

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUCAS ELIAS DOS SANTOS**

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADAS (PMUs)**

**FLORIANÓPOLIS – SC**

**2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Lucas Elias dos  
MODELAGEM E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADAS  
(PMUs) / Lucas Elias dos Santos ; orientador, Aguinaldo  
Silveira e Silva, 2019.  
78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Unidade de Medição Fasorial.  
3. Sinais Remotos. 4. Modos de Oscilação. 5. Controle  
Central. I. Silveira e Silva, Aguinaldo. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia  
Elétrica. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUCAS ELIAS DOS SANTOS**

Trabalho de conclusão de curso submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

Florianópolis, dezembro de 2019.




Lucas Elias dos Santos

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADAS (PMUs)**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 05 de dezembro de 2019.




---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

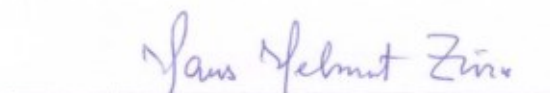


---

Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

Orientador


(Universidade Federal de Santa Catarina)



---

Hans Helmut Zurn, Ph.D.

(Universidade Federal de Santa Catarina)



---

Miguel Moreto, Dr.

(Universidade Federal de Santa Catarina)



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a meu orientador Aguinaldo Silveira e Silva, pessoa pela qual sempre tive grande admiração. Sua didática, paciência e confiança foram fundamentais em cada etapa para a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos colegas do LABSPOT, Manuel Moisés Bessa e Gisllane Oliveira, pelos seus esforços, pela paciência que tiveram desde o início. Seus ensinamentos e experiências com as ferramentas de simulação utilizadas neste trabalho, serviram de base para que o mesmo pudesse avançar rapidamente.

Meus agradecimentos aos professores da banca examinadora, Hans Helmut Zurn e Miguel Moreto, que contribuíram para a melhoria deste documento.

Agradeço e dedico este trabalho a meus pais, Sandra Regina Furini dos Santos e Anilton Elias dos Santos, que apesar de não estarem próximos, sempre confiaram em meus esforços e me apoiaram em todas as decisões.

Por fim, agradeço com muito carinho à Daiana Aparecida da Costa, minha amiga e companheira querida, que me apoiou e compartilhou comigo momentos significativos.





## RESUMO

Neste trabalho é proposta uma análise do impacto no comportamento dinâmico, em sistema de potência, que unidades de medição fasorial, integradas de tal maneira a realizar o controle do mesmo, poderiam causar, levando-se em consideração suas não idealidades como perdas de dados e atrasos através da propagação de sinais pelos canais de comunicação.

O estudo realizado considera a aplicação destas estruturas em locais remotos, por conseguinte, tal feito permite que topologias de controle mais complexas, envolvendo sinais de diferentes áreas, advindas destas unidades de medição, possam garantir a estabilidade do sistema, através de um considerável aumento no amortecimento dos modos de oscilação existentes. Estes sinais remotos, recebidos e processados em unidades centrais de controle, permitirão a geração de sinais destas para diversos locais do sistema, garantindo assim, a estabilidade global.

Para a aplicação deste estudo, primeiramente, o controlador central contará com apenas uma entrada e uma saída, utilizando assim, um sinal de velocidade vindo de uma unidade de geração para a alimentação, proporcionando em sua saída um sinal de tensão que se somará ao sistema de excitação de uma unidade geradora distinta. Tal compensador será projetado de acordo com métodos conhecidos na literatura para, posteriormente, dar início à análise do impacto no comportamento dinâmico do sistema de potência ao levar-se em consideração as não idealidades existentes da unidade remota de medição fasorial.

Palavras-chave: Unidade de Medição Fasorial; Sinais Remotos; Modos de Oscilação; Controle Central.



## **ABSTRACT**

This work proposes an analysis of the dynamic behavior impact caused by the phasor measurement units, considering the control performance applied by the signals produced from this device after it has been integrated in the power systems. The analysis will consider the data losses and delay propagation group through the communication channels in the device.

This study considers the application of this structures in remote locals, as a result, it allows that more complex control topologies could be ensure the power system stability through the oscillation mode's damping improvement. These remote signals, after been processed by central control units, will allow the generation of control signals to different places in the power system, keeping a global stability.

Firstly, for the application of this study, there will be a single input and a single output in the central controller, there will be a speed signal coming from a generation unit as input, providing a voltage signal in the output that will feed the excitation system of another generation unit. The controller will be projected according methods known in the literature for later starting the analysis of the impact in the dynamic behavior of the power system considering the non idealities in the remote phasor measurement unit.

**Keywords:** Phasor Measurement Unit; Remote Signals; Oscilation Modes; Central Control.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>1</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES .....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Motivação .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Definição do problema .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Objetivo Geral .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Objetivos Específicos .....</b>	<b>8</b>
<b>2 PROBLEMA DE ESTABILIDADE PARA PEQUENAS PERTURBAÇÕES .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Estabilidade para pequenos sinais e transitória .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Representação dos componentes de controle do gerador síncrono .....</b>	<b>9</b>
<i>2.2.1 Controle de tensão .....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2 Estabilizadores de sistemas de potência .....</i>	<i>12</i>
<b>2.3 Modelagem do sistema de potência .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Método de projeto de estabilizadores .....</b>	<b>15</b>
<b>3 CONTROLE DE ÁREA AMPLA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Unidade de medição fasorial (PMU) .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Problemas associados às PMUs .....</b>	<b>23</b>
<i>3.2.1 Atrasos médios e máximos das PMUs para os PDCs .....</i>	<i>24</i>
<i>3.2.2 Atrasos médios de dados que foram processados nos PDCs .....</i>	<i>26</i>
<i>3.2.3 Taxa de perda de pacotes de dados .....</i>	<i>27</i>
<b>3.3 Disposição de estruturas globais de controle do sistema .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Modelagem do sistema PMU-PDC .....</b>	<b>31</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Sistema teste .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. Projeto dos compensadores para a realização do controle hierárquico .....</b>	<b>34</b>
<i>4.2.1 Compensador central do sistema com quatro estabilizadores .....</i>	<i>35</i>
<i>4.2.2 Compensador central do sistema com três estabilizadores .....</i>	<i>38</i>

4.3 Controle com perda de dados e atrasos .....	40
4.4 Resultados das simulações para o sistema com quatro estabilizadores locais .....	42
4.5 Resultados das simulações para o sistema com três estabilizadores locais .....	45
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE A      DADOS DO SISTEMA .....</b>	<b>57</b>
<b>A1 Sistema .....</b>	<b>57</b>
<i>A1.1 Autovalores do sistema de potência com quatro estabilizadores locais .....</i>	<i>58</i>
<i>A1.2 Autovalores do sistema com quatro estabilizadores locais, mais compensação             central l .....</i>	<i>59</i>
<i>A1.3 Autovalores do sistema de potência com três estabilizadores locais .....</i>	<i>60</i>
<i>A1.4 Autovalores do sistema com três estabilizadores locais, mais compensação             central .....</i>	<i>61</i>
<i>A1.5 Definição dos dados das máquinas no arquivo de execução do PacDyn .....</i>	<i>62</i>
<i>A1.6 Definição, apenas do sistema de excitação da máquina 1 e do controlador             central na planta cujo modo de oscilação é estável .....</i>	<i>63</i>
<i>A1.7 Definição, apenas do sistema de excitação da máquina 1 e do controlador             central na planta cujo modo de oscilação é instável .....</i>	<i>64</i>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Malhas de controle de um gerador hidráulico básico .....	10
<b>Figura 2</b> – Raízes da malha do regulador automático de tensão sem compensação .....	11
<b>Figura 3</b> – Malhas do regulador automático de tensão .....	12
<b>Figura 4</b> – Modelo de estabilizador .....	12
<b>Figura 5</b> – Função de transferência do controlador .....	15
<b>Figura 6</b> – Diagrama de blocos do sistema controlado .....	16
<b>Figura 7</b> – Ângulo de compensação $\varphi$ sobre o vetor $G(\sigma+j\omega)$ no plano complexo .....	17
<b>Figura 8</b> – Lugar geométrico de amortecimento constante .....	18
<b>Figura 9</b> – Arquitetura Interna da PMU .....	22
<b>Figura 10</b> – Visão Geral de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizado .....	23
<b>Figura 11</b> – Distribuição dos atrasos médios da PMU-1 não processados .....	24
<b>Figura 12</b> – Distribuição dos atrasos máximos da PMU-1 não processados .....	26
<b>Figura 13</b> – Distribuição média dos atrasos processados no PDC-1 .....	27
<b>Figura 14</b> – Estrutura de controle descentralizado .....	29
<b>Figura 15</b> – Estrutura de controle quase centralizado .....	29
<b>Figura 16</b> – Estrutura de controle centralizado .....	30
<b>Figura 17</b> – Estrutura de controle hierárquico .....	30
<b>Figura 18</b> – Representação do controle central com PMU e PDC integrados .....	31
<b>Figura 19</b> – Representação do controle hierárquico com PMU e PDC integrados .....	32
<b>Figura 20</b> – Sistema de potência a ser analisado .....	33
<b>Figura 21</b> – Fatores de controlabilidade das tensões de referência das máquinas .....	35
<b>Figura 22</b> – Fatores de observabilidade dos sinais de velocidade das máquinas .....	35
<b>Figura 23</b> – Controlador central do sistema com modos estáveis de oscilação determinado no MATLAB .....	36
<b>Figura 24</b> – Representação do comportamento (no domínio da frequência) do controlador para o sistema de modos estáveis .....	37
<b>Figura 25</b> – Resposta do sistema de modos estáveis: velocidade do gerador 3 (com e sem compensação) .....	37
<b>Figura 26</b> – Controlador central do sistema teste com modos instáveis de oscilação determinado no MATLAB .....	39
<b>Figura 27</b> – Representação do comportamento (no domínio da frequência) do controlador para o sistema de modos instáveis .....	39

<b>Figura 28</b> – Resposta do sistema de modos instáveis: velocidade do gerador 4 (com e sem compensação) .....	40
<b>Figura 29</b> – Representação do controle com atrasos e perdas das PMU e PDC integrados....	41
<b>Figura 30</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 80 ms na malha de controle, mais perdas) .....	43
<b>Figura 31</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 150 ms na malha de controle, mais perdas) .....	44
<b>Figura 32</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 240 ms na malha de controle, mais perdas) .....	44
<b>Figura 33</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 270 ms na malha de controle, mais perdas) .....	45
<b>Figura 34</b> – Resposta do sistema controlado sem perdas e atrasos .....	45
<b>Figura 35</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 .....	46
<b>Figura 36</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 80 ms na malha de controle, mais perdas) .....	46
<b>Figura 37</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 150 ms na malha de controle, mais perdas) .....	47
<b>Figura 38</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 200 ms na malha de controle, mais perdas) .....	47
<b>Figura 39</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 240 ms na malha de controle, mais perdas) .....	48
<b>Figura 40</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 270 ms na malha de controle, mais perdas) .....	48
<b>Figura 41</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 400 ms na malha de controle, mais perdas) .....	49
<b>Figura 42</b> – Velocidade do gerador 4 com o controlador central (representada vermelho, com 500 ms de atraso) e em malha aberta (representado em azul) .....	49
<b>Figura 43</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (perdas de 15,9%) ...	50
<b>Figura 44</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (perdas de 50%) .....	50
<b>Figura 45</b> – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (perdas de 84,1%) ...	51



**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> – Dados referentes aos atrasos médios das PMUs, com <i>frames</i> não processados ...	25
<b>Tabela 2</b> – Dados referentes aos atrasos máximos das PMUs, com <i>frames</i> não processados	26
<b>Tabela 3</b> – Dados referentes aos atrasos médios dos <i>frames</i> processados pelos PDC .....	27
<b>Tabela 4</b> – Dados referentes às perdas das PMUs .....	28
<b>Tabela 5</b> – Modos de oscilação do sistema teste para os dois casos analisados.....	34
<b>Tabela 6</b> – Parâmetros do controlador central do sistema teste com modos estáveis .....	36
<b>Tabela 7</b> – Modos de oscilação do sistema do caso 1 operando em malha aberta e fechada .	38
<b>Tabela 8</b> – Parâmetros do controlador central do sistema teste com modos instáveis .....	38
<b>Tabela 9</b> – Modos de oscilação do sistema do caso 2 operando em malha aberta e fechada .	40
<b>Tabela 10</b> – Porcentagem de amostras perdidas .....	42



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ALFC – *Automatic Load-Frequency Control* (Controle Automático de Carga-Frequência)

AVR – *Automatic Voltage Regulator* (Regulador Automático de Tensão)

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

FACTS – *Flexible Alternating current transmission system*

FINEP – Financiadora de estudos e projetos

GPS – *Global Position System* (Sistema de Posicionamento Global)

LABSPOT – Laboratório de Sistemas de Potência

ONS – Operador Nacional do Sistema

PDCS – *Phasor Data Concentrator System* (Sistema de Concentração de Dados Fasoriais)

PMU – *Phasor Measurement Unit* (Unidade de Medição Fasorial)

POD – *Power Oscillation Damping*

PSS – *Power System Stabilizer* (Estabilizador de Sistemas de Potência)

RTU – *Remote terminal Unit*

SEE – Sistemas de Energia Elétrica

SPMS – *Synchronized Phasor Measurement System* (Sistema de Medição Fasorial Sincronizado)

TCP – *Trasmission Control Protocol*

UDP – *User Datagram Protocol*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VoIP – *Voice over Internet Protocol*

WAC – *Wide Area Control*

WAMS – *Wide Area Measurement System*



## 1 INTRODUÇÃO

Através de ideias aplicadas em países como, Estados Unidos (este sendo o pioneiro em pesquisas com unidades de medição fasorial), França, Dinamarca, entre outros, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), financiada pela fabricante de equipamentos de monitoração *Reason Tecnologia S.A* e pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), deu início ao projeto MedFasee, em 2003, sendo este o primeiro a iniciar com os estudos da tecnologia de medição fasorial no Brasil. O objetivo do projeto, consistia em desenvolver, divulgar, compreender e contribuir para o desenvolvimento da tecnologia (FÜRSTENBERGER, A, 2010).

A segunda vertente brasileira de pesquisa, neste campo, surgiu devido à dificuldade enfrentada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), no que se refere ao controle do sistema, na acurácia de modelos mais confiáveis que pudessem garantir um controle mais eficiente e previsível das malhas de potência, levando em conta sua expansibilidade, já que a crescente demanda implica em um aumento do sistema até então existente.

Conforme Dotta. D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009), as aplicações de unidades de medição fasorial (PMUs) em sistemas de potência poderia trazer grandes benefícios, pois as mesmas poderiam desempenhar um papel eficiente na realização do controle, garantindo assim, a estabilidade.

### 1.1 Motivação

De acordo com Dotta. D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009), as PMUs mostraram-se eficientes no levantamento de dados em tempo real, garantindo bons resultados para exercer a análise e o controle de malhas de distribuição de energia, porém, apesar da crescente aplicação das mesmas, não há registros de estudo de caso, considerando as limitações das unidades integradas a este sistema.

### 1.2 Definição do problema

Os sistemas de potência, hoje em dia, além de complexos, se estendem por grandes áreas geográficas e variam em termos de componentes estruturais e de tamanho, e a tecnologia digital, tem servido de grande auxílio para a garantia do funcionamento destes, atuando no monitoramento, na aplicação de esforços de controle, resultando na estabilidade dos mesmos e na proteção.

Diante dos avanços tecnológicos e ideias para a aplicação em sistemas de potência, a tecnologia de medição fasorial sincronizada tem sido objeto de grande interesse. Embora existam projetos em alguns países que visam à utilização de PMUs, o crescimento e diversificação do uso desta tecnologia, são esperados para os próximos anos. No entanto, estas unidades já estão sendo utilizadas em subestações, auxiliando na coleta de dados para análise de perturbações, monitoramento e controle de emergência, conforme DECKER, I. C., et al. (2004).

De acordo com Dotta, D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009), ações de controle, incluindo esquemas de controle baseados em novas tecnologias, podem ser alternativas que garantam a melhoria da segurança e do controle de sistemas de potência com problemas de estabilidade para pequenos sinais (oscilações eletromecânicas de baixa frequência).

Conforme Dotta, D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009), aplicações de unidades de medição fasorial em sistemas com oscilações eletromecânicas, podem desempenhar um papel eficiente na realização do controle dos modos de oscilação. Estes podem levar a blackouts ou ao limite de fluxo de potência transferido entre diferentes áreas (Dotta, D.; Silva, A.S.; I. C.; Decker, I.C., 2009).

Portanto, este trabalho contribuirá com uma análise de controle que garantirá um maior amortecimento das oscilações eletromecânicas por meio da aplicação de PMUs.

### **1.3 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o quanto que as limitações de hardware das PMUs (responsáveis por gerar atrasos e perdas de dados) afetariam a infraestrutura de controle do sistema de potência.

### **1.4 Objetivos Específicos**

- Analisar um modelo de sistema, considerando as limitações de hardware das PMUs implantadas, como: atraso de processamento, perdas de pacotes (*frames*) de dados;
- Verificar a viabilidade da aplicação através das influências que tais limitações causam na dinâmica deste sistema.

## **2 PROBLEMA DE ESTABILIDADE PARA PEQUENAS PERTURBAÇÕES**

Este capítulo aborda os tipos de estabilidade existentes em sistemas de potência e seus respectivos problemas. São apresentados os componentes responsáveis pelo controle de máquinas síncronas, focando no sistema de excitação e nas suas unidades de estabilização de potência. Estas são brevemente exploradas para poder apresentar um método de projeto de controladores que garante a estabilidade para pequenos sinais do sistema.

### **2.1 Estabilidade para pequenos sinais e transitória**

Segundo Aramayo (1992), existem dois grandes grupos de estabilidade: estabilidade para pequenos sinais e estabilidade transitória. Esta última representa o estudo da capacidade das máquinas, no sistema, de manterem o sincronismo quando ocorrerem grandes perturbações como curtos circuitos, por exemplo. Para a realização da análise do sistema, técnicas não lineares são aplicadas.

A estabilidade para pequenos sinais se refere ao estudo da resposta do sistema para pequenas perturbações, como alterações de carga e oscilações eletromecânicas existentes em sistemas de potência. Neste estudo, é analisada a capacidade que tem as máquinas de apresentarem amortecimento adequado logo após uma perturbação (pequenos sinais) e modelos lineares, bem como as técnicas de sistemas lineares, podem ser empregados para a modelagem dos componentes do sistema.

Aramayo (1992) afirma que a operação de sistemas contendo estes modos de oscilação (oscilações eletromecânicas), é uma indicação de que o mesmo está trabalhando próximo dos limites de estabilidade, onde certas perturbações poderiam resultar em seu colapso. Estes modos pouco amortecidos apresentam frequências na ordem de 0,2 a 2,0 Hz (PADIYAR, 2008).

No entanto, sinais estabilizadores adicionados ao sistema de excitação dos geradores constituem uma solução para o problema de oscilações eletromecânicas. Os mesmos enviam sinais, modulando convenientemente o sistema de excitação, sendo capazes, portanto, de gerar um amortecimento adicional para o sistema.

