

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise através de Simulação em Tempo Real  
do Sistema Elétrico de uma Plataforma  
*Off-shore* para Produção de Petróleo

Jully Andrea Calderón Coello

Itajubá, 13 de outubro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

Jully Andrea Calderón Coello

Análise através de Simulação em Tempo Real  
do Sistema Elétrico de uma Plataforma  
*Off-shore* para Produção de Petróleo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

Coorientador: Prof. Dr. Carlos A. Villegas Guerrero

13 de outubro de 2021

Itajubá

*"Você nasceu com a oportunidade e responsabilidade de se tornar uma pessoa lendária"*

*(Robin Sharma)*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, por todas as oportunidades colocadas em meu caminho, por estar sempre ao meu lado e ser meu guia em cada momento.

Ao meu amado marido Johnny, meu parceiro de anos, com quem assumimos este novo desafio de amor e estudo.

Aos meus pais Efrén e Katty e às minhas irmãs Tati e Leti, porque não existe distância que enfraqueça o nosso amor CPDR.

Aos meus sogros Johnny e Gladys e cunhada Nicole por estarem sempre presentes neste projeto.

Aos meus avós Telma, Estherfilia e Àngel Vicente (*in memoriam*) por serem exemplos de luta.

À família Villegas Cabrera (Carlos, Laura e Mia), pelo apoio e hospitalidade, pois nos sentimos parte de sua família, nosso pequeno Equador em Itajubá.

Aos professores Paulo Márcio da Silveira e Carlos Villegas Guerrero, pelas orientações, confiança e prontidão em ajudar.

Aos demais professores e colegas do QMAP e do projeto de pesquisa, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À FUPAI, a Petrobrás, ao QMAP e à UNIFEI, pelo apoio financeiro e estrutural.

# Resumo

O controle dinâmico do sistema de geração de energia elétrica é um dos elementos mais importantes em uma plataforma *offshore*, pois é responsável por manter a estabilidade do sistema elétrico tanto em regime estacionário quanto após uma perturbação, evitando assim a perda total do fornecimento de energia e, conseqüentemente, grandes perdas econômicas. Nesse sentido, o Simulador Digital em Tempo Real (RTDS) torna-se uma ferramenta importante, pois permite simular a dinâmica do sistema de geração em tempo real. Normalmente, estudos de simulação *off-line* do controle dinâmico do gerador são realizados com informações limitadas dos fabricantes, o que leva ao uso de dados típicos para os modelos de controle, podendo, assim, conduzir a respostas não confiáveis. Assim, para se obter um comportamento realista da dinâmica do sistema elétrico no RTDS, é necessária uma representação precisa dos equipamentos e seus sistemas de controle. Nesse sentido, este trabalho apresenta a modelagem detalhada no RTDS do sistema de excitação e do regulador de velocidade do sistema de geração de uma plataforma de extração de petróleo. A validação dos modelos matemáticos dos controladores desenvolvidos no RTDS foi feita através da análise comparativa entre os resultados dos ensaios em campo e de laboratório. O sistema elétrico da plataforma foi submetido a diversos distúrbios, uma vez que o comportamento real do controle do sistema de geração foi obtido.

**Palavras-chaves:** RTDS, Plataforma *offshore*, Sistema de Excitação, Regulador de Velocidade, Sistema de Geração.

# Abstract

The dynamic control of the power generation system is one of the most important elements in an offshore platform, since it is responsible for maintaining the electrical system stability both in steady-state and transient operation, thus avoiding the complete loss of power supply and, consequently, large economic losses. In this regard, the Real-Time Digital Simulator (RTDS) becomes an important tool, as it allows to simulate the generation system dynamic in real-time with the possibility of testing actual control and protection devices, through a hardware-in-the-loop scheme. Typically, off-line simulation studies of the generator dynamic control are carried out with limited information from manufacturers, which leads to the use of typical data for models and, therefore, the possibility of unreliable responses. However, to obtain a realistic behavior of the electrical system dynamic in the RTDS, an accurate representation of its models is necessary. In this sense, this work presents the detailed modeling of the excitation system and the speed regulator of the power generation system of an oil extraction platform in the RTDS. The validation of the mathematical models of the controllers developed in the RTDS was done through a comparative analysis between the results of field data and laboratory test. The electrical system of the platform was subject to several disturbances, once the real behavior of the generation system control was obtained.

