. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [13] NATURESA, J. S. Máquina Síncrona – terceira parte. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/jimnaturesa/mquina-sncrona-3>>. Acesso em 26 Oct. 2014.
- [14] RAMOS, R. A.; ALBERTO, L. F. C; BRETAS, N. G. (2000). Modelagem de Máquinas Síncronas Aplicada ao Estudo de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência. Publicação, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.
- [15] DUBE, L. Users Guide to MODELS in ATP. Bonneville Power Administration, 1996.
- [16] COSTA, A. S. Reguladores de Velocidade e Regulação Primária. Disponível em: <[http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/dincont/Reguladores\\_de\\_Velocidade.pdf](http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/dincont/Reguladores_de_Velocidade.pdf)> Acesso em 26 Oct. 2014.
- [17] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. Std 421.5-2005.
- [18] DOMMEL H. W. Electromagnect Transients Program. Reference Manual (EMTP theory book), Bonneville Power Administration, Portland, 1986.

## APÊNDICE – DADOS DO SISTEMA SIMULADO

---

Este apêndice apresenta os parâmetros contidos nos sistemas testes utilizados, bem como valores de resistências e indutâncias das linhas, parâmetros dos controladores e das máquinas síncronas. Os dados apresentados são referentes já aos modelos equivalentes apresentados no trabalho. Foram utilizados dois sistemas equivalentes para as simulações, o primeiro foi com o barramento infinito, figura 3.1, e o segundo foi o barramento infinito sendo substituído pela máquina síncrona, figura 3.2 e esta é a única diferença entre os dois modelos.

A.1. Características da fonte de tensão ideal (representação do barramento infinito)

$$V = 11056.7 \text{ V}, F = 60 \text{ Hz}, \Theta = 0^\circ.$$

A.2. Características da máquina síncrona 1 (representação do sistema equivalente conectado)

$$V = 11056.7 \text{ V}, F = 60 \text{ Hz}, \Theta = 0^\circ, P = 2, S_{\text{base}} = 100 \text{ MVA}, V_{\text{base}} = 24 \text{ kV}.$$

$$r_a = 0 \text{ p.u.}, x_l = 0.13 \text{ p.u.}, x_d = 1.79 \text{ p.u.}, x_q = 1.71 \text{ p.u.}, x_d' = 0.169 \text{ p.u.},$$

$$x_q' = 0.228 \text{ p.u.}, x_d'' = 0.135 \text{ p.u.}, x_d''' = 0.2 \text{ p.u.}$$

$$T_{do}' = 4.3 \text{ s}, T_{qo}' = 0.85 \text{ s}, T_{do}'' = 0.032 \text{ s}, T_{qo}'' = 0.05 \text{ s}.$$

A constante de inércia (H) varia de acordo com a máquina 2.

A.3. Características da máquina síncrona 2 (representação do gerador distribuído)

$$V = 11056.7 \text{ V}, F = 60 \text{ Hz}, \Theta = 7.944^\circ, P = 2, S_{\text{base}} = 10 \text{ MVA},$$

$$V_{\text{base}} = 13.8 \text{ kV}.$$

$$r_a = 0 \text{ p.u.}, x_l = 0.1 \text{ p.u.}, x_d = 2.06 \text{ p.u.}, x_q = 2.5 \text{ p.u.}, x_d' = 0.398 \text{ p.u.},$$

$$x_q' = 0.3 \text{ p.u.}, x_d'' = 0.254 \text{ p.u.}, x_d''' = 0.254 \text{ p.u.}$$

$T_{do}' = 7.8 \text{ s}$ ,  $T_{qo}' = 3 \text{ s}$ ,  $T_{do}'' = 0.066 \text{ s}$ ,  $T_{qo}'' = 0.075 \text{ s}$ .

$H = 20 \text{ kg-m}^2$

#### A.4. Parâmetros do regulador de velocidade

A constante de estatismo (R) assumiu valores diferentes durante as simulações.

$T_1 = 0.02 \text{ s}$ ,  $T_2 = 0 \text{ s}$ ,  $T_3 = 0 \text{ s}$ ,  $T_4 = 0.09 \text{ s}$ ,  $T_5 = 10 \text{ s}$ ,  $T_6 = 10 \text{ s}$

#### A.5. Parâmetros do regulador automático de tensão

$K_a = 200$ ,  $T_a = 0.15$ .

#### A.6 Cargas

As nove cargas conectadas possuem valores iguais e são puramente resistivas com:

$R = 1008.45 \Omega$

A carga que é chaveada durante o teste, possui:

$R = 150 \Omega$