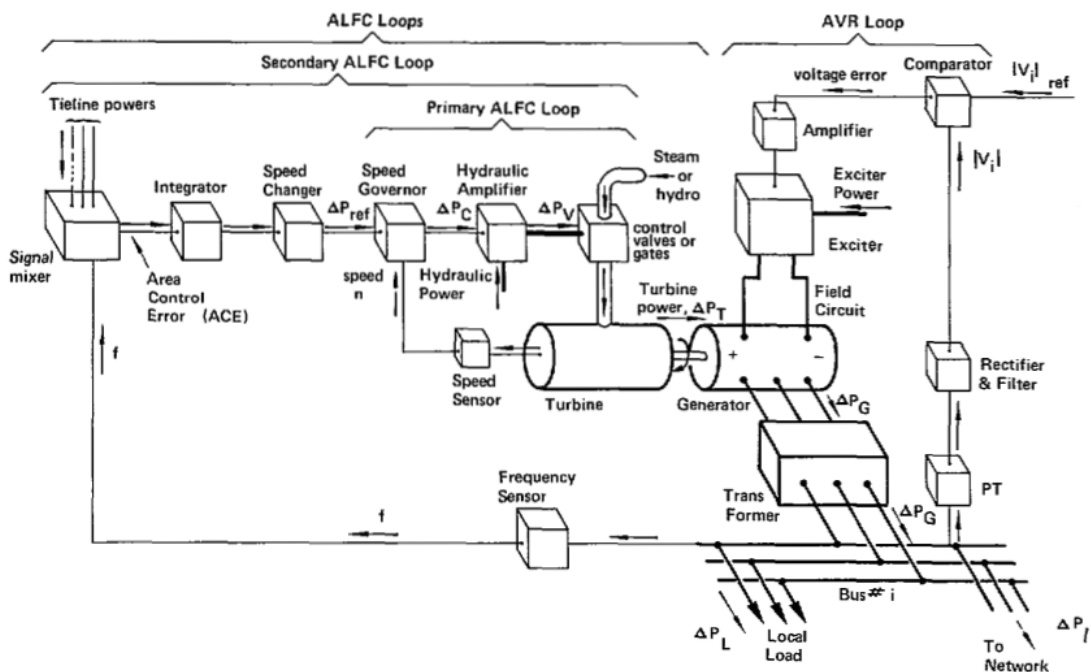
### **2.2 Representação dos componentes de controle do gerador síncrono**

Conforme Elgerd (1971), a regulação do torque da turbina garante a injeção de potência ativa ao sistema, enquanto que a regulação de potência reativa está ligada à regulação dos enrolamentos de campo via excitatriz. Uma máquina possui duas malhas de

controle automático, conforme mostrado na figura 1. A malha do regulador automático de tensão (AVR), mantém a tensão na barra por meio da manipulação do fluxo de potência reativa ( $Q_G$ ) do gerador, enquanto que a malha de controle automático de carga-frequência (ALFC), mantém a frequência constante por meio da manipulação da potência ativa ( $P_G$ ).

Segundo Elgerd (1971), ambas as malhas são projetadas para fazer a máquina operar ao redor da faixa de estado normal, com pequenas excursões das variáveis. Estas podem ser modeladas através da linearização das equações (aproveitando apenas o primeiro termo diferencial da expansão em série de Taylor), resultando assim, em funções lineares.

**Figura 1** – Malhas de controle de um gerador hidráulico básico



Fonte: Elaborado por Elgerd (1971)

Como o sistema de excitação recebe sinais advindos de controladores responsáveis pela melhoria dos modos de oscilação, sua estrutura, bem como seu sistema de estabilização, serão detalhados a seguir.

### 2.2.1 Controle de tensão

O controle de tensão, mostrado na figura 1, é medido por meio de um transformador de potencial (PT), em seguida, o sinal passa por um filtro retificador para poder ser comparado com uma referência, gerando um sinal de erro, este é amplificado, servindo como entrada na excitatriz para alimentar o gerador de campo.

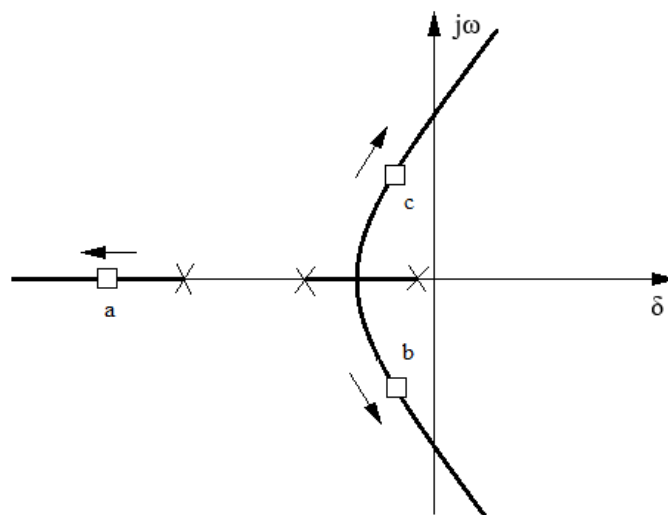


O sistema de controle de tensão é composto por três constantes de tempo. Estas são originadas pelo amplificador, pela excitatriz (sistema de excitação) e pelo circuito de campo. A constante mais lenta pertence ao circuito de campo, podendo atingir valores entre 5 e 10 segundos. Estes três componentes representam três polos reais em malha aberta, conforme as marcações “x” que podem ser observadas na figura 2.

Elgerd (1971), afirma que em malha fechada, este sistema deve responder em menos de 0.1 s, superando o problema do lento transitório do circuito de campo. Para este aumento de velocidade, é necessário produzir um grande ganho em malha fechada, o que também possibilita o alcance de uma resposta cujo erro estático (em regime permanente) atinja a acurácia necessária, porém, esta rápida operação da malha do controle de excitação, aliada às condições de grandes potências transferidas a longas distâncias, podem ocasionar problemas de estabilidade para pequenos sinais (PADIYAR, 2008).

Portanto, a malha de controle de excitação precisa de uma estabilização eficaz para que os requisitos de velocidade, precisão e estabilidade possam ser alcançados simultaneamente. Estes estabilizadores atuam diretamente sobre o sistema de excitação, por meio de sinais suplementares, aumentando assim, o amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos.

**Figura 2** – Raízes da malha do regulador automático de tensão sem compensação



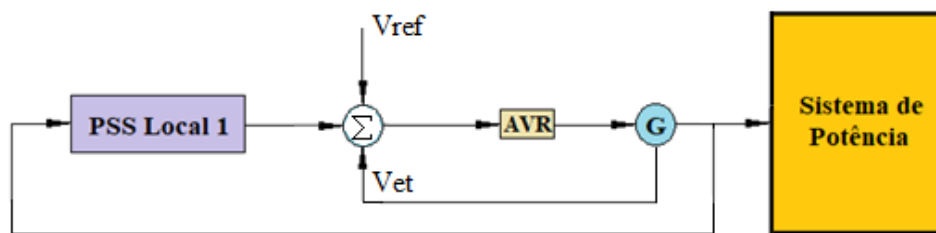
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 2, os quadrados representados pelas letras *a*, *b* e *c*, definem o posicionamento dos polos ao fechar a malha do controle de excitação, e as setas indicam os seus respectivos sentidos de deslocamento ao aumentar o ganho existente nesta.

### 2.2.2 Estabilizadores de sistemas de potência

O estabilizador de sistemas de potência (PSS) tem, por objetivo, gerar sinais de controle que garantam a estabilidade do sistema durante a sua operação, levando em consideração as variações de carga. Este dispositivo recebe um sinal de entrada e sua saída é somada à referência de tensão do regulador automático de tensão, conforme mostrado na figura abaixo:

**Figura 3** – Malhas do regulador automático de tensão

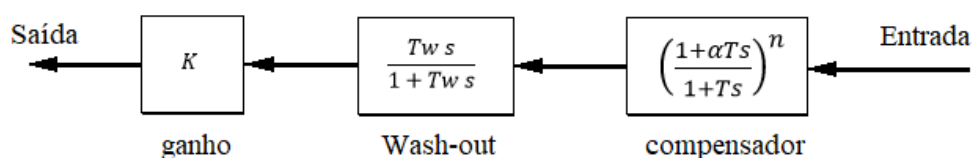


Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Aramayo (1992), os PSSs são a solução usual adotada pela indústria elétrica para a aplicação, garantindo a melhoria do amortecimento das oscilações eletromecânicas existentes. O estabilizador pode usar como sinal de entrada a velocidade, a frequência, a potência elétrica, a tensão terminal ou uma combinação de todos estes sinais.

Este bloco, normalmente é do tipo avanço-atraso de fase e pode ser facilmente implementado. A instalação destas unidades na indústria também engloba o projeto de seus parâmetros. Por se tratar de um dispositivo avanço-atraso, um único bloco apresenta três parâmetros ( $k$ ,  $T$ ,  $\alpha$ ) de ajuste, conforme mostrado na figura abaixo:

**Figura 4** – Modelo de estabilizador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na figura acima, o estabilizador também apresenta um bloco conhecido como *Wash-out*. Este componente é um filtro passa-altas cujo objetivo é evitar a atuação do PSS em regime permanente.

### 2.3 Modelagem do sistema de potência

Conforme Silva e Prioste (2007), as equações diferenciais e algébricas que definem o sistema de potência são representadas por:

$$x' = f(x, z, u) \quad (2.3.1)$$

$$0 = g(x, z, u) \quad (2.3.2)$$

$$y = h(x, z) \quad (2.3.3)$$

Onde:

- $x$  : vetor de variáveis de estados;
- $u$ : variáveis de entrada;
- $z$  : vetor de variáveis algébricas do sistema;
- $f$ : campo vetorial;
- $g$ : vetor de funções;
- $h$ : vetor de variáveis de saída;

As equações diferenciais (2.3.1) representam os modelos de geradores, seus respectivos controladores e cargas dinâmicas (motores de indução, etc).

Nas equações (2.3.2) estão incluídas as conexões de componentes como geradores, motores de indução e compensadores estáticos de reativo à rede. Nestas também estão incluídas as equações da rede elétrica:

$$I = YV \quad (2.3.4)$$

Onde:

- $I$ : injeções de correntes nas barras;
- $Y$ : matriz de admitâncias do sistema;
- $V$ : tensões nas barras.

Desconsiderando a explicitação de  $u$  para a análise (sistema não-forçado), as equações (2.3.1) e (2.3.2) podem ser linearizadas ao redor de um ponto de operação  $(x_0, y_0)$  fornecido pelo fluxo de potência, obtendo-se:

$$\Delta x' = \frac{\partial f}{\partial x} |_{(x_0, z_0)} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial z} |_{(x_0, z_0)} \Delta z \quad (2.3.5)$$

$$0 = \frac{\partial g}{\partial x} |_{(x_0, z_0)} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial z} |_{(x_0, z_0)} \Delta z \quad (2.3.6)$$

Denotando:

- $J1 = \frac{\partial f}{\partial x} |_{(x_0, z_0)}$ ;
- $J2 = \frac{\partial f}{\partial z} |_{(x_0, z_0)}$ ;
- $J3 = \frac{\partial g}{\partial x} |_{(x_0, z_0)}$ ;
- $J4 = \frac{\partial g}{\partial z} |_{(x_0, z_0)}$ .

A ferramenta Pacdyn, desenvolvida pela CEPTEL, será utilizada para o cálculo das matrizes do sistema linearizado, representado por:

$$\Delta x' = J1\Delta x + J2\Delta z + B1\Delta u \quad (2.3.7)$$

$$0 = J3\Delta x + J4\Delta z + B2\Delta u \quad (2.3.8)$$

$$\Delta y = C1\Delta x + C2\Delta z \quad (2.3.9)$$

Onde:

- $\Delta x$  : vetor de variáveis de estados;
- $\Delta z$  : vetor de variáveis algébricas do sistema;
- $\Delta u$ : variáveis de entrada;
- $\Delta x'$  : vetor de termos diferenciais;
- $\Delta y$ : vetor de variáveis de saída;
- $B1, B2$ : vetores de entrada;
- $C1, C2$ : vetor de saída;

O sistema definido pelas equações 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3 pode ser reescrito, eliminando as variáveis algébricas  $\Delta z$ :

$$\Delta x' = \mathbf{A} \Delta x + \mathbf{B} \Delta u \quad (2.3.10)$$

$$\Delta y = \mathbf{C} \Delta x + \mathbf{D} \Delta u \quad (2.3.11)$$

Onde:

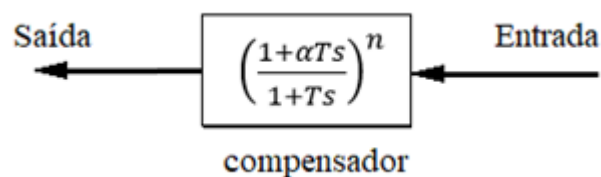
- $\mathbf{A} = \mathbf{J1} - \mathbf{J2} (\mathbf{J4})^{-1} \mathbf{J3}$ ;
- $\mathbf{B} = \mathbf{B1} - \mathbf{J2} (\mathbf{J4})^{-1} \mathbf{B2}$ ;
- $\mathbf{C} = \mathbf{C1} - \mathbf{C2} (\mathbf{J4})^{-1} \mathbf{J3}$ ;
- $\mathbf{D} = \mathbf{C2} (\mathbf{J4})^{-1} \mathbf{B2}$ .

## 2.4 Método de projeto de estabilizadores

Na literatura existem vários métodos de projeto de estabilizadores para a melhoria dos modos de oscilação. Para a realização deste trabalho, um procedimento analítico, utilizando a técnica de posicionamento parcial de polos será realizado. Este método de projeto, extraído de GUIMARÃES, C. H. C., et al. (2000), visa melhorar o amortecimento dos modos eletromecânicos posicionando-os em outro ponto mais adequado do plano complexo.

O ajuste do controlador é realizado com base em um sinal de entrada, podendo este ser de velocidade, posição, tensão ou de potência. A estrutura de controle, conforme a função de transferência da figura 5 admite  $n$  polos reais iguais e também  $n$  zeros reais iguais. Tais valores são calculados através de um algoritmo desenvolvido para este propósito.

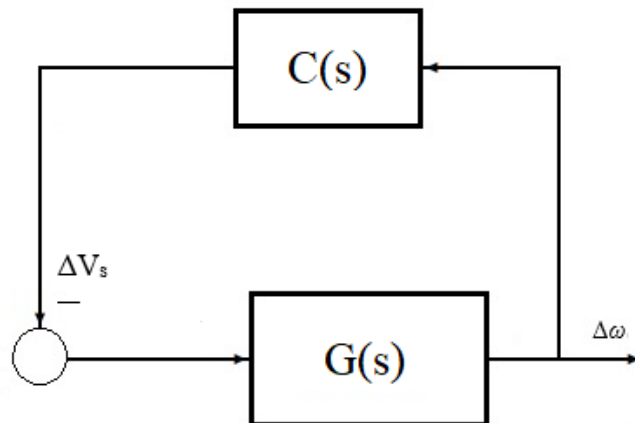
**Figura 5** – Função de transferência do controlador



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama de blocos, representando o controlador  $C(s)$  e o sistema de potência  $G(s)$ , pode ser definido da seguinte forma:

**Figura 6** – Diagrama de blocos do sistema controlado



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo:

- $\Delta\omega$ : Sinal de variação da velocidade, por exemplo;
- $\Delta V_s$ : Sinal de variação de tensão (saída).

A função de transferência do sistema potência não controlado é dada por:

$$G(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (2.4.1)$$

Onde:

- **I**: Representa a matriz identidade.

Para a determinação dos polos do sistema controlado, a seguinte equação, com base na função de transferência gerada pelo sistema da figura anterior, deverá ser solucionada:

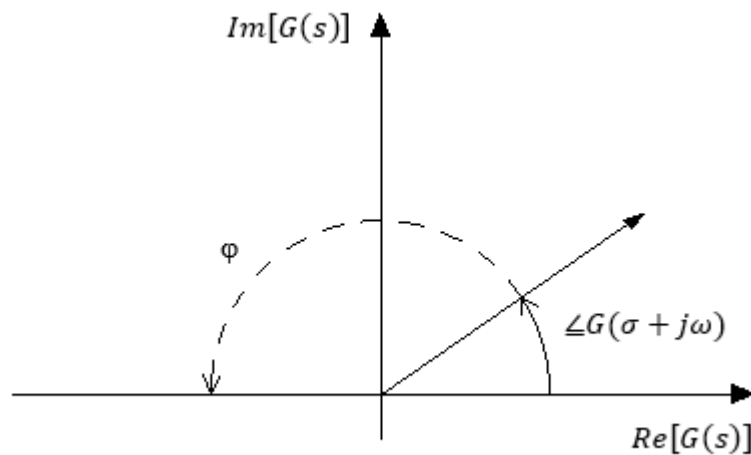
$$0 = 1 + C(s)G(s) \quad (2.4.2)$$

Isolando-se a unidade da equação anterior, surgirão duas condições que precisarão ser atendidas:

- Condição de pertinência angular:  $\angle C(s)G(s) = 180^\circ$
- Condição de pertinência de módulo:  $|C(s)G(s)| = 1$

Segundo GUIMARÃES, C. H. C., et al. (2000), o ângulo  $\varphi$  ( $\angle C(s)$ ) do bloco avanço-atraso, somado ao ângulo  $\angle G(s)$  da planta, na frequência complexa  $s = \sigma + j\omega$ , deve atender a condição de pertinência angular. A figura a seguir ilustra a definição do ângulo de compensação  $\varphi$  para o atendimento desta primeira condição:

**Figura 7** – Ângulo de compensação  $\varphi$  sobre o vetor  $G(\sigma + j\omega)$  no plano complexo



Fonte: Elaborado pelo autor

O controlador adicionado apresenta um ganho  $K$ , que devidamente ajustado, na frequência  $s = \sigma + j\omega$  desejada, atende a condição de módulo, conforme o equacionamento abaixo:

$$K = \frac{1}{|G(s)C(s)|} \quad (2.4.3)$$

Conforme GUIMARÃES, C. H. C., et al. (2000), o ângulo de compensação  $\varphi$  adicionado pelo bloco de avanço-atraso é limitado, sendo usual considerar  $|\varphi| \leq 60^\circ$ . Portanto, caso haja necessidade de aumentar este ângulo, pode-se utilizar  $n$  blocos de avanço-atraso em série, garantindo assim, um ângulo  $n\varphi$  capaz de atender a condição de pertinência angular.

Sendo assim, a representação geral deste estabilizador será:

$$C(s) = K \left( \frac{1 + \alpha Ts}{1 + Ts} \right)^n \quad (2.4.4)$$

Para a realização do cálculo do ângulo de compensação, deve-se primeiramente considerar o bloco *wash-out* em série com a planta, para que se possa extrair o fasor da função de transferência no modo de oscilação existente. A partir da geração deste vetor, o algoritmo

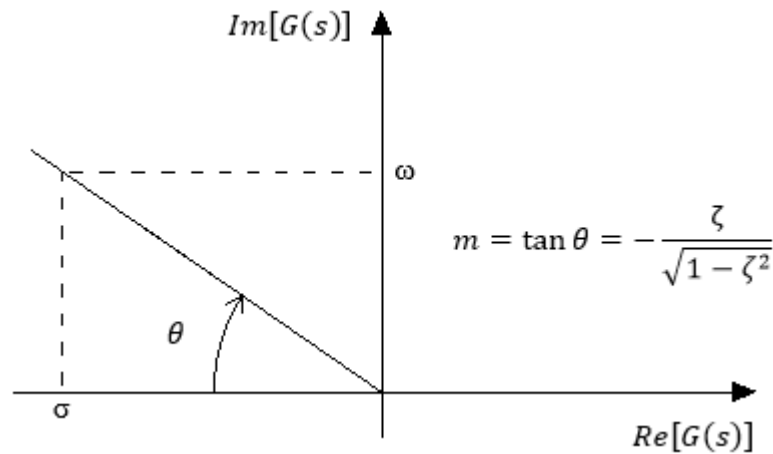
inicia o cálculo do amortecimento desejado pelo usuário na frequência do modo de oscilação existente.

O amortecimento  $\zeta$  definido pelo usuário é utilizado para encontrar o lugar geométrico de  $\varphi$ , garantindo que a parte real do posicionamento do polo, em malha fechada, atenda as especificações de frequência (oscilação do modo) com o amortecimento  $\zeta$  definido. Este lugar geométrico representa uma reta cujo coeficiente angular  $m$  será igual a:

$$m = -\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.4.5)$$

A figura abaixo ilustra este lugar geométrico:

**Figura 8** – Lugar geométrico de amortecimento constante



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao ângulo  $\varphi$  adicional, segundo GUIMARÃES, C. H. C., et al. (2000), este pode ser determinado baseando-se na análise dos componentes vetoriais real e complexo do polo e do zero do controlador. Portanto, através dos produtos escalar e vetorial aplicados nestes componentes vetoriais, considerando a parte real do polo a ser posicionada como:  $\sigma = m\omega$  (definida pelo lugar geométrico ilustrado na figura anterior), a seguinte expressão genérica pode ser calculada:

$$\tan \varphi = \frac{(\alpha-1)T\omega}{1+(1+\alpha)Tm\omega+(m^2+1)\alpha T^2\omega^2} \quad (2.4.6)$$

Conforme GUIMARÃES, C. H. C., et al. (2000), pode-se determinar a condição para que  $\varphi$  assumo o máximo valor de avanço ou atraso de fase, na frequência desejada pelo



usuário, ao aplicar a derivação do ângulo  $\varphi$  em relação a  $\omega$ , igualando a zero a expressão resultante desta operação. Sendo assim, a seguinte equação é deduzida:

$$\alpha = \frac{1}{(m^2+1)T^2\omega^2} \quad (2.4.7)$$

Realizando a substituição de  $\alpha$  (equação 2.4.7) na expressão de  $\tan\varphi$  (equação 2.4.6) e isolando os termos deste resultado, determina-se a seguinte equação:

$$aT^2 + bT + c = 0 \quad (2.4.8)$$

Onde:

- $a = (m^2 + 1)\omega^2(m \tan \varphi + 1)$ ;
- $b = 2(m^2 + 1)\omega \tan \varphi$ ;
- $c = m \tan \varphi - 1$ .