**Keywords:** RTDS, Offshore Platform, Excitation System, Speed Regulator, Generation System.

# Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Evolução da produção do petróleo no Brasil . . . . .	19
Figura 2.1 – Tipos de turbinas . . . . .	24
Figura 2.2 – Elementos do sistema de excitação . . . . .	26
Figura 2.3 – Excitatriz CC . . . . .	27
Figura 2.4 – Excitatriz CA com retificador estacionário . . . . .	28
Figura 2.5 – Excitatriz CA com retificador rotativo ou sem escova . . . . .	28
Figura 2.6 – Excitatriz estática . . . . .	29
Figura 2.7 – Diagrama de blocos do compensador de carga . . . . .	30
Figura 2.8 – Curva de tempo inverso do limitador de sobre-excitação . . . . .	31
Figura 2.9 – Diagrama de controle no modo <i>Takeover</i> . . . . .	32
Figura 2.10–Diagrama de controle no modo <i>Summing Point</i> . . . . .	32
Figura 2.11–Curva característica do limitador de sub-excitação- UEL1 . . . . .	33
Figura 2.12–Curva característica do limitador de sub-excitação, linha reta de segmento único- UEL2 . . . . .	33
Figura 2.13–Curva característica do limitador de sub-excitação, linha reta de segmento múltiplo- UEL2 . . . . .	34
Figura 2.14–Curva característica do limitador de corrente do estator . . . . .	34
Figura 2.15–Curva típica de compensação de sub-frequência . . . . .	35
Figura 2.16–Curva típica do limitador ao 1,1 pu V/Hz . . . . .	35
Figura 2.17–Diagrama de blocos completo do controle da turbina . . . . .	37
Figura 2.18–Modo de operação do regulador de velocidade . . . . .	38
Figura 2.19–Sistema de controle de malha fechada . . . . .	39
Figura 2.20–Sistema de controle de malha aberta . . . . .	39
Figura 2.21–Reposta da malha de controle a um sinal degrau . . . . .	41
Figura 2.22–Reposta da malha de controle com variações apenas do parâmetro $k_p$ . . . . .	41
Figura 2.23–Reposta da malha de controle quando é mudado o parâmetro $k_i$ . . . . .	42
Figura 2.24–Reposta da malha de controle quando é mudado o parâmetro $k_d$ . . . . .	43
Figura 3.1 – Disposição da capacidade máxima de processamento do RTDS da UNIFEI . . . . .	47
Figura 3.2 – Tela dos módulos RSCAD/ <i>Draft</i> e RSCAS/ <i>Runtime</i> . . . . .	48
Figura 3.3 – Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico da plataforma <i>offshore</i> . . . . .	49
Figura 3.4 – Diagrama de bloco dos equipamentos de potência que conformam o sistema de geração . . . . .	49
Figura 3.5 – Conexão em Duplo I . . . . .	51
Figura 3.6 – Conexão em L . . . . .	51
Figura 3.7 – Diagrama de bloco do sistema de geração . . . . .	53
Figura 3.8 – Modelo matemático do sistema de excitação . . . . .	55

Figura 3.9 – Modelo matemático do OEL . . . . .	57
Figura 3.10–Modelo matemático do UEL . . . . .	58
Figura 3.11–Modelo matemático do V/Hz . . . . .	59
Figura 3.12–Modelo matemático do conjunto governador-turbina . . . . .	60
Figura 3.13–Curva característica da válvula de combustível . . . . .	61
Figura 3.14–Bloco INDM da biblioteca do RSCAD/ <i>Draft</i> . . . . .	62
Figura 3.15–Bloco de carga dinâmica da biblioteca do RSCAD/ <i>Draft</i> . . . . .	63
Figura 3.16–Bloco do transformador de potência de 2 enrolamentos da biblioteca do RSCAD/ <i>Draft</i> . . . . .	63
Figura 3.17–Bloco do transformador de potência de 3 enrolamentos da biblioteca do RSCAD/ <i>Draft</i> . . . . .	64
Figura 3.18–Distribuição do sistema elétrico da plataforma nos 4 <i>racks</i> . . . . .	65
Figura 3.19–Representação dos transformadores de acoplamento no RTDS . . . . .	65
Figura 4.1 – Comparação da reposta de frequência entre o registro de campo da plataforma e o cenário 1- inserção de carga. . . . .	69
Figura 4.2 – Comparação da reposta de tensão terminal entre o registro de campo da plataforma e o cenário 1- inserção de carga. . . . .	70
Figura 4.3 – Comparação da reposta de frequência entre o registro de campo da plataforma e o cenário 1- rejeição de carga. . . . .	71
Figura 4.4 – Comparação da reposta de tensão terminal entre o registro de campo da plataforma e o cenário 1- rejeição de carga. . . . .	72
Figura 4.5 – Sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 2- inserção de carga. . . . .	74
Figura 4.6 – Reposta de tensão terminal devido à sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 2- inserção de carga. . . . .	75
Figura 4.7 – Sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 2- rejeição de carga. . . . .	78
Figura 4.8 – Reposta de tensão terminal devido à sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 2- rejeição de carga. . . . .	78
Figura 4.9 – Ampliação do passo 4 e passo 5 da sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 2- rejeição de carga. . . . .	79
Figura 4.10–Ampliação do passo 4 e passo 5 da reposta da tensão terminal devido à sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 2- rejeição de carga. . . . .	80
Figura 4.11–Sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 3- inserção de carga. . . . .	81
Figura 4.12–Reposta de tensão terminal devido à sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 3- inserção de carga. . . . .	82