Pode-se determinar o valor de  $T$  da equação de segundo grau, definida em (2.4.8), com facilidade, pois os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes. Como a solução resultará em dois valores, apenas o maior valor positivo desta equação foi utilizado para calcular o parâmetro  $\alpha$  da equação (2.4.7).

Com base nos valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $T$ , o terceiro parâmetro ( $k$ ) pode ser determinado, garantindo o atendimento da condição de módulo.

Portanto, um algoritmo foi desenvolvido no MATLAB para a realização dos cálculos de reposicionamento de polos, seguindo os passos apresentados nesta subseção. Este método analítico mostrou-se essencial para a realização do projeto do controlador responsável pela melhoria dos modos de oscilação que o sistema teste, que será apresentado na subseção 4.1, expôs.



### 3 CONTROLE DE ÁREA AMPLA

Esquemas de controle convencionais compreendem PSSs que geram sinais de controle locais. Conforme Dotta, D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009), a necessidade de se utilizar esquemas de controle centrais, compreendendo grandes áreas (WAC), permite a otimização global da performance do sistema. No entanto, atrasos na transmissão de sinais entre áreas diferentes devem ser levados em consideração durante o projeto de controladores, pois estes podem afetar o comportamento dinâmico do sistema. Estes aspectos serão melhor explorados no decorrer deste capítulo.

Neste capítulo, serão apresentadas algumas arquiteturas de controle global, bem como as PMUs, os concentradores de dados fasoriais (PDCs) e suas respectivas não idealidades existentes no processo de leitura, transmissão, processamento e aplicações. Estas unidades serão utilizadas para a realização do controle de área ampla, através de sinais que serão transmitidos remotamente das PMUs para os PDCs.

#### 3.1 Unidade de medição fasorial (PMU)

De acordo com DECKER, I. C., et al. (2004), países como Estados Unidos, França e alguns integrantes dos países nórdicos, desenvolveram pesquisas neste campo, sendo que os mesmos apresentam a maior parte da documentação existente sobre o tema. Segundo Fürstenberger (2010), a China, atualmente, tem ganhado destaque através de pesquisas e aplicações deste sistema, visando melhorias na supervisão, operação, proteção e controle de seu SEE.

Estados Unidos, por ser o pioneiro no estudo destas unidades de medição fasorial, apresenta o maior número de pesquisas e registros documentados. Parcerias existentes entre companhias do setor elétrico e universidades, iniciaram as pesquisas, na década de 80, através do projeto WAMS (“Wide Area Measurement System”).

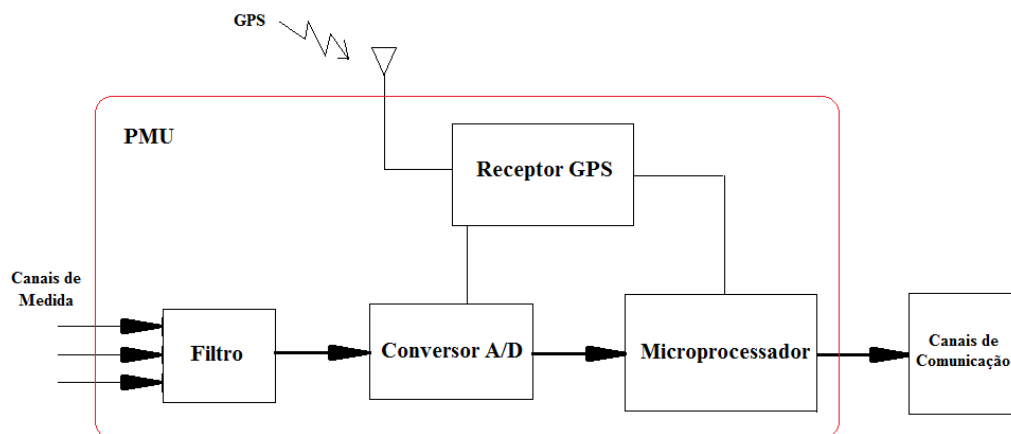
No Brasil, quando esta tecnologia passou a ser estudada, uma parceria entre a UFSC, financiada pela FINEP e a *Reason Tecnologia S.A*, foi feita, dando origem às primeiras unidades de medição no Brasil.

A PMU conta com um núcleo de processamento de dados. Este realiza os cálculos para a determinação dos fasores de tensão e corrente no local onde a mesma foi instalada. Estas PMUs podem estar dispostas em diferentes regiões de uma grande malha integrada de potência, sendo capazes de fazer a aquisição e processamento de amostras quando um sinal de sincronização temporal, por meio do sistema GPS, for recebido. Esta estratégia reduz a

diferença de tempo entre as coletas de dados de diferentes PMUs instaladas em diferentes pontos de um grande sistema de potência. Sabendo que há atrasos nos canais de comunicação entre PMU-PDC, cada amostra gerada apresenta uma etiqueta de tempo. Estas etiquetas, recebidas por diferentes PMUs, permitem o concentrador de dados organizá-las, gerando assim, uma amostra em tempo real do estado do sistema de potência.

Uma PMU possui, em sua estrutura, filtros *anti-aliasing* (anti-recobrimento) nos canais de entrada, pois os sinais de tensão e de corrente serão amostrados a uma determinada taxa. Sendo assim, estes filtros servem para evitar a leitura de falsos componentes de frequência, oriundos do processo de amostragem do sinal analógico. A mesma unidade possui um conversor A/D (Analogico/Digital), um sistema de recepção do sinal de sincronização do GPS, um microprocessador para o tratamento dos dados e canais de comunicação para o envio dos mesmos. A arquitetura deste sistema pode ser visualizada na figura 9.

**Figura 9** – Arquitetura Interna da PMU

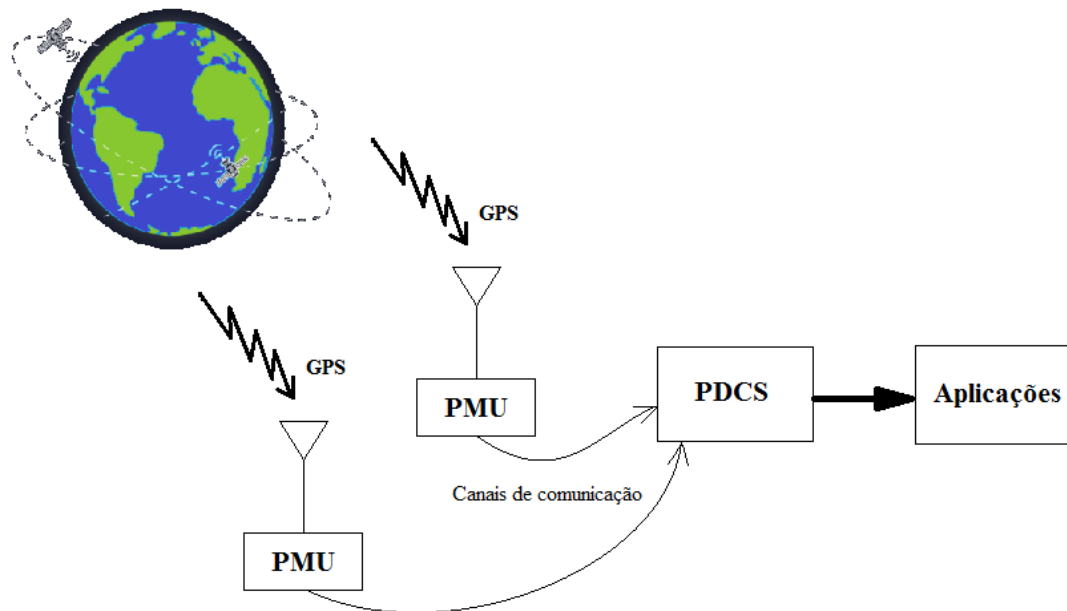


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para organizar e concentrar os dados coletados, um sistema de armazenamento se faz necessário. O PDC é o principal dispositivo de auxílio, desenvolvido para esta finalidade. Conforme Fürstenberger (2004), este sistema tem por objetivo receber, processar, armazenar e disponibilizar os dados fasoriais, tanto para análise de dados históricos (análises de estudos), quanto para processamento em tempo real (aplicações de monitoração).

Um exemplo da estrutura de medição fasorial está ilustrado na figura 10.

**Figura 10** – Visão Geral de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Problemas associados às PMUs

Uma PMU pode apresentar diferentes características que dependem de seus fabricantes. Para a aplicação no controle de sistemas de potência, tais características de hardware podem impactar em tempos de atrasos que devem ser considerados na resposta do controlador.

Outras limitações como: perturbações na comunicação entre a PMU e o PDC, podem causar perdas de pacotes de dados. Segundo Zhu (2013), para generalizar as limitações do sistema PMU-PDC, foi realizado um estudo envolvendo a coleta de dados de dois PDCs, e oito PMUs de diferentes fabricantes. Todas as unidades de medição foram instaladas em distâncias que variavam de 130 a 500 km de seus PDCs.

Estes estudos foram realizados durante um período de dois meses e forneceram informações para a caracterização das perdas de dados e atrasos na comunicação das PMUs. Esta coleta proporciona a identificação das distribuições de probabilidade considerando:

- Os atrasos médios e máximos das PMUs para os PDCs (dados não processados);

- Os atrasos médios de dados que foram processados nos PDCs;
- A taxa de perda de pacotes de dados.

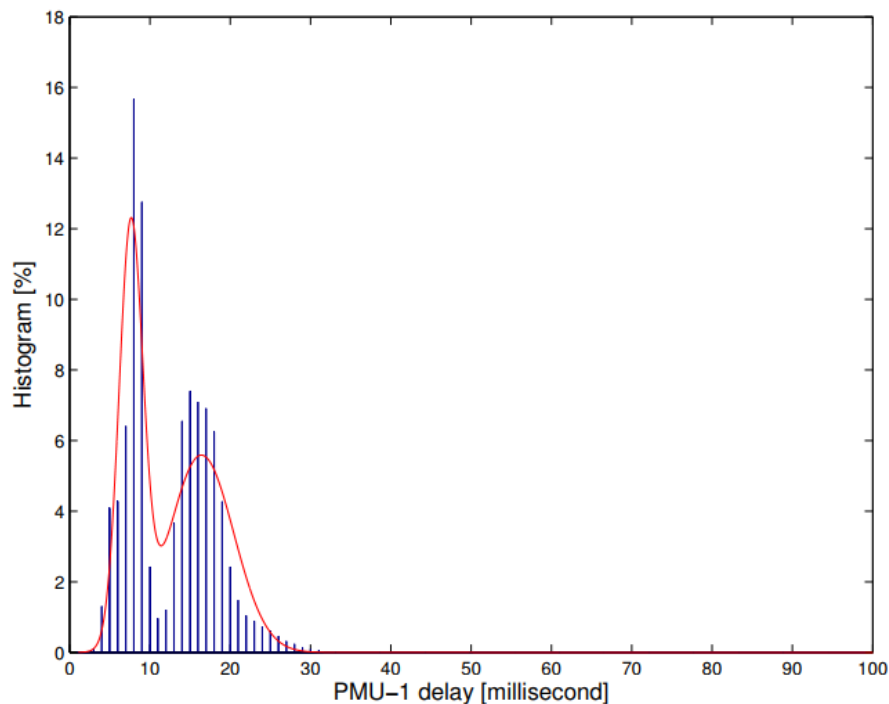
Estas limitações, que serão discutidas a seguir, servirão como base para a implantação no modelo de sistema que será testado no capítulo 4.

### 3.2.1 Atrasos médios e máximos das PMUs para os PDCs

Segundo Zhu (2013), os atrasos médios e máximos de dados não processados, apresentam distribuições semelhantes de uma PMU para outra. Portanto, apenas a primeira PMU (PMU-1) é apresentada graficamente no estudo.

Os atrasos médios foram descritos por distribuições bimodais, conforme a figura abaixo:

**Figura 11** – Distribuição dos atrasos médios da PMU-1 não processados



Fonte: Elaborado por KUN ZHU (2013).

Esta representação expõe duas distribuições normais, variando de 5 a 10 milissegundos e de 10 a 30 milissegundos. Conforme Zhu (2013), nesta representação, pelo número de amostras coletadas, foi determinada uma média de 12,66 milissegundos e um desvio padrão de 8,56.

A tabela 1 apresenta os resultados da figura 11, bem como os resultados registrados para cada uma das PMUs.

**Tabela 1** – Dados referentes aos atrasos médios das PMUs, com *frames* não processados

PMU	Distance	$\mu/\sigma$	Outlier(>100)
1	130 km	12.66/8.56	0.0618%
2	480 km	9.84/10.48	0.1007%
3	450 km	10.48/10.10	0.0650%
4	500 km	14.13/13.95	0.0767%
5	500 km	14.11/18.53	0.0808%
6	400 km	11.44/6.45	0.1033%
7	400 km	11.54/15.13	0.1122%
8	400 km	11.32/12.67	0.1277%

Fonte: Elaborado por Zhu (2013), adaptado pelo autor.

O  $\sigma$  exposto na tabela representa o desvio padrão, enquanto que o  $\mu$  representa a média das amostras coletadas. Na segunda coluna, as distâncias entre as PMUs e seus PDCs são apresentadas.

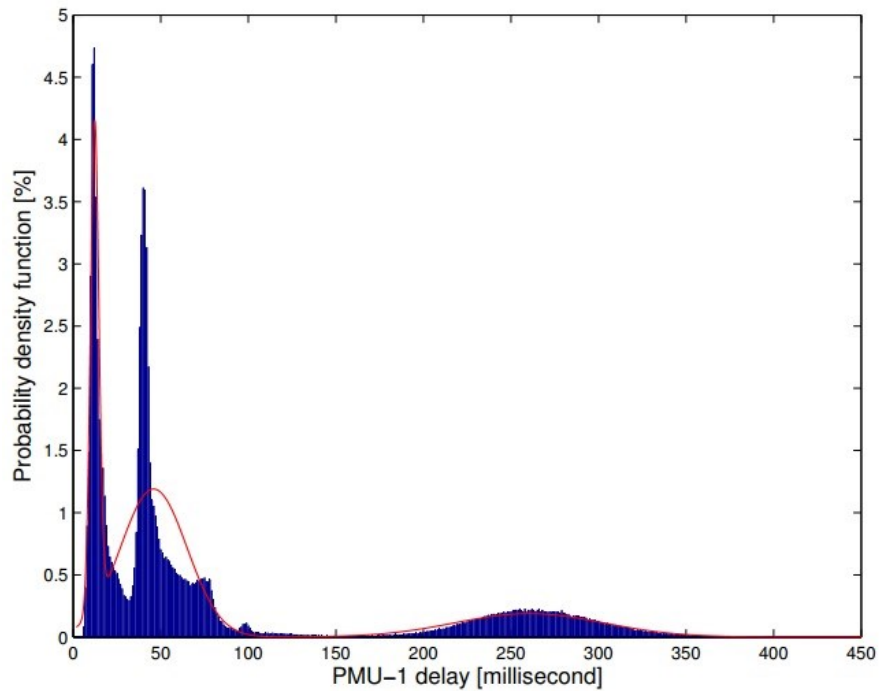
Conforme Zhu (2013), para esta avaliação levou-se em consideração os atrasos na propagação de dados, atrasos na fila do roteador, atrasos de transmissão, atrasos de grupo (que só se aplicam quando o fabricante da PMU não possui compensadores adequados) e atrasos nos cálculos dos fasores. Para a realização desta análise, amostras com tempos superiores a 100 milissegundos foram descartadas.

Distribuições semelhantes, para os atrasos máximos, foram obtidas entre as PMUs. Portanto, apenas a primeira unidade (PMU-1) é apresentada graficamente neste estudo. Quanto às demais PMUs, suas médias e desvios podem ser visualizados na tabela 2.

Para cada uma das unidades de medição fasorial, os registros coletados resultaram em uma distribuição tri-modal, conforme a figura 12. Nesta, nota-se a combinação de três distribuições normais.

Zhu (2013) afirma que a faixa de amostras entre 175 milissegundos e 350 milissegundos da terceira distribuição, apresenta este significativo atraso devido ao carregamento da rede, pois a mesma além de conectar as PMUs, conduzindo sinais para os concentradores de dados, ela também presta serviço a unidades terminais remotas (RTU) com aplicações de vídeos e de áudio (VoIP).

A segunda distribuição decorre do tráfego causado por relatórios de eventos (entre 30 e 120 milissegundos).

**Figura 12** – Distribuição dos atrasos máximos da PMU-1 não processados

Fonte: Elaborado por Zhu (2013)

**Tabela 2** – Dados referentes aos atrasos máximos das PMUs, com *frames* não processados

PMU	$\mu/\sigma$	Outlier( $\geq 450$ )
1	81.16/93.90	0.0735%
2	72.27/94.81	0.0708%
3	73.66/95.64	0.0730%
4	79.31/95.38	0.0942%
5	72.28/99.21	0.0933%
6	77.54/95.56	0.1074%
7	72.38/91.96	0.2101%
8	71.75/91.82	0.1284%

Fonte: Elaborado por Zhu (2013), adaptado pelo autor.

As amostras que apresentaram valores acima de 450 milissegundos foram excluídas da análise. Estas estão representadas na última coluna.

### 3.2.2 Atrasos médios de dados que foram processados nos PDCs

As amostras processadas pelos dois PDCs geraram atrasos semelhantes. Estas unidades resultaram em uma distribuição amostral normal, com médias nas proximidades de 40 milissegundos, conforme a tabela a seguir:

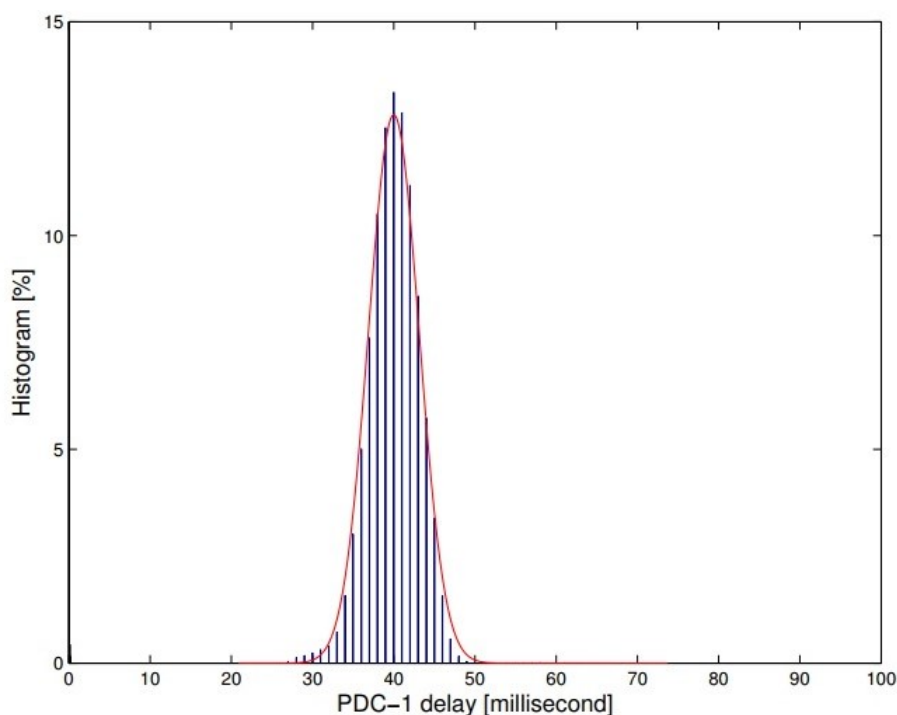


**Tabela 3** – Dados referentes aos atrasos médios dos *frames* processados pelos PDC

PDC	PDC time-out	$\mu/\sigma$
1	23	40.00/3.11
2	29	40.14/3.15

Fonte: Elaborado por Zhu (2013), adaptado pelo autor.

Segundo Zhu (2013), ambos os PDC apresentaram configurações de limite de tempos diferentes, e nas considerações de atraso, foram levados em conta o período de transmissão, atrasos de propagação, atrasos na fila do roteador, atrasos de grupo (estes são aplicados somente nas PMUs que não possuem compensadores de atraso), atrasos no cálculo fasorial e na agregação do conjunto de dados no PDC. Conforme Zhu (2013), a coleta de amostras durou um mês, resultando na seguinte distribuição apresentada na figura 13.

**Figura 13** – Distribuição média dos atrasos processados no PDC-1

Fonte: Elaborado por Zhu (2013).

Resultado este obtido, considerando o tempo das amostras processadas pelo PDC-1.

### 3.2.3 Taxa de perda de pacotes de dados

Conforme Zhu (2013), após dois meses de observação, constatou-se uma perda de aproximadamente 0,001% através de um dos tipos de protocolo utilizado, o TCP (*Transmission*

*Control Protocol*). Estes resultados acabaram sendo mais otimistas se comparados com o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*). Esta diferença se deve ao fato do protocolo TCP ser orientado à conexão, de modo que sempre que um pacote de dados é perdido, ou um segmento de dados não chega à entidade receptora antes do tempo limite, este segmento "ausente" é retransmitido novamente.

A tabela a seguir ilustra a quantidade de dados que foram perdidos através dos canais de comunicação de cada PMU:

**Tabela 4** – Dados referentes às perdas das PMUs

PMU	Anomaly	Frame loss rate
1	0.1568%	0.0012%
2	0.0033%	0.0007%
3	0.0000%	0.0012%
4	0.0037%	0.0012%
5	0.0065%	0.0009%
6	0.0000%	0.0005%
7	0.0000%	0.0007%
8	0.0013%	0.0009%

Fonte: Elaborado por Zhu (2013), adaptado pelo autor.

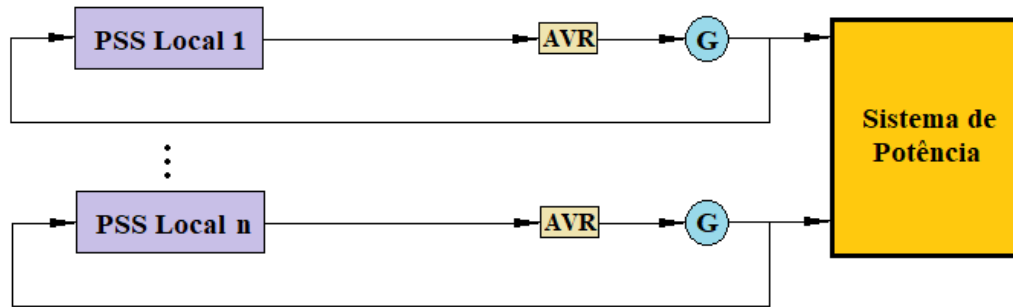
### 3.3 Disposição de estruturas globais de controle do sistema

Existem quatro topologias importantes para a realização do controle de sistemas de potência em grandes áreas, cada uma com suas particularidades de projeto, sendo elas:

- Estrutura de controle descentralizado;
- Estrutura de controle quase descentralizado;
- Estrutura de controle centralizado;
- Estrutura de controle multinível ou hierárquico.

A estrutura de controle descentralizada conta com PSSs locais e com sistemas de controle suplementares (POD) de injeção de potência reativa. Esta vinda de dispositivos FACTS instalados em barras estratégicas, aumentando assim, o amortecimento das oscilações eletromecânicas. Estas malhas compõem a estrutura descentralizada de controle e podem ser visualizadas na figura 14.

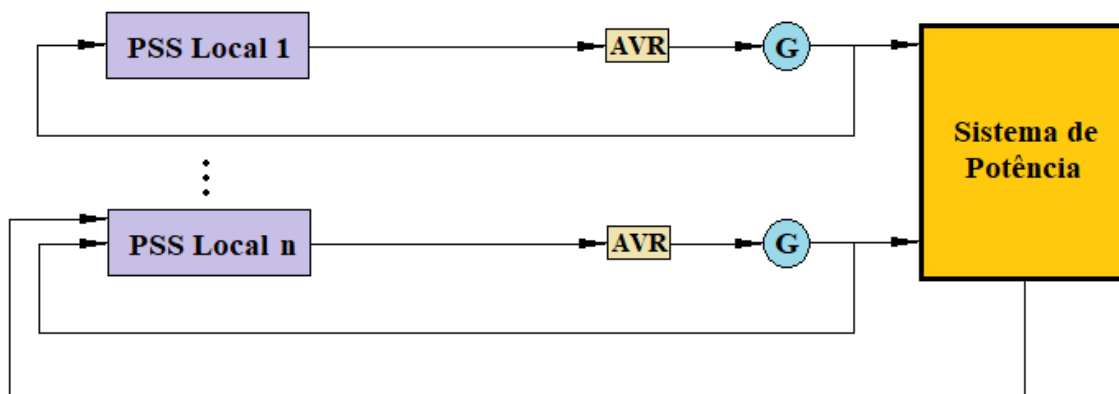
**Figura 14** – Estrutura de controle descentralizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme Dotta, D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009), o controle quase centralizado utiliza sinais de outros subsistemas, estes integrados a grande malha de potência, porém, os controladores processam estes sinais localmente. A estrutura a seguir ilustra esta topologia de controle:

**Figura 15**– Estrutura de controle quase centralizado

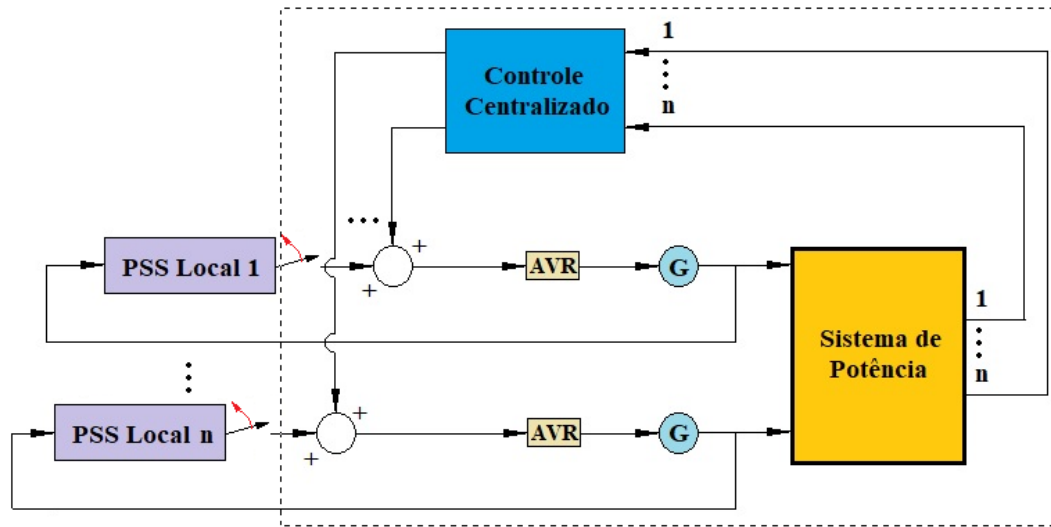


Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura de controle centralizado utiliza as saídas do sistema de potência para alimentar um controlador central. Este gera sinais de saída que alimentam as unidades geradoras locais. Os sinais adicionais, no sistema de excitação das unidades de geração, realizam o controle do sistema.

A figura a seguir ilustra esta estrutura com um controlador central. Este controlador, segundo Dotta, D, Silva, A. S. e I. C. Decker (2009) pode ser alimentado por sinais gerados de PMUs instaladas em lugares remotos.

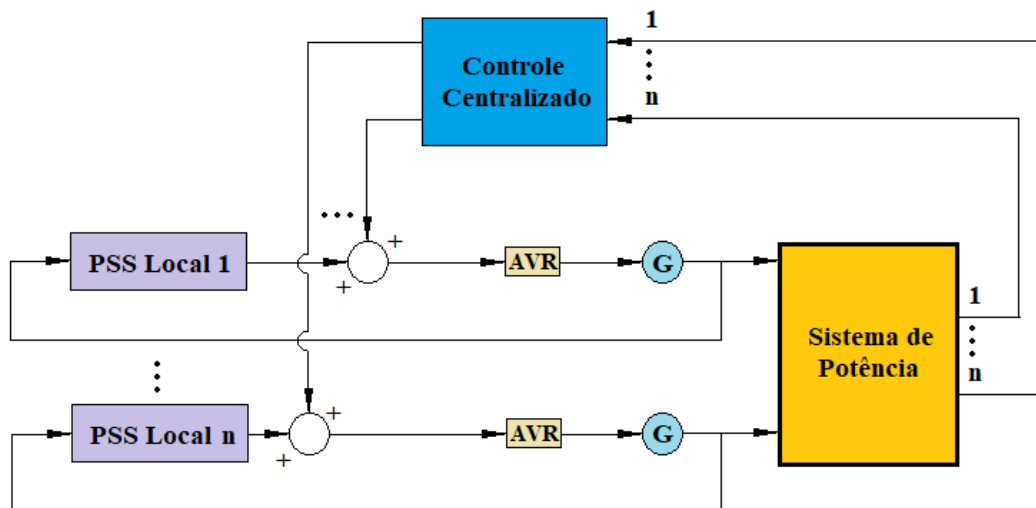
**Figura 16** – Estrutura de controle centralizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura de controle hierárquico utiliza as topologias anteriores, podendo haver dois ou mais níveis de controle. Em um nível, os controladores instalados recebem sinais de controladores situados em um nível acima. A figura abaixo ilustra um sistema com dois níveis de controle, pois além de utilizar sinais vindos de uma central de controle, as unidades de geração também contam com seus PSSs locais.

**Figura 17** – Estrutura de controle hierárquico



Fonte: Elaborado pelo autor.

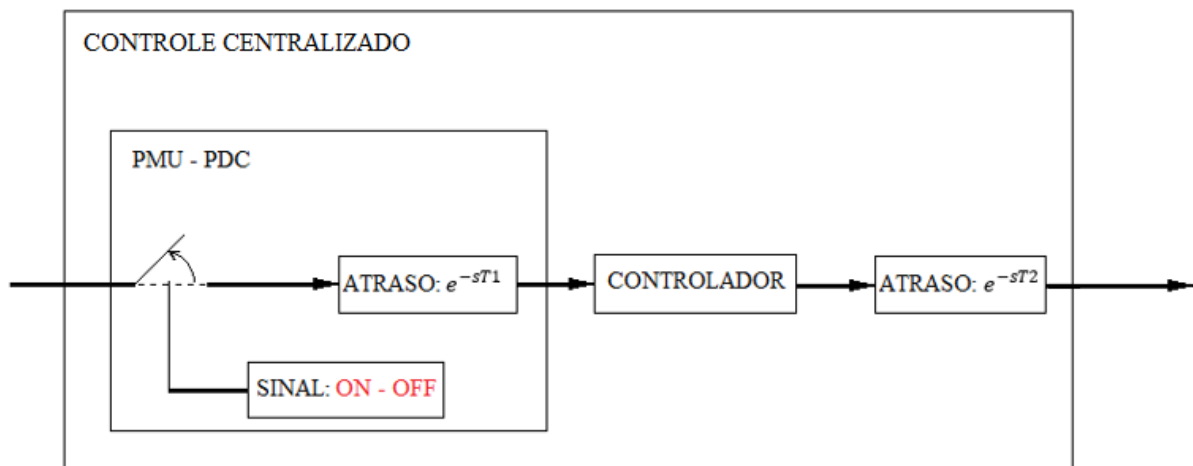
Os ensaios que foram realizados, utilizando PMUs, poderiam integrar estas topologias mais complexas de controle. Portanto, na seção seguinte, o modelo de PMU-PDC, bem como sua integração na malha do controlador central, será apresentado.

### 3.4 Modelagem do sistema PMU-PDC

A aplicação de um sistema controlado por sinais medidos pelas PMUs e processados pelos PDCs, podem ser modelados por blocos de atraso e chaves normalmente fechadas, cujas aberturas dependem de sinais gerados aleatoriamente (representando a perda de *frames*).

O diagrama de blocos do esquema de controle é mostrado na figura 18:

**Figura 18** – Representação da malha de controle com PMU e PDC integrados

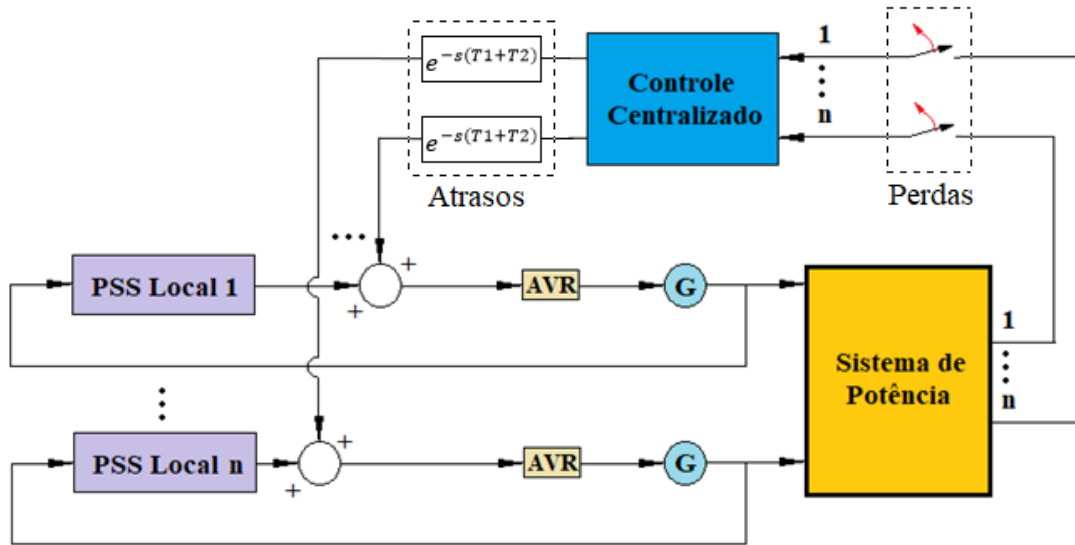


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os problemas envolvendo os atrasos máximos ou médios de dados processados ( $T1$ ) e o tempo decorrente da propagação do sinal de controle ( $T2$ ) através da linha, poderá ser simplificado em um bloco equivalente  $e^{-s(T1+T2)}$  de atraso. O bloco  $e^{-sT2}$  modela o atraso do controlador até o sistema de excitação da máquina.

Portanto, esta estrutura integrada ao esquema de controle hierárquico pode ser representada pela figura 19:

**Figura 19** – Representação do controle hierárquico com PMU e PDC integrados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nesta topologia, no capítulo seguinte, um sistema de potência utilizando uma PMU remota, foi analisado. A mesma é conectada de tal maneira a realizar um controle central por meio de um sinal de longa distância, que seria enviado para um PDC localizado na unidade central de controle. Este concentrador utilizará tais leituras para a geração de sinais, que garantam a melhoria do amortecimento dos modos de oscilação do sistema de potência.

## 4 RESULTADOS

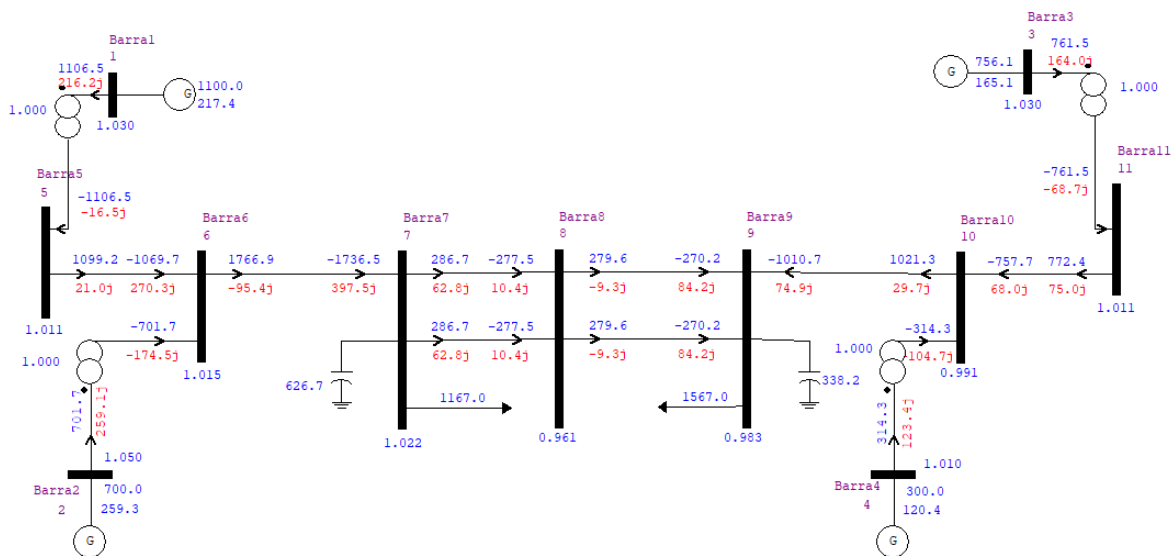
Neste capítulo, as técnicas de projeto de estabilizadores, anteriormente discutidas, são utilizadas para a análise do desempenho dinâmico do sistema de potência que será apresentado.

Ferramentas como o PacDyn, MATLAB e Simulink, servirão de auxílio para a geração das matrizes de estado, projeto de controladores e testes do comportamento dinâmico frente a perturbações.

### 4.1 Sistema teste

O sistema a ser testado está ilustrado na figura 20. Este apresenta os resultados gerados pela versão acadêmica da ferramenta de Análise de Redes Elétricas (ANAREDE) do CEPEL, disponível no Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

**Figura 20** – Sistema de potência a ser analisado



Fonte: Exemplo disponibilizado pelo pacote de instalação da ferramenta ANAREDE.

As tensões do sistema, apresentado na figura 20, estão expressas em pu e localizam-se nas partes inferiores de cada barra disposta verticalmente e nas partes superiores das barras dispostas horizontalmente. As potências ativas estão expressas em MW e dispõe-se nas partes superiores dos geradores e das linhas de transmissão, enquanto que as potências reativas, expressadas em MVA, localizam-se nas partes inferiores dos geradores e das linhas.

Dois casos foram analisados para este sistema. O primeiro levou em consideração a existência de PSSs nos 4 geradores para poder produzir modos de oscilação estáveis. O

segundo considerou a existência de 3 PSSs. Esta consideração tinha, por objetivo, gerar modos de oscilação instáveis para a realização dos testes. Tal redução no número de estabilizadores pôde, facilmente, concretizar este objetivo.

Para o sistema com 4 PSSs, a modelagem resultou no surgimento de um par de polos com amortecimento inferior a 5%.

O segundo caso, levando-se em consideração a existência dos PSS nas máquinas 1,2 e 4, resultou no surgimento de um par de polos instáveis (localizados no semi-plano direito) com amortecimento de aproximadamente  $-6,79\%$ .

A tabela 5 a seguir, compreende os modos de oscilação estáveis e instáveis dominantes para os dois casos.

**Tabela 5** – Modos de oscilação do sistema teste para os dois casos analisados

	Polos	Frequência de Oscilação [Hz]	Amortecimento [%]
<b>Caso 1</b>	$-0,1342 \pm 2,8387j$	0,4518	4,7220
<b>Caso 2</b>	$0,2390 \pm 3,5135j$	0,5592	$-6,7880$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os PSSs de todos geradores, para os dois casos, são iguais, e seus arquivos de dados estão disponíveis na pasta de exemplos do pacote de instalação do PacDyn. Os estabilizadores deste arquivo, integrados ao sistema teste, sofreram alterações no ganho  $k$  para que os resultados, mostrados nas tabelas 5 e 6, fossem adequados para a realização dos experimentos.