Figura 4.13–Sintonia do controlador PID do regulador de velocidade cenário 3- rejeição de carga. . . . .	83
Figura 4.14–Reposta de tensão terminal devido à sintonia do controlador PID do regulador de velocidade, cenário 3- rejeição de carga. . . . .	83
Figura 4.15–Comparação da reposta de frequência entre o registro de campo da plataforma, o cenário 2 e o cenário 3- inserção de carga. . . . .	84
Figura 4.16–Comparação da reposta de tensão terminal entre o registro de campo da plataforma, o cenário 2 e o cenário 3- inserção de carga. . . . .	85
Figura 4.17–Comparação da reposta da frequência entre o registro de campo da plataforma, o cenário 2 e o cenário 3- rejeição de carga. . . . .	85
Figura 4.18–Comparação da reposta da tensão terminal entre o registro de campo da plataforma, o cenário 2 e o cenário 3- rejeição de carga. . . . .	86
Figura 4.19–Comparação da reposta da frequência entre o registro de campo da plataforma e o cenário 3- inserção de carga. . . . .	88
Figura 4.20–Comparação da reposta da tensão terminal entre o registro de campo da plataforma e o cenário 3- inserção de carga. . . . .	88
Figura 4.21–Comparação da reposta da frequência entre o registro de campo da plataforma e o cenário 3- rejeição de carga. . . . .	89
Figura 4.22–Comparação da reposta da tensão terminal entre o registro de campo da plataforma, o cenário 2 e o cenário 3- rejeição de carga. . . . .	89
Figura 4.23–Carregamento imposto ao sistema elétrico da plataforma. . . . .	90
Figura 4.24–Curva de capacidade de potência- Caso 1 . . . . .	91
Figura 4.25–Comportamento do sistema- Caso de estudo 1 . . . . .	92
Figura 4.26–Curva de capacidade de potência- Caso 2 . . . . .	93
Figura 4.27–Comportamento do sistema- Caso de estudo 2 . . . . .	94
Figura 4.28–Curva de capacidade de potência- Caso 3 . . . . .	95
Figura 4.29–Comportamento do sistema- Caso de estudo 3 . . . . .	95
Figura 4.30–Curva de capacidade de potência- Caso 4 . . . . .	96
Figura 4.31–Comportamento do sistema- Caso de estudo 4 . . . . .	97
Figura 4.32–Curva UEL do sistema de excitação- Caso 4 . . . . .	97
Figura 4.33–Comportamento do sistema- Caso de estudo 5 . . . . .	98
Figura 4.34–Diagrama de impedância. . . . .	99
Figura 4.35–Comportamento do sistema- Caso de estudo 6 . . . . .	100

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Característica dos parâmetros do controlador PID . . . . .	43
Tabela 3.1 – Equipamento de geração instalado na plataforma. . . . .	50
Tabela 3.2 – Transformadores de potência instalados na plataforma. . . . .	52
Tabela 3.3 – Carga instalada na plataforma. . . . .	52
Tabela 3.4 – Parâmetros nominais do gerador síncrono. . . . .	54
Tabela 3.5 – Inércia total referida a 3600 rpm. . . . .	54
Tabela 3.6 – Parâmetros do modelo matemático do sistema de excitação. . . . .	55
Tabela 3.7 – Parâmetros do modelo matemático do compensador de carga. . . . .	56
Tabela 3.8 – Parâmetros do modelo matemático do OEL. . . . .	57
Tabela 3.9 – Parâmetros do modelo matemático do UEL. . . . .	58
Tabela 3.10–Parâmetros do modelo matemático do V/Hz. . . . .	59
Tabela 3.11–Parâmetros do modelo matemático simplificado do conjunto regulador de velocidade-turbina . . . . .	61
Tabela 4.1 – Tempo limite para exceder a corrente do estator. . . . .	91