Todos os polos do sistema teste, determinados pelo PacDyn, considerando-se os casos com três e quatro estabilizadores, estão apresentados nas tabelas de autovalores A1.1 e A1.3 do apêndice.

O apêndice A1.5 apresenta o arquivo de dados do PacDyn. Este contém os parâmetros de operação de cada gerador para a realização dos testes do comportamento dinâmico.

## 4.2 Projeto dos compensadores para a realização do controle hierárquico

Nesta subseção, serão projetados os controladores centrais para os sistemas teste com três e quatro PSSs locais. Cada passo adotado para a realização do projeto do compensador do sistema teste, cujos quatro PSSs locais estão integrados, será explicitado. Porém, para o sistema com três PSSs locais, somente os resultados do projeto do controlador serão expostos,



pois este segue a mesma metodologia adotada. Conforme mencionado no capítulo 2, estes utilizarão sinais de velocidade em seus canais de entrada e gerarão sinais de tensão para efetuar o controle dos modos de oscilação de seus sistemas teste.

#### 4.2.1 Compensador central do sistema com quatro estabilizadores

Para a realização do projeto do compensador central no sistema cujo modo de oscilação é estável, os fatores de controlabilidade (utilizando o sinal de tensão de referência que alimenta os reguladores do gerador) e observabilidade (utilizando o sinal de velocidade dos geradores) foram avaliados para escolher o gerador onde o controle central vai atuar, bem como o sinal que será usado na entrada deste controlador. Tais fatores, apresentados nas figuras 21 e 22, foram gerados pelo PacDyn.

**Figura 21** – Fatores de controlabilidade das tensões de referência das máquinas

Module	Phase	Bus Name
1.0000	162.49	Barra1 # 1
0.2608	-101.06	Barra3 # 3
0.2363	68.553	Barra2 # 2
0.1243	-120.02	Barra4 # 4

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 22** – Fatores de observabilidade dos sinais de velocidade das máquinas

Module	Phase	Bus Name
1.0000	104.02	Barra3 # 3
0.6946	123.83	Barra4 # 4
0.2652	-139.39	Barra2 # 2
0.1935	172.69	Barra1 # 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nestes resultados, é possível notar que o modo de oscilação, através da tensão de referência do gerador conectado a barra 1, é totalmente controlável, pois este apresenta o maior módulo em relação aos demais, enquanto que as velocidades dos geradores das barras 3 e 4 apresentam os valores de observabilidade mais altos.

Portanto, o controlador central utilizará o sinal de velocidade do gerador 3 na entrada e produzirá um sinal de tensão na saída. Este será somado à tensão de referência do gerador da barra 1.

Para a realização do projeto, com auxílio do PacDyn, foram geradas as matrizes **A**, **B** e **C** do sistema linearizado. Estas matrizes foram importadas no MATLAB, onde o algoritmo

desenvolvido para este determinado trabalho, discutido na seção 2, encarregou-se de convertê-las na função de transferência polinomial  $G(s)$  da equação 2.4.1 apresentada na seção 2.

Conforme o método de projeto apresentado na seção 2, para a determinação dos parâmetros  $\alpha$ ,  $T$  e  $k$ , foi fixada a parte imaginária  $\omega$  (responsável pela frequência de oscilação) dos modos oscilação da tabela 5, deslocando-se suas partes reais para alcançar o amortecimento de 7%.

Este par de polos, definido na posição  $m.2,8387 \pm 2,8387j$  (com  $m$ , expresso na equação 2.4.5, regulado para garantir um amortecimento de 7%), foi calculado pelo algoritmo de posicionamento de polos desenvolvido. Este determinou os seguintes parâmetros:

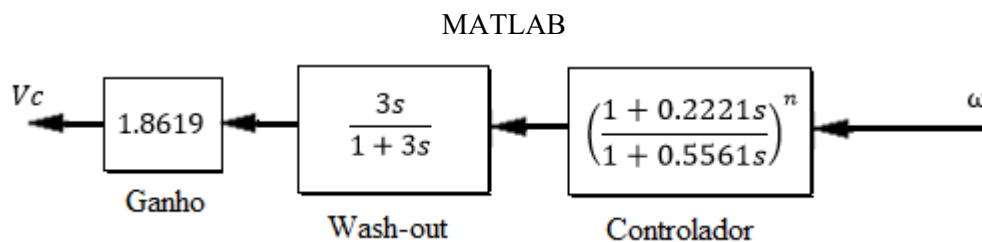
**Tabela 6** – Parâmetros do controlador central do sistema teste com modos estáveis

$A$	$T$	$K$
0,3994	0,5561	1,8619

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os parâmetros da tabela 6, a função de transferência da figura 4 (apresentada na página 12) pode ser expressa conforme a figura 23.

**Figura 23** – Controlador central do sistema com modos estáveis de oscilação determinado no

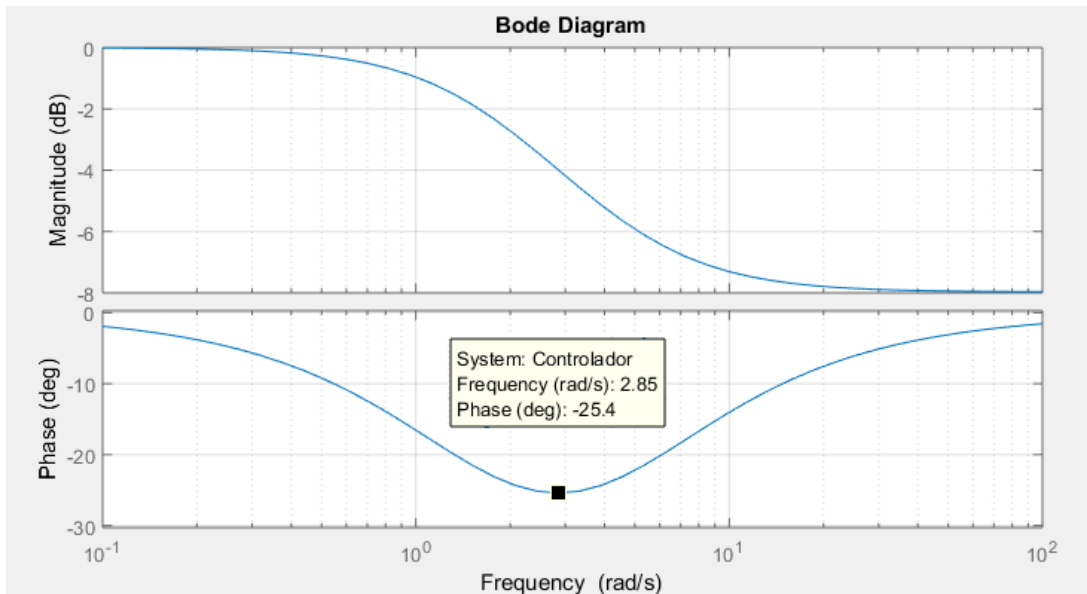


Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor  $\alpha < 1$  determina um controlador de atraso de fase. Para atender a condição de pertinência angular, foi necessário um compensador de ordem  $n = 1$ , cujo comportamento (no domínio da frequência) está ilustrado na figura 24.

O valor do parâmetro do bloco *Wash-out* foi previamente definido como  $T_w = 3$ , para a obtenção dos parâmetros do controlador de avanço-atraso. Esta associação (controlador + *Wash-out*), aplicada ao sistema, resultou na tabela A1.2 de autovalores do apêndice.

**Figura 24** – Representação do comportamento (no domínio da frequência) do controlador para o sistema de modos estáveis

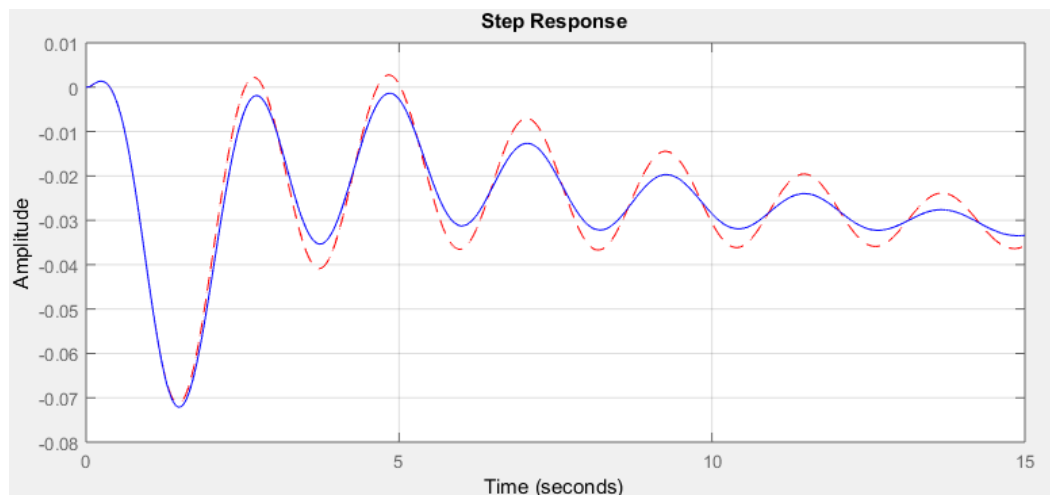


Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da figura 24, pode-se notar que o máximo ângulo de atraso de fase acontece na frequência do modo de oscilação, de acordo com a metodologia de projeto descrita no capítulo 2.

Para analisar o desempenho do controlador, foi realizada uma simulação no tempo. A resposta ao degrau aplicada ao sistema, considerando as operações em malha aberta (linha tracejada vermelha) e com o compensador projetado (linha azul), pode ser visualizada na figura 25.

**Figura 25** – Resposta do sistema de modos estáveis: velocidade do gerador 3 (com e sem compensação)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 7 apresenta os modos de oscilação do sistema operando em malha aberta e com o controlador central.

**Tabela 7** – Modos de oscilação do sistema do caso 1 operando em malha aberta e fechada

	Malha Aberta	Malha Fechada
Polos:	$-0,1342 \pm 2,8387j$	$-0,1992 \pm 2,8387j$
Frequência de Oscilação [Hz]:	0,4518	0,4518
Amortecimento [%]:	4,7220	7,0000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, o algoritmo desenvolvido, posicionou corretamente os polos, garantindo o amortecimento desejado na frequência de oscilação dos modos dominantes. Sendo assim, este sistema controlado pode ser estudado, considerando o impacto gerado pelas não-idealidades da PMU nesta infraestrutura de controle.

No apêndice A1.6, o arquivo do PacDyn envolvendo o sistema de excitação do gerador 1 e o controlador central, é apresentado.

#### 4.2.2 Compensador central do sistema com três estabilizadores

Para realização do projeto do sistema de compensação da planta cujo modo de oscilação é instável, o mesmo procedimento foi adotado. Portanto, através dos fatores de controlabilidade e observabilidade, este estabilizador central exerce a ação de controle do sistema de excitação da máquina 1, utilizando como entrada o sinal de velocidade da máquina 4.

Com base nas matrizes **A**, **B** e **C** deste sistema, fixando o mesmo valor  $T_w$  do bloco *Wash-out*, a aplicação algoritmo resultou nos parâmetros da tabela 8.

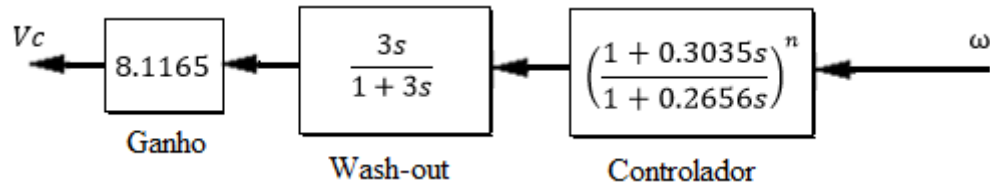
**Tabela 8** – Parâmetros do controlador central do sistema teste com modos instáveis

<b>A</b>	<b>T</b>	<b>K</b>
1,143	0,2656	8,1165

Fonte: Elaborado pelo autor.

A função de transferência do controlador está ilustrada na figura 26.

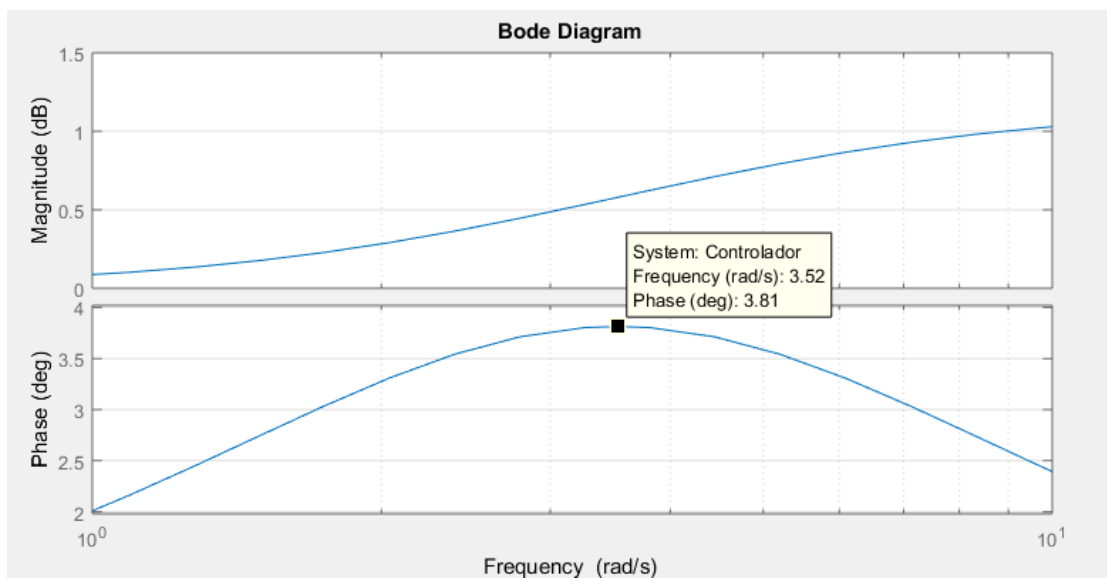
**Figura 26** – Controlador central do sistema teste com modos instáveis de oscilação determinado no MATLAB



Fonte: Elaborado pelo autor.

O compensador obtido é de avanço de fase com um único estágio (ordem  $n=1$ ). O máximo avanço, na frequência do modo instável, pode ser visualizado na figura 27.

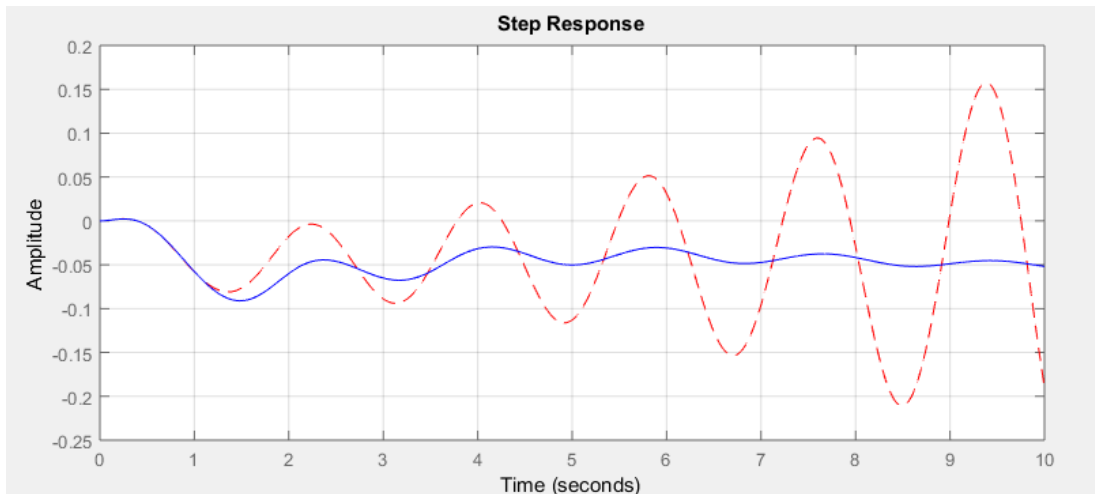
**Figura 27** – Representação do comportamento (no domínio da frequência) do controlador para o sistema de modos instáveis



Fonte: Elaborado pelo autor

Para analisar o desempenho do controlador, foi realizada uma simulação no tempo. A resposta ao degrau do sistema, considerando as operações em malha aberta (linha tracejada vermelha) e com o compensador projetado (linha azul), pode ser visualizada na figura 28.

**Figura 28** – Resposta do sistema de modos instáveis: velocidade do gerador 4 (com e sem compensação)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 apresenta os modos de oscilação do sistema operando em malha aberta e com o controlador central.

**Tabela 9** – Modos de oscilação do sistema do caso 2 operando em malha aberta e fechada

	Malha Aberta	Malha Fechada
Polos:	$-0,1342 \pm 2,8387j$	$-0,1992 \pm 2,8387j$
Frequência de Oscilação [Hz]:	0,5592	0,5595
Amortecimento [%]:	-6,7880	6,0012

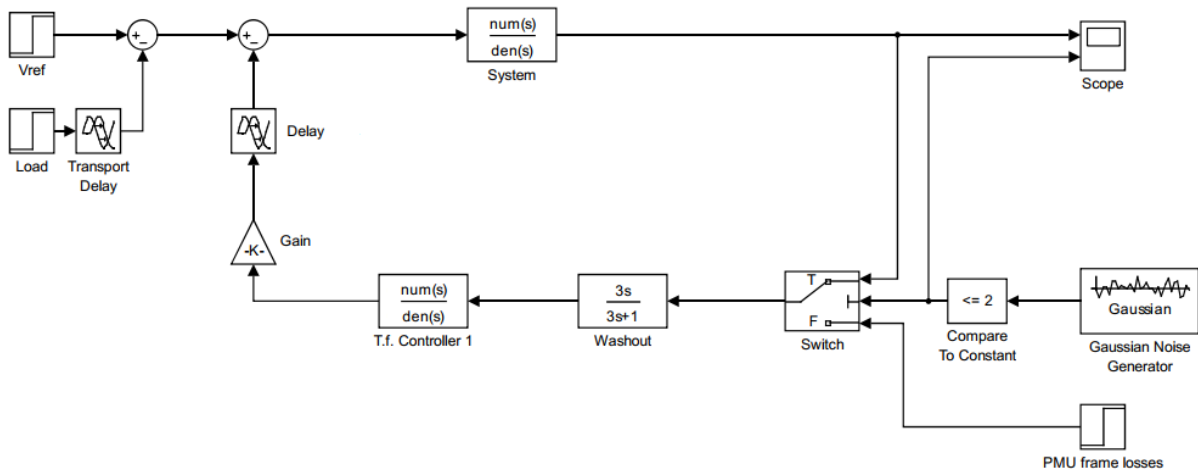
Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, os resultados apresentados demonstram que o algoritmo posicionou corretamente os polos, resultando em um amortecimento de aproximadamente 6% na frequência de oscilação dos modos instáveis dominantes. Sendo assim, este sistema controlado pode ser estudado, considerando o impacto gerado pelas não-idealidades da PMU nesta infraestrutura de controle.

### 4.3 Controle com perda de dados e atrasos

A ferramenta Simulink foi utilizada para a construção do sistema da figura 29.

**Figura 29** – Representação do controle com atrasos e perdas das PMU e PDC integrados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta estrutura contém o bloco do compensador projetado (*T.F. Controller*) bem como o *Wash-out* na malha de controle.

O bloco *System*, integra o sistema da figura 20 (apresentado na página 33), mais os controladores definidos pelo usuário no PacDyn (sistema de excitação, estabilizadores locais, dados dos geradores), resultando nas matrizes **A**, **B** e **C**. Estas matrizes, após serem exportadas para o MATLAB, são convertidas na função de transferência da equação 2.4.1 da seção 2.

O bloco gerador de ruído gaussiano está configurado para produzir sinais que atendam a uma distribuição normal (com média igual a 0 e variância igual a 1). Sua saída faz conexão com um comparador lógico. Este produz sinais unitários quando o ruído apresentar valores iguais ou maiores que o valor definido no campo de comparação. Caso esta condição do campo não seja atendida, os sinais de saída do comparador serão iguais a zero.

O valor do campo do bloco comparador corresponde ao número de desvios padrão do ruído. Quando o valor produzido pelo ruído for maior que o número de desvios definidos no campo de comparação, a condição de abertura da malha será atendida, resultando na excursão do interruptor (bloco *Switch*). Esta abertura ocorrerá apenas para os valores positivos do ruído com amostras iguais ou superiores ao número de campo do comparador.

Portanto, amostras negativas, com valores (em módulo) superiores aos desvios definidos no comparador, manterão a malha fechada.

A tabela 10 apresenta a porcentagem de dados que serão perdidos de acordo com o número de desvios definidos no campo do comparador.

**Tabela 10** – Porcentagem de amostras perdidas

<b>Valor do campo do comparador</b>	<b>Amostras perdidas</b>
<b>2</b>	2,3%
<b>1</b>	15,9%
<b>0</b>	50%
<b>-1</b>	84,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **4.4 Resultados das simulações para o sistema com quatro estabilizadores locais**

Este resultado gerado na figura 30 servirá como base para a comparação dos sinais considerando a adição das não idealidades que o ocorrerão gradualmente

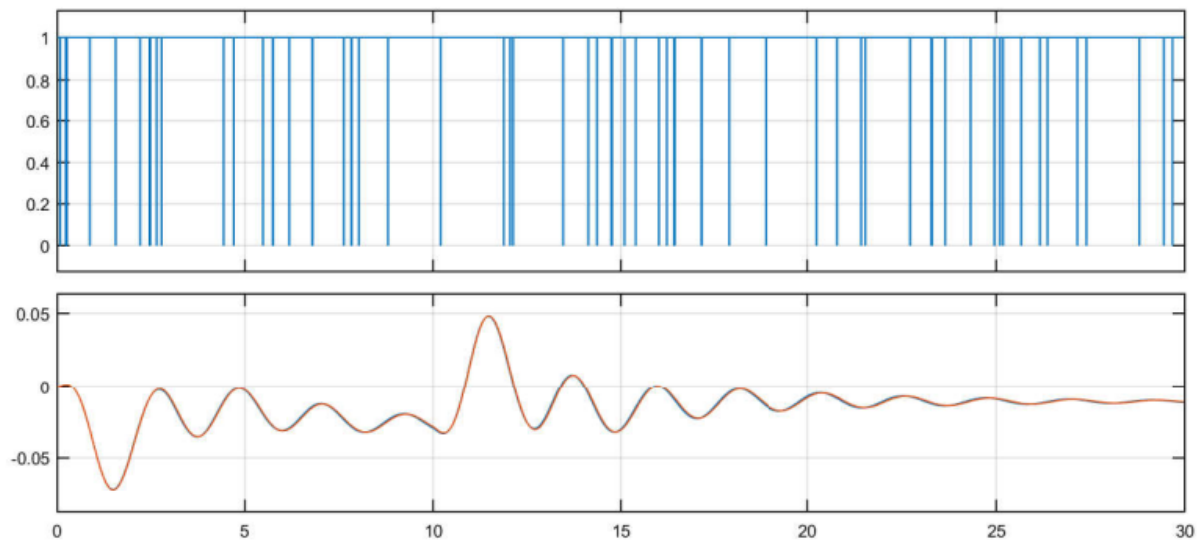
Com base na estrutura da figura 29, a resposta a um pulso unitário (1 pu), aplicado na referência do sistema elétrico do gerador 1 (bloco denotado por  $V_{ref}$ ), entre os períodos de 0 a 10 segundos a figura 30. O teste foi realizado tomando-se os valores de atraso apresentados na seção 3.2.1 como base. Neste teste, um tempo de atraso médio de 40 ms para o processamento dos *frames* foi considerado, mais um período adicional de 40 ms, este referente ao tempo de propagação do sinal de controle até o sistema de excitação da máquina 1.

Perdas amostrais de 2,3% também foram consideradas (estas superiores à média de perdas registradas na tabela 4). A resposta do sistema controlado, considerando atrasos e perdas, pode ser visualizada no traçado em azul do gráfico inferior. O sinal sem perdas e atrasos está representado pela linha vermelha, sobreposta a resposta não ideal.

O gráfico superior representa o sinal do comparador lógico (variando de 1 para 0). Cada pulso negativo representa uma perda de *frame*.



**Figura 30** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 80 ms na malha de controle, mais perdas)



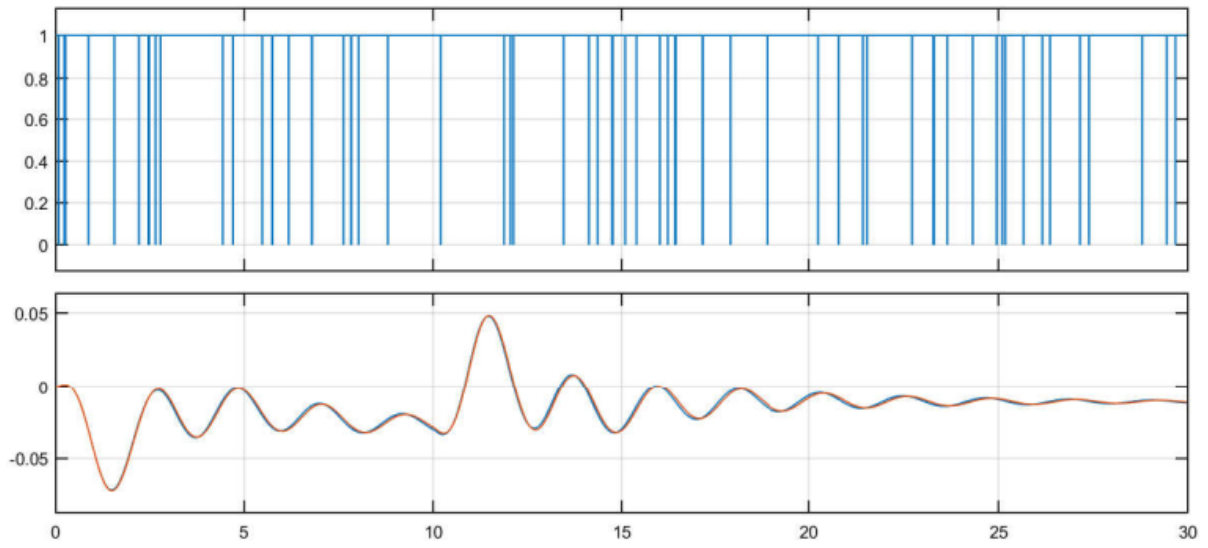
Fonte: Elaborado pelo autor.

Este teste foi realizado considerando uma taxa de transmissão de pacotes de dados de 100 *frames/s*.

Por haver PMUs, produzidas por diferentes fabricantes, com diferentes taxas de transmissão de dados, esta taxa de transmissão foi escolhida empiricamente e será utilizada em todos os testes que serão apresentados neste subcapítulo.

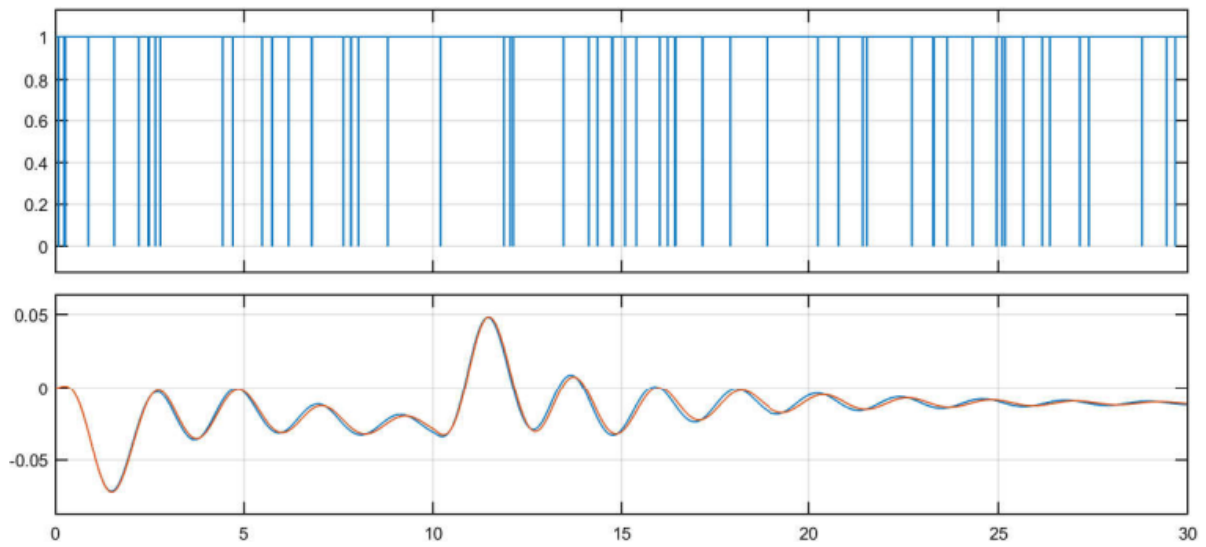
A sequência a seguir, ilustra o comportamento dinâmico do sistema em um período de 30 segundos, com aplicação de um pulso unitário entre 0 e 10 segundos na referência. A taxa de perdas foi fixada em 2,3%, variando-se apenas, o atraso.

**Figura 31** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 150 ms na malha de controle, mais perdas)



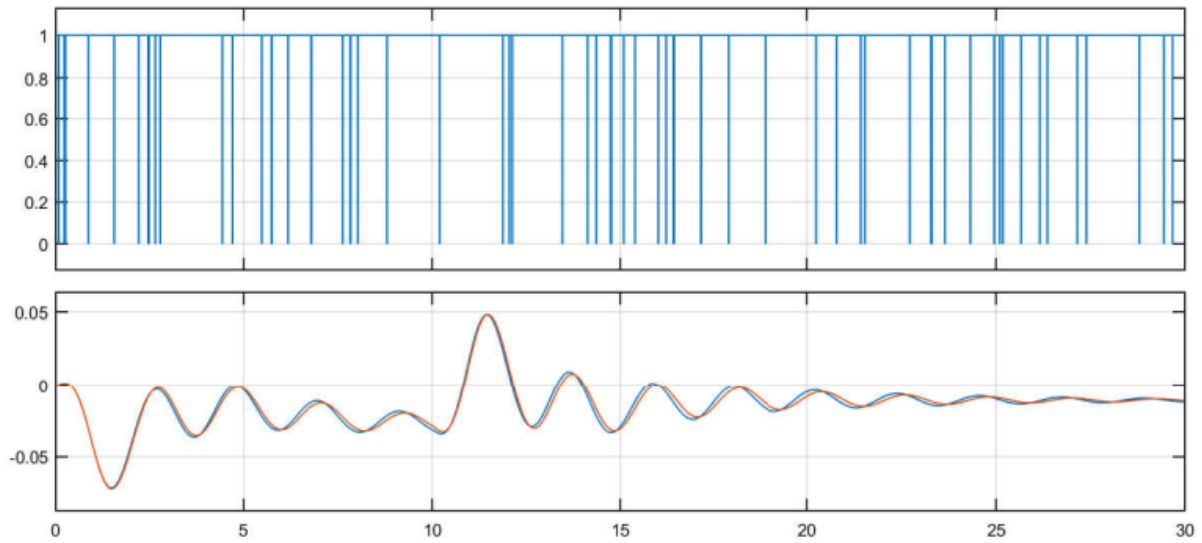
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 32** – Resposta do sistema controlado: sinal de velocidade com atraso de 240 ms, mais perdas



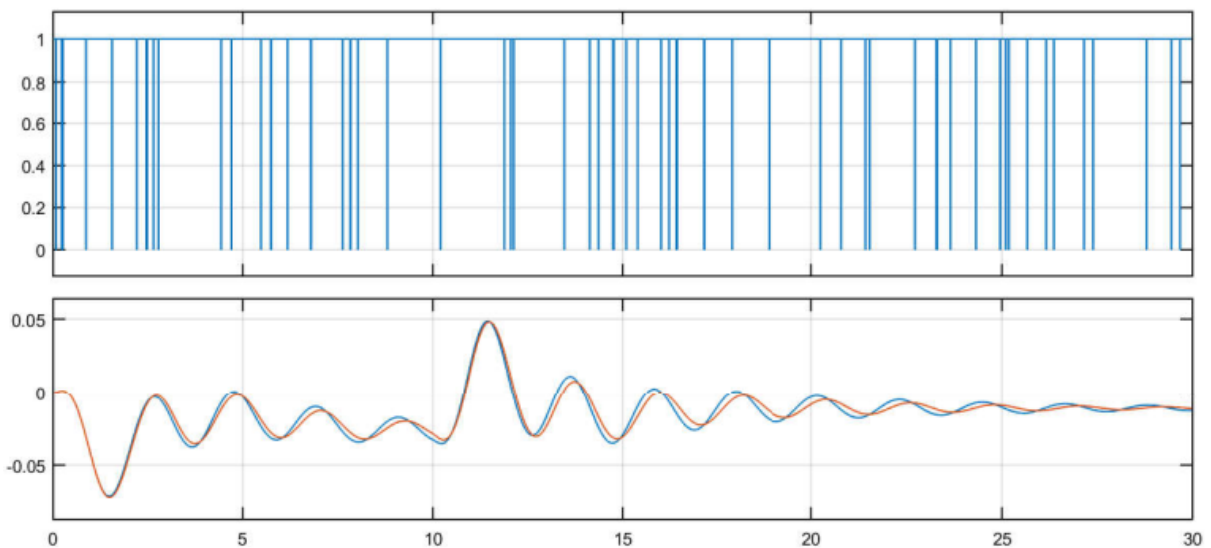
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 33** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 270 ms na malha de controle, mais perdas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 34** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 3 (com atraso de 400 ms na malha de controle, mais perdas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

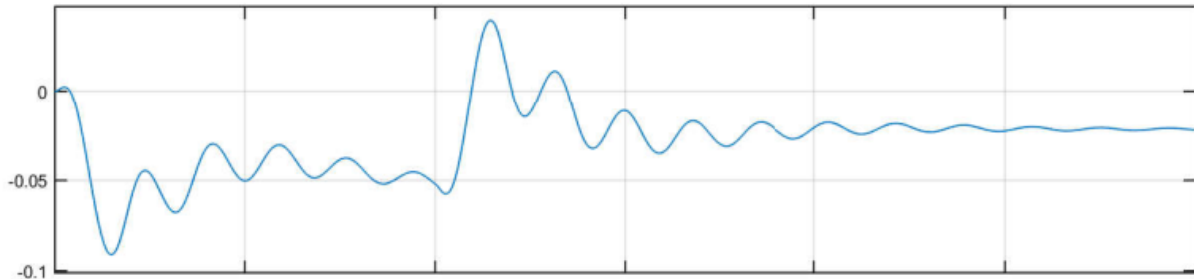
Através deste crescente tempo de atraso, a resposta do sistema acabou sendo degradada, reduzindo o amortecimento estabelecido pelo controlador.

#### 4.5 Resultados das simulações para o sistema com três estabilizadores locais

Com base na estrutura da figura 29 (apresentada na página 41), a resposta a um pulso unitário, aplicado na referência do sistema elétrico do gerador (bloco denotado por  $V_{ref}$ ),

entre os períodos de 0 a 10 segundos, desconsiderando atrasos ou perdas de dados, pode ser visualizada na figura 36.

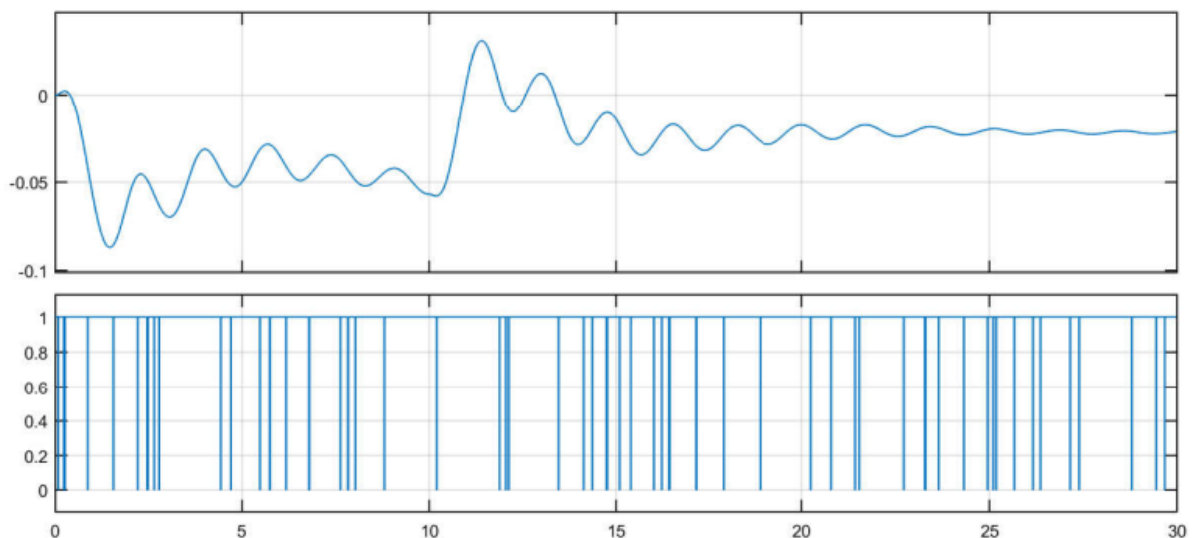
**Figura 35** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos tempos de atraso amostrais do capítulo 3, os resultados referentes aos testes, considerando um atraso médio de 40 ms para o processamento dos *frames*, um período adicional de 40 ms referente ao tempo de propagação do sinal de controle até o sistema de excitação da máquina 1 e as perdas de dados de 2,3% (considerações superiores à média de perdas registradas na tabela 4), estão ilustrados na figura 37.

**Figura 36** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 80 ms na malha de controle, mais perdas)

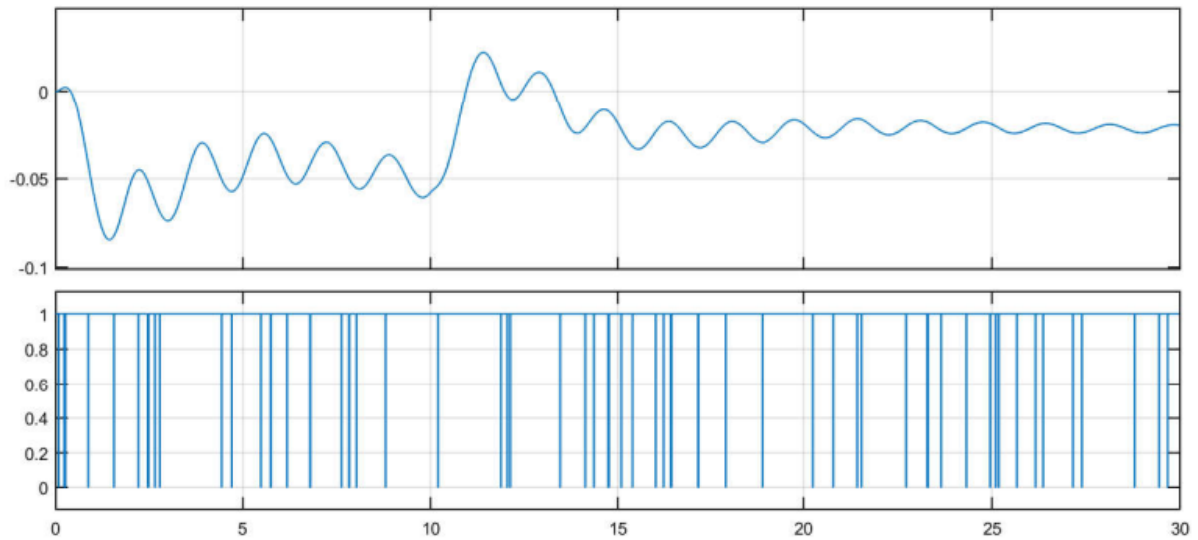


Fonte: Elaborado pelo autor.

Este teste foi realizado, aplicando-se um pulso unitário (variação de 0 a 1 pu) na referência do sistema do gerador 1 entre os períodos de 0 a 10 segundos. Na parte inferior, cada pulso representa uma perda de *frame*, considerando uma taxa de transmissão de pacotes de dados de 100 *frames/s* e que será utilizada em todos os testes deste subcapítulo.

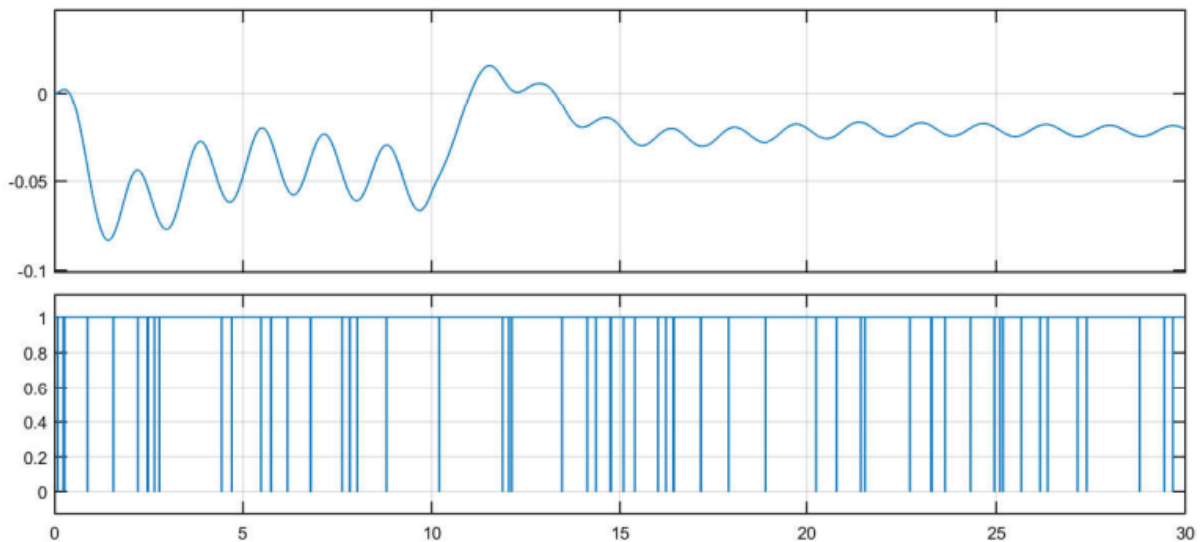
A sequência a seguir, ilustra o comportamento dinâmico do sistema em um período de 30 segundos, com aplicação de um pulso unitário entre 0 e 10 segundos na referência do gerador 4. A taxa de perdas foi fixada em 2,3%, variando-se apenas o atraso do sinal.

**Figura 37** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 150 ms na malha de controle, mais perdas)



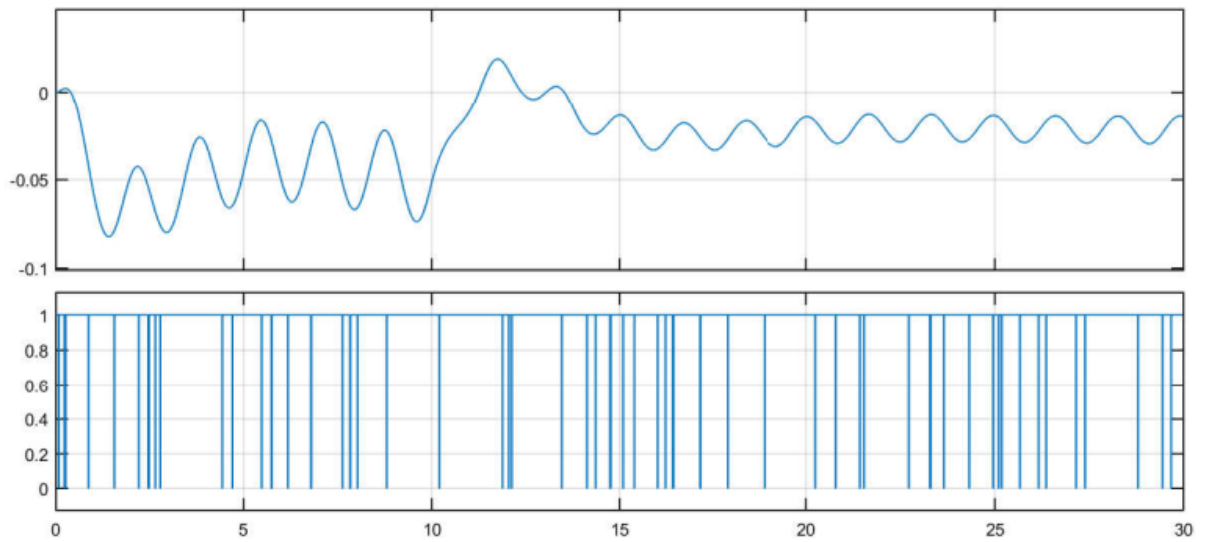
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 38** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 200 ms na malha de controle, mais perdas)



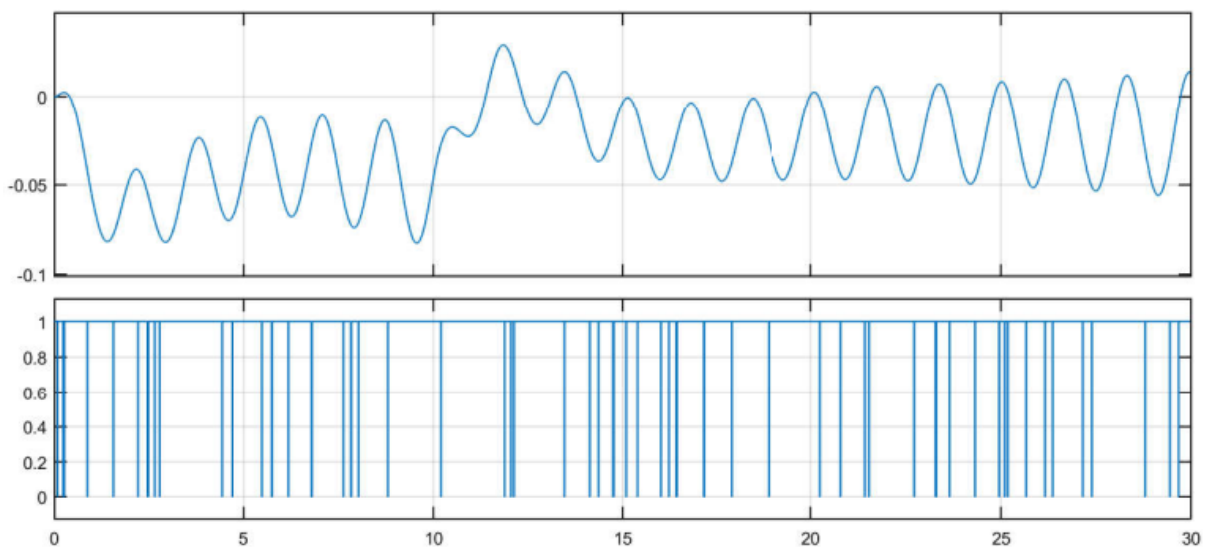
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 39** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 240 ms na malha de controle, mais perdas)



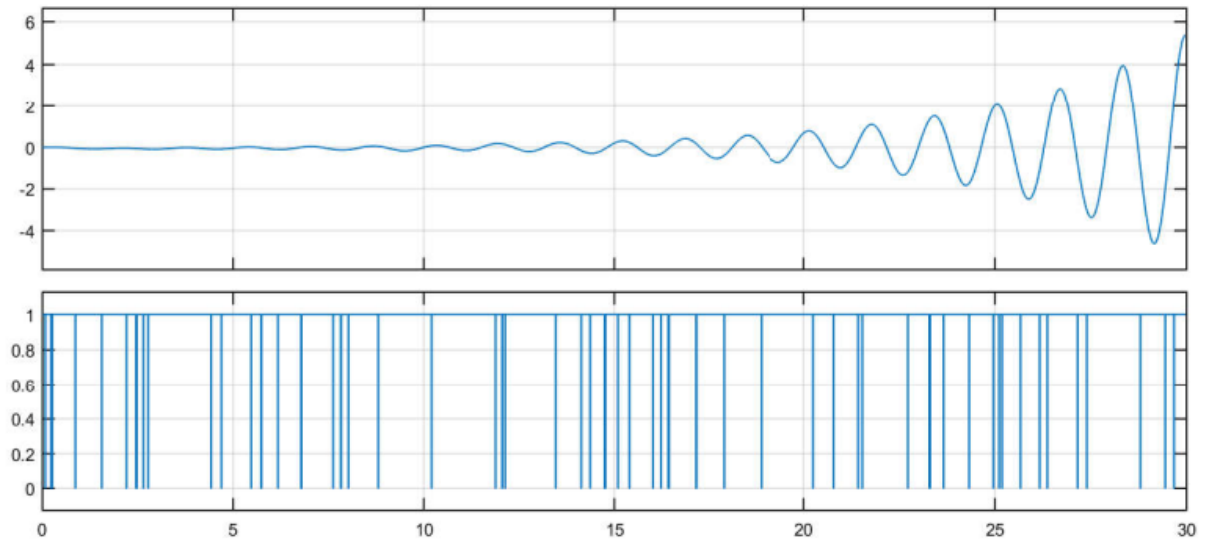
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 40** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 270 ms na malha de controle, mais perdas)



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 41** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (com atraso de 400 ms na malha de controle, mais perdas)

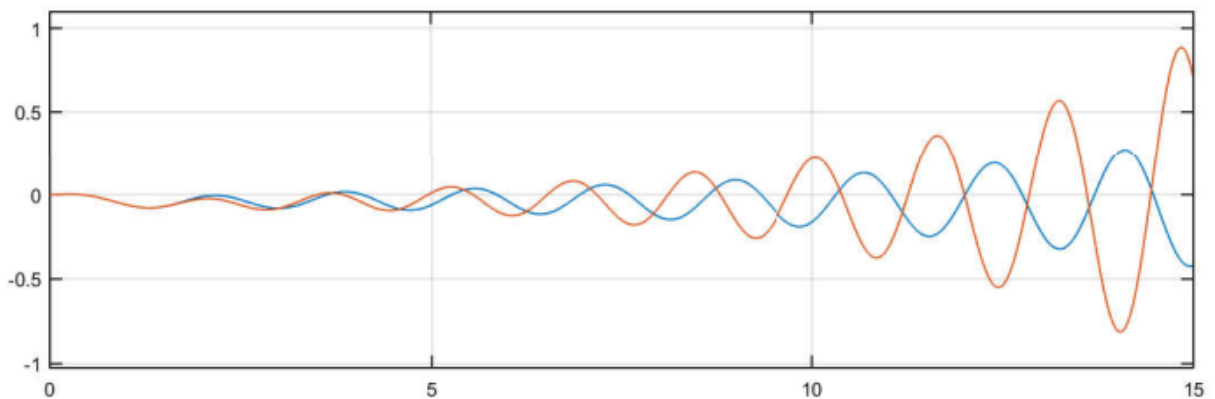


Fonte: Elaborado pelo autor.

Através deste crescente tempo de atraso, percebe-se que o amortecimento adicional estabelecido pelo controlador deixa de ser significativo.

A figura 43 ilustra as respostas ao degrau unitário aplicadas na referência do gerador 4 do sistema compensado (com atraso 500 ms, sem perdas) e sem compensação.

**Figura 42** – Velocidades do gerador 4 com o controlador central (representada vermelho, com 500 ms de atraso) e em malha aberta (representado em azul)

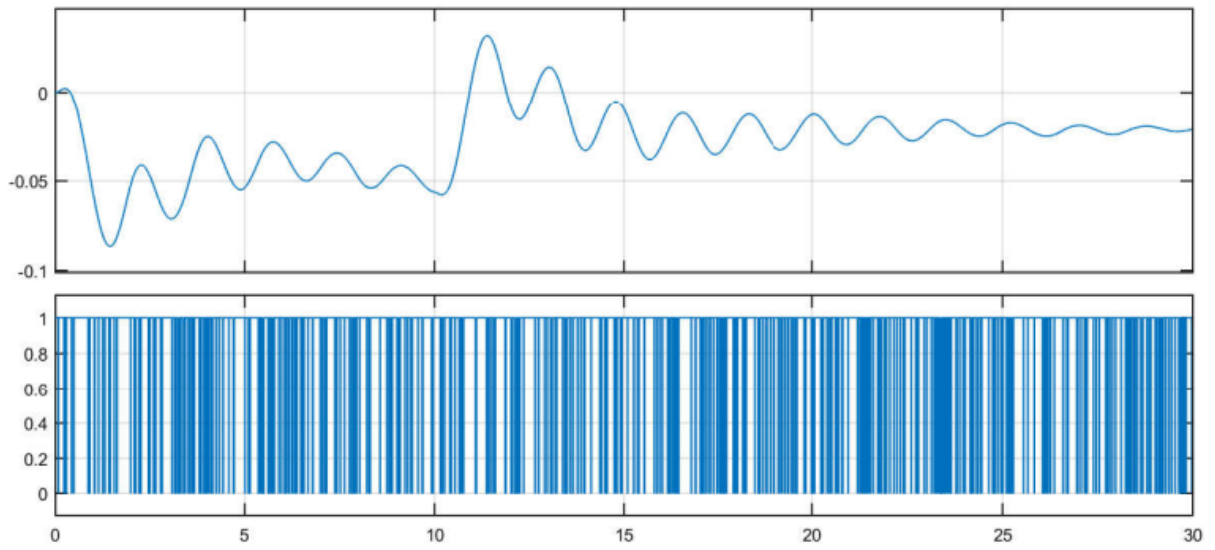


Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, este atraso pode acarretar em um resultado pior, comparado ao do sistema não compensado.

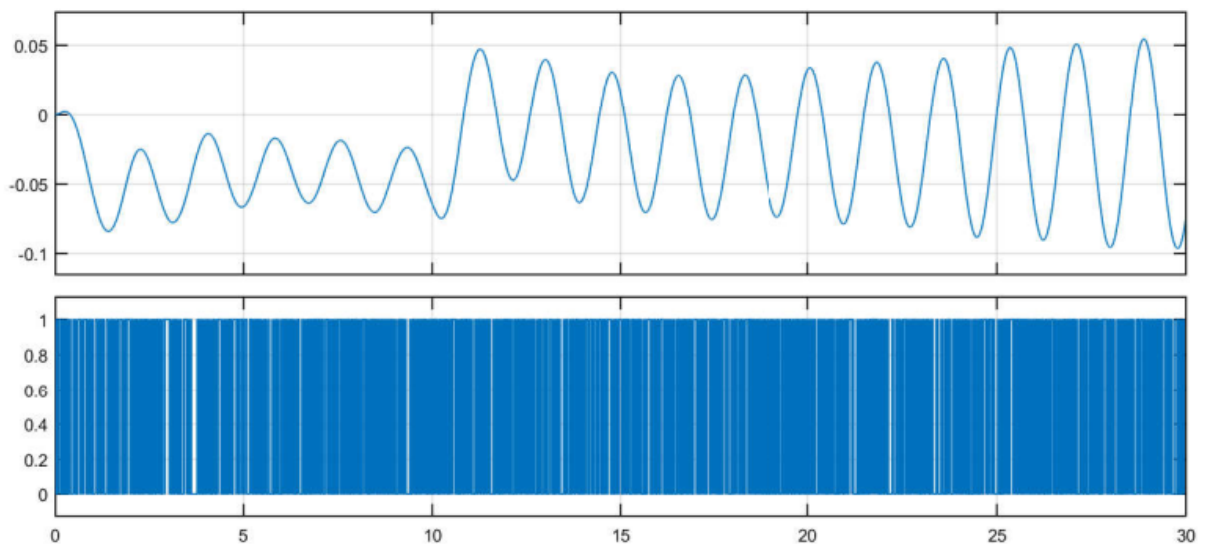
O comportamento do sistema de controle com relação às perdas de *frames*, fixando-se o atraso em 80 ms, é analisado na sequência.

**Figura 43** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (perdas de 15,9%)



Fonte: Elaborado pelo autor.

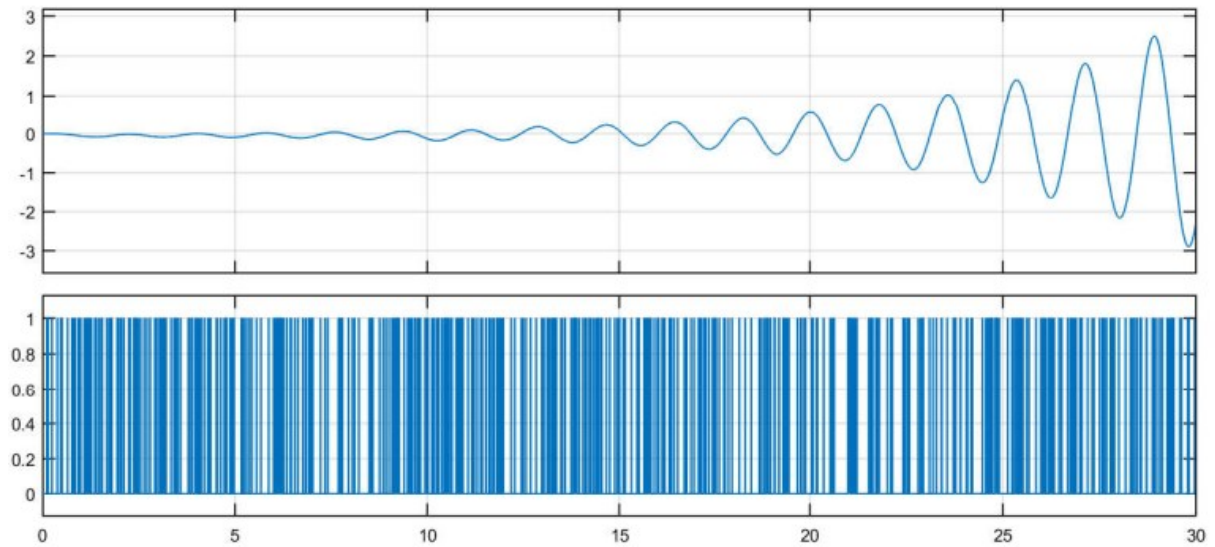
**Figura 44** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (perdas de 50%)



Fonte: Elaborado pelo autor.



**Figura 45** – Resposta do sistema controlado: velocidade do gerador 4 (perdas de 84,1%)



Fonte: Elaborado pelo autor.

As perdas de dados contribuíram com a redução do amortecimento promovido pela malha de controle. O crescente número de amostras perdidas tende a fazer com que a resposta do gerador apresente o mesmo desempenho dinâmico do sistema não compensado.



## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho reúne um conjunto de dados referente à um sistema com quatro máquinas e onze barras. Tal conjunto expõe os resultados práticos do comportamento dinâmico frente a perturbações, levando-se em consideração as não idealidades existentes das PMUs integradas.

Neste estudo, estas unidades foram responsáveis por gerar amostras a serem utilizadas em aplicações de controle de área ampla. Pode-se notar, conforme as condições adotadas para a realização da análise, que tanto às perdas de dados, quanto os atrasos decorrentes dos canais de comunicação, influenciaram no comportamento dinâmico da planta.

O sinal do controlador, aplicado ao sistema de excitação, considerando o tempo médio de atraso de amostras processadas, não causou um expressivo impacto no desempenho de controle do sistema. Este compensador, portanto, cumpre sua função, mantendo o amortecimento adicional dos modos de oscilação existentes.

A análise do comportamento dinâmico, considerando os períodos máximos de atraso (apresentados na seção 3.2.1), decorrentes do sobrecarregamento dos canais de comunicação, faz com que o compensador projetado deixe de cumprir a função de garantir a estabilidade global dos modos existentes. Sendo assim, pode-se notar a correlação entre a ineficiência do controle, com o crescente tempo de atraso dos *frames* nos canais.

Este elevado tempo de atraso pode resultar em uma resposta de controle extremamente degradada. Neste caso, a operação em malha aberta passa a ser mais eficiente.

Ao fixar o tempo de 80 ms, levando-se em consideração o tempo médio das amostras processadas, mais um atraso decorrente dos sinais gerados pelo controlador central, percebeu-se que as amostras perdidas (dentro da faixa de 2,3%) não causaram consideráveis impactos no comportamento dinâmico do sistema, conservando o amortecimento especificado pelo compensador central.

Aumentando-se esta quantidade de perdas, pôde-se notar que o sinal de controle acabou sendo degradado. Tal correlação é notável através dos resultados obtidos. Dependendo do ajuste realizado pelo compensador, a quantidade de perdas promoverá um deslocamento polar até os pontos onde o sistema passaria operar em malha aberta (sem compensação).

Portanto, para os sistemas analisados neste trabalho, considerando os atrasos médios predominantes na faixa de 40 ms a 50 ms e perdas a uma taxa superior a mil vezes às médias registradas na tabela 4 (cujos dados correspondem às perdas através do protocolo TCP), o

sistema controlado apresentou bons resultados para a estabilidade dinâmica, não promovendo grandes impactos no amortecimento dos compensadores centrais instalados.

## REFERÊNCIAS

ARAMAYO, Victor René Ustariz. **AJUSTE DE SINAIS ADICIONAIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA INCLUINDO COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVO.** Orientado por Aguinaldo Silvério e Silva. Florianópolis, 1992. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 8., 2000, Florianópolis. **PROJETO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA POR POSICIONAMENTO DE PARCIAL DE PAR DE POLOS PÓLOS COMPLEXOS CONJUGADOS.** Rio de Janeiro, RJ: CBA, 2000. 6 p.

CEPEL – “*PacDyn 9.4 – User’s Manual*”, CEPEL/DRE, Sep/2011.

Dotta, D.; Silva, A.S.; Decker I.C. Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay. **IEEE Trans. Power Syst.**, v.24, n. 1, p. 1, fev., 2009.

Ehrensperger, Juliana Gubert. **SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA:** Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica. Orientado por Ildemar Cassana Decker. Florianópolis, 2004. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ELGERD, Olle I. **ELECTRIC ENERGY SYSTEMS THEORY: AN INTRODUCTION.** 2. ed. [s.i.]: Mcgraw-hill, 1971. Cap. 9. p. 315-369.

Fürstenberger, Alexandre. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONCENTRAÇÃO DE DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA.** Orientado por Ildemar Cassana Decker. Florianópolis, 2010. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SILVA, A. S. e; PRIOSTE, Fernando B.. Power system small-signal stability improvement by feedback of state and algebraic variables. **IEEE**, [s.i.], p.1-4, ago. 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/4341585>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA, 6., 2004, Rio de Janeiro. **Artigo**. Florianópolis: UFSC, 2004. p. 1-2.

PADIYAR, K. R. **Power System Dynamics: Stability and Control**. Hyderabad: BS Publications, 2008. Cap. 1. p. 5.

ZHU, Kun. **Data Quality in Wide-Area Monitoring and Control Systems: PMU Data Latency, Completeness, and Design of Wide-Area Damping Systems**. 2013. 73 f. Tese (Doutorado) - Curso de Filosofia, KTH, The Royal Institute Of Technology, Estocolmo, 2013.

## **APÊNDICE A      DADOS DO SISTEMA**

Este apêndice contém os dados referentes ao sistema analisado. O diagrama unifilar deste pode ser encontrado na figura 20 (apresentada na página 33).

### **A1 Sistema**

Este sistema, contendo onze barras e quatro geradores, pertence a um dos modelos de exemplo disponibilizado no pacote de instalação do PacDyn. Todos os dados (histórico) utilizados foram produzidos na ferramenta ANAREDE, com potência base de 100 MVA, na frequência base de 60 Hz.

Serão disponibilizadas, a seguir, os dados das máquinas, as tabelas correspondentes aos polos deste sistema, bem como as partes do arquivo contendo os controladores definidos pelo usuário (desenvolvidos no PacDyn) que foram editados para a integração do compensador central.

*Al.1 Autovalores do sistema de potência com quatro estabilizadores locais*

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	Damp (%)
1	-0.1342	2.8387	2.8419	0.4518	4.7220
2	-0.1342	-2.8387	2.8419	-0.4518	4.7220
3	-0.4666	7.6672	7.6814	1.2203	6.0739
4	-0.4666	-7.6672	7.6814	-1.2203	6.0739
5	-0.9704	5.4078	5.4941	0.8607	17.662
6	-0.9704	-5.4078	5.4941	-0.8607	17.662
7	-7.9129	12.387	14.699	1.9714	53.834
8	-7.9129	-12.387	14.699	-1.9714	53.834
9	-0.5027	0.5126	0.7180	0.08158	70.020
10	-0.5027	-0.5126	0.7180	-0.08158	70.020
11	-0.8884	0.6088	1.0770	0.09690	82.487
12	-0.8884	-0.6088	1.0770	-0.09690	82.487
13	-18.012	10.870	21.038	1.7300	85.618
14	-18.012	-10.870	21.038	-1.7300	85.618
15	-0.8182	0.4781	0.9477	0.07609	86.342
16	-0.8182	-0.4781	0.9477	-0.07609	86.342
17	-4.7229	1.6979	5.0188	0.2702	94.103
18	-4.7229	-1.6979	5.0188	-0.2702	94.103
19	-30.353	0.8076	30.364	0.1285	99.965
20	-30.353	-0.8076	30.364	-0.1285	99.965
21	-4.8119	0.05633	4.8122	0.00897	99.993
22	-4.8119	-0.05633	4.8122	-0.00897	99.993
23	-0.1784	0.00111	0.1784	0.00018	99.998
24	-0.1784	-0.00111	0.1784	-0.00018	99.998
25	-0.1032	0.00048	0.1032	0.00008	99.999
26	-0.1032	-0.00048	0.1032	-0.00008	99.999
27	-99.656	0.	99.656	0.	100.00
28	-97.015	0.	97.015	0.	100.00
29	-50.428	0.	50.428	0.	100.00
30	-50.002	0.00025	50.002	0.00004	100.000
31	-50.002	-0.00025	50.002	-0.00004	100.000
32	-38.657	0.	38.657	0.	100.00
33	-36.654	0.	36.654	0.	100.00
34	-36.289	0.	36.289	0.	100.00
35	-35.981	0.	35.981	0.	100.00
36	-33.023	0.	33.023	0.	100.00
37	-19.207	0.	19.207	0.	100.00
38	-18.421	0.	18.421	0.	100.00
39	-14.990	0.	14.990	0.	100.00
40	-14.083	0.	14.083	0.	100.00
41	-4.1767	0.	4.1767	0.	100.00
42	-2.8293	0.	2.8293	0.	100.00
43	-0.7240	0.	0.7240	0.	100.00
44	-0.3678	0.	0.3678	0.	100.00
45	-0.02516	0.	0.02516	0.	100.00
46	-0.00034	0.	0.00034	0.	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor.



*A1.2 Autovalores do sistema com quatro estabilizadores locais, mais compensação central*

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	∞ Damp (%)
1	-0.4666	7.6675	7.6817	1.2203	6.0746
2	-0.4666	-7.6675	7.6817	-1.2203	6.0746
3	-0.1992	2.8387	2.8457	0.4518	7.0000
4	-0.1992	-2.8387	2.8457	-0.4518	7.0000
5	-0.9633	5.4064	5.4916	0.8605	17.541
6	-0.9633	-5.4064	5.4916	-0.8605	17.541
7	-7.9090	12.390	14.699	1.9719	53.806
8	-7.9090	-12.390	14.699	-1.9719	53.806
9	-0.5921	0.6678	0.8925	0.1063	66.341
10	-0.5921	-0.6678	0.8925	-0.1063	66.341
11	-0.9377	0.7933	1.2283	0.1263	76.345
12	-0.9377	-0.7933	1.2283	-0.1263	76.345
13	-0.5306	0.4469	0.6937	0.07113	76.484
14	-0.5306	-0.4469	0.6937	-0.07113	76.484
15	-18.013	10.867	21.037	1.7295	85.625
16	-18.013	-10.867	21.037	-1.7295	85.625
17	-4.7232	1.6980	5.0191	0.2702	94.104
18	-4.7232	-1.6980	5.0191	-0.2702	94.104
19	-0.4600	0.06650	0.4647	0.01058	98.971
20	-0.4600	-0.06650	0.4647	-0.01058	98.971
21	-30.354	0.8081	30.365	0.1286	99.965
22	-30.354	-0.8081	30.365	-0.1286	99.965
23	-4.8118	0.05631	4.8122	0.00896	99.993
24	-4.8118	-0.05631	4.8122	-0.00896	99.993
25	-0.1784	0.00111	0.1784	0.00018	99.998
26	-0.1784	-0.00111	0.1784	-0.00018	99.998
27	-0.1032	0.00048	0.1032	0.00008	99.999
28	-0.1032	-0.00048	0.1032	-0.00008	99.999
29	-99.656	0.	99.656	0.	100.00
30	-97.015	0.	97.015	0.	100.00
31	-50.428	0.	50.428	0.	100.00
32	-50.002	0.00025	50.002	0.00004	100.000
33	-50.002	-0.00025	50.002	-0.00004	100.000
34	-38.657	0.	38.657	0.	100.00
35	-36.654	0.	36.654	0.	100.00
36	-36.289	0.	36.289	0.	100.00
37	-35.981	0.	35.981	0.	100.00
38	-33.023	0.	33.023	0.	100.00
39	-19.207	0.	19.207	0.	100.00
40	-18.421	0.	18.421	0.	100.00
41	-14.990	0.	14.990	0.	100.00
42	-14.083	0.	14.083	0.	100.00
43	-4.1769	0.	4.1769	0.	100.00
44	-2.7113	0.	2.7113	0.	100.00
45	-2.2998	0.	2.2998	0.	100.00
46	-0.3088	0.	0.3088	0.	100.00
47	-0.02516	0.	0.02516	0.	100.00
48	-0.00034	0.	0.00034	0.	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

*A1.3 Autovalores do sistema de potência com três estabilizadores locais*

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	∅ Damp (%)
1	0.2390	3.5135	3.5216	0.5592	-6.7880
2	0.2390	-3.5135	3.5216	-0.5592	-6.7880
3	-0.4674	7.6667	7.6809	1.2202	6.0855
4	-0.4674	-7.6667	7.6809	-1.2202	6.0855
5	-0.7974	6.6375	6.6852	1.0564	11.927
6	-0.7974	-6.6375	6.6852	-1.0564	11.927
7	-0.4944	0.4942	0.6991	0.07866	70.727
8	-0.4944	-0.4942	0.6991	-0.07866	70.727
9	-1.0774	0.7877	1.3346	0.1254	80.727
10	-1.0774	-0.7877	1.3346	-0.1254	80.727
11	-18.012	10.843	21.024	1.7257	85.675
12	-18.012	-10.843	21.024	-1.7257	85.675
13	-0.7818	0.4637	0.9090	0.07380	86.010
14	-0.7818	-0.4637	0.9090	-0.07380	86.010
15	-4.7200	1.6913	5.0139	0.2692	94.139
16	-4.7200	-1.6913	5.0139	-0.2692	94.139
17	-4.2612	0.2060	4.2662	0.03279	99.883
18	-4.2612	-0.2060	4.2662	-0.03279	99.883
19	-30.158	0.6701	30.165	0.1066	99.975
20	-30.158	-0.6701	30.165	-0.1066	99.975
21	-0.1784	0.00111	0.1784	0.00018	99.998
22	-0.1784	-0.00111	0.1784	-0.00018	99.998
23	-0.1032	0.00048	0.1032	0.00008	99.999
24	-0.1032	-0.00048	0.1032	-0.00008	99.999
25	-99.654	0.	99.654	0.	100.00
26	-97.015	0.	97.015	0.	100.00
27	-50.428	0.	50.428	0.	100.00
28	-50.002	0.00026	50.002	0.00004	100.000
29	-50.002	-0.00026	50.002	-0.00004	100.000
30	-36.935	0.	36.935	0.	100.00
31	-36.306	0.	36.306	0.	100.00
32	-36.280	0.	36.280	0.	100.00
33	-35.959	0.	35.959	0.	100.00
34	-32.779	0.	32.779	0.	100.00
35	-19.206	0.	19.206	0.	100.00
36	-18.110	0.	18.110	0.	100.00
37	-15.472	0.	15.472	0.	100.00
38	-14.084	0.	14.084	0.	100.00
39	-5.0200	0.	5.0200	0.	100.00
40	-2.3024	0.	2.3024	0.	100.00
41	-0.7102	0.	0.7102	0.	100.00
42	-0.3678	0.	0.3678	0.	100.00
43	-0.00034	0.	0.00034	0.	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

*A1.4 Autovalores do sistema com três estabilizadores locais, mais compensação central*

	Real	Imaginary	Module	Freq. (Hz)	% Damp (%)
1	-0.2114	3.5156	3.5219	0.5595	6.0012
2	-0.2114	-3.5156	3.5219	-0.5595	6.0012
3	-0.4968	7.7081	7.7241	1.2268	6.4319
4	-0.4968	-7.7081	7.7241	-1.2268	6.4319
5	-0.8536	6.6022	6.6572	1.0508	12.822
6	-0.8536	-6.6022	6.6572	-1.0508	12.822
7	-0.3359	0.5087	0.6096	0.08096	55.106
8	-0.3359	-0.5087	0.6096	-0.08096	55.106
9	-0.7988	0.9633	1.2514	0.1533	63.833
10	-0.7988	-0.9633	1.2514	-0.1533	63.833
11	-0.7789	0.5276	0.9408	0.08397	82.795
12	-0.7789	-0.5276	0.9408	-0.08397	82.795
13	-17.926	10.773	20.914	1.7147	85.711
14	-17.926	-10.773	20.914	-1.7147	85.711
15	-0.3775	0.2074	0.4307	0.03301	87.643
16	-0.3775	-0.2074	0.4307	-0.03301	87.643
17	-4.6028	1.7217	4.9142	0.2740	93.662
18	-4.6028	-1.7217	4.9142	-0.2740	93.662
19	-4.0306	0.2963	4.0415	0.04716	99.731
20	-4.0306	-0.2963	4.0415	-0.04716	99.731
21	-30.165	0.6510	30.172	0.1036	99.977
22	-30.165	-0.6510	30.172	-0.1036	99.977
23	-99.654	0.	99.654	0.	100.00
24	-97.016	0.	97.016	0.	100.00
25	-50.429	0.	50.429	0.	100.00
26	-50.001	0.	50.001	0.	100.00
27	-50.000	0.	50.000	0.	100.00
28	-36.934	0.	36.934	0.	100.00
29	-36.290	0.	36.290	0.	100.00
30	-36.283	0.	36.283	0.	100.00
31	-35.973	0.	35.973	0.	100.00
32	-32.795	0.	32.795	0.	100.00
33	-19.210	0.	19.210	0.	100.00
34	-18.164	0.	18.164	0.	100.00
35	-15.383	0.	15.383	0.	100.00
36	-14.146	0.	14.146	0.	100.00
37	-5.0258	0.	5.0258	0.	100.00
38	-4.2423	0.	4.2423	0.	100.00
39	-2.8091	0.	2.8091	0.	100.00
40	-0.2773	0.	0.2773	0.	100.00
41	-0.1848	0.	0.1848	0.	100.00
42	-0.1788	0.	0.1788	0.	100.00
43	-0.1030	0.	0.1030	0.	100.00
44	-0.1002	0.	0.1002	0.	100.00
45	-0.00068	0.	0.00068	0.	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

### A1.5 Definição dos dados das máquinas no arquivo de execução do PacDyn

```

DGEN
#
# (#1 ) noRM(base) (-HH-) (-X'd) (-X'q) (-Xd-) (-Xq-) (-RR-) (T'd0) (T'q0) (Xl-) (-Sat-) (--D-)
# (#1 ) no  (-X"d) (-X"q) (T"d0) (T"q0) (-Xl-) (-A--) (-B--) (-C--) (-Xt-)
#
1 0R5 900.0 6.5 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 1.0
1 0 1 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
#
2 0 5 900.0 6.5 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 1.0
2 0 1 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
#
3 0 5 900.0 6.175 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 1.0
3 0 1 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
#
4 0 5 900.0 6.175 0.3 0.55 1.8 1.70.0025 8.0 0.4 0.00 0.000 1.0
4 0 1 0.25 0.25 0.03 0.05 0.2 0.015 9.6 0.9
-999

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A1.6 Definição, apenas do sistema de excitação da máquina 1 e do controlador central na planta cujo modo de oscilação é estável

```

DUDT
#
# EXCITATION CONTROL
#(Ncdn) (---Name---)
  0005 TGR1
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      1 OUT   EFD   EFD   #NB1
      2 IN    VB    ET    #NB1
      3 IN    VREF  VREF  #NB1
      4 IN    VPSS  VPSS  #NB1
      5 IN    VUDC  VP    #EST      #BLC
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      6 LDLG  ET    X5    1.0      1.0      #Tr
      7 SUM   +VREF X6
          -X5
          VPSS
          -VP
      8 GAIN  X6    X7    #Ka
      9 LDLG  X7    EFD   1.      #Ta      1.      #Tb
          DPAR      #NB1
          DPAR      #Tr      0.01
          DPAR      #Ka      200.0
          DPAR      #Ta      1.0
STOP      DPAR      #Tb      10.0
#(Ncdn) (---Name---)
  0006 PSS_CON
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      1 OUT   VP    VUDC  #EST      #BLC
      2 IN    WW    W      #NB3
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      3 GAIN  W      X3    #Kstab
      4 LDLG  X3    X4    #Tw      1.0      #Tw
      5 LDLG  X4    VP    1.0      #T1      1.0      #T2
          DPAR      #Tw      3.0
          DPAR      #T1      0.2221
          DPAR      #T2      0.5561
STOP      DPAR      #Kstab  1.8619
-999
AUDC
#
# (Thyristor exciter without TGR)
#
#(No ) (---NOME---) (No ) (---NOME---)
  0001 AVRMAQ1      0005 TGR1
#
#      (--NAME--) (-VALUE--)
#      #NB1      1
#      #Ta      0.
#      #Tb      0.
#      #BLC     1
#      #EST     9
STOP
#(No ) (---NOME---) (No ) (---NOME---)
  0009 PSS_cen      0006 PSS_CON
#      #NB3      3
#      #BLC     1
#      #EST     9
STOP
-999
#
END

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

*A1.7 Definição, apenas do sistema de excitação da máquina 1 e do controlador central na planta cujo modo de oscilação é instável*

```

DUDT
#
# EXCITATION CONTROL
#(NcdU) (---Name---)
  0005 TGR1
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      1 OUT   EFD   EFD   #NB1
      2 IN    VB    ET    #NB1
      3 IN    VREF  VREF  #NB1
      4 IN    VPSS  VPSS  #NB1
      5 IN    VUDC  VP    #EST   #BLC
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      6 LDLG  ET    X5    1.0          1.0          #Tr
      7 SUM   +VREF X6
              -X5
              VPSS
              -VP
      8 GAIN  X6    X7    #Ka
      9 LDLG  X7    EFD   1.          #Ta      1.          #Tb
          DPAR
          DPAR      #NB1
          DPAR      #Tr      0.01
          DPAR      #Ka      200.0
          DPAR      #Ta      1.0
STOP      DPAR      #Tb      10.0
#(NcdU) (---Name---)
  0006 PSS_CON
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      1 OUT   VP    VUDC  #EST   #BLC
      2 IN    WW    W      #NB4
#      (Nb) (Type) S(Vinp) (Vout) (---A---) (---B---) (---C---) (---D---) (---E---)
      3 GAIN  W      X3    #Kstab
      4 LDLG  X3    X4    #Tw      1.0          #Tw
      5 LDLG  X4    VP    1.0      #T1      1.0          #T2
          DPAR      #Tw      3.0
          DPAR      #T1      0.3035
          DPAR      #T2      0.2656
STOP      DPAR      #Kstab  8.1165
-999
AUDC
#
# (Thyristor exciter without TGR)
#
#(No ) (---NOME---) (No ) (---NOME---)
  0001 AVRMAQ1      0005 TGR1
#
          (--NAME--) (-VALUE--)
          #NB1      1
          #Ta      0.
          #Tb      0.
          #BLC     1
          #EST     9
STOP
#(No ) (---NOME---) (No ) (---NOME---)
  0009 PSS_cen      0006 PSS_CON
          #NB4      4
          #BLC     1
          #EST     9
STOP
-999
END

```

Fonte: Elaborado pelo autor.