# Lista de abreviaturas e siglas

A	Aberto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ACO</i>	<i>Ant Colony Optimization</i>
<i>AIS</i>	<i>Artificial Immune System</i>
<i>ANN</i>	<i>Artificial Neural Network</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
<i>AVR</i>	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
CA	Corrente alternada
CIBE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
CC	Corrente contínua
CCM	Centro de controle de motores
CDC	Centro de distribuição de carga
<i>DE</i>	<i>Differential Evolution</i>
DEI	Dispositivos eletrônicos inteligentes
<i>DRP</i>	<i>Droop</i>
F	Fechado
FSC	Frequência sem carga
<i>GA</i>	<i>Genetic Algorithm</i>
GG	Gerador de gás
GS	Gerador síncrono
<i>HIL</i>	<i>Hardware-in-the-loop</i>
<i>HV</i>	<i>High value</i>
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>

<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>IFT</i>	<i>Interactive Feedback Test</i>
MM	Multi-massa
MS	Máquina síncrona
<i>OEL</i>	<i>Overexcitation Limiter</i> - Limite de sobre-excitação
PID	Proporcional- Integral- Derivativo
PN	Painel
<i>PSO</i>	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QmaP	Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica
<i>RSM</i>	<i>Response Surface Methodology</i>
<i>RTDS</i>	<i>Real Time Digital Simulator</i>
RV	Redutor de velocidade
<i>SA</i>	<i>Simulated Annealing</i>
<i>SCL</i>	<i>Stator Current Limiter</i> - Limitador de corrente do estator
<i>SVM</i>	<i>Support Vector Machine</i>
TG	Turbina a gás
TL	Turbina livre
TR	Transformador de potência
<i>UEL</i>	<i>Underexcitation Limiter</i> - Limitador de sub-excitação
UEP	Unidade Estacionária de Produção
<i>UF</i>	<i>Underfrequency Limiter</i> - Limitador de sub-frequência
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
<i>UPS</i>	<i>Uninterrupted Power Supply</i>
VM	Variável manipulada
VP	Variável de processo

# Lista de símbolos

$\Delta W$	Variação de velocidade
$E_f$	Tensão de campo
$f$	Frequência elétrica
$f_G$	Frequência do GS
$f_{UFref}$	Frequência de referência do limitador UF
$I_{dc}$	Corrente direta
$I_f$	Corrente de campo
$I_{OELref}$	Corrente de referência do OEL
$I_t$	Corrente do estator do GS
$k_d$	Ganho do termo derivativo
$k_G$	Ganho do amplificador
$k_i$	Ganho do termo integral
$k_p$	Ganho do termo proporcional
$n_m$	Velocidade mecânica
$p$	Número de polos
$P_{amb}$	Pressão do ambiente
$P$	Potência ativa
$P_m$	Potência mecânica
$P_{ref}$	Potência de referência do UEL
$Q$	Potência reativa;
$Q_{UELref}$	Potência reativa de referência do UEL
$R_a$	Resistência de armadura
$R_c$	Resistência de compensação

$S$	Potência nominal
$T_{amb}$	Temperatura do ambiente
$T'_{do}$	Constante de tempo transitório de circuito aberto não saturado de eixo direto
$T''_{do}$	Constante de tempo sub-transitório de circuito aberto não saturado de eixo direto
$T_e$	Torque elétrico
$T_{max}$	Temperatura máxima
$T''_{qo}$	Constante de tempo sub-transitório de circuito aberto não saturado de eixo de quadratura
$V$	Tensão nominal
$V/Hz$	Volts/ Hertz
$V_{ac}$	Tensão alternada
$V_c$	Sinal do compensador de carga
$V_{lim}$	Sinal da somatória dos limitadores
$V_{OEL}$	Sinal de saída da malha do controle do OEL
$V_p$	Tensão da excitatriz
$V_{ref}$	Tensão de referência da malha de controle do sistema de excitação
$V_{RLMT}$	Limitador máximo e mínimo
$V_t$	Tensão terminal do GS
$V_{UEL}$	Sinal de saída da malha de controle do UEL
$X_a$	Reatância de armadura do GS
$X_c$	Reatância de compensação
$X_d$	Reatância não saturada do eixo direto
$X'_d$	Reatância transitória não saturada do eixo direto
$X''_d$	Reatância sub-transitória não saturada do eixo direto
$X_q$	Reatância não saturada do eixo de quadratura
$X''_q$	Reatância sub-transitória não saturada do eixo de quadratura

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Sínteses</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>21</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da dissertação</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>TEORIA DO SISTEMA DE GERAÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Turbina a Gás</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Gerador Síncrono</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Sistema de Excitação</b>	<b>25</b>
2.4.1	Excitatriz	26
2.4.1.1	Excitatriz CC	26
2.4.1.2	Excitatriz CA	27
2.4.1.3	Excitatriz Estática	28
2.4.2	Regulador de Tensão Automático	29
2.4.3	Compensador de Carga	30
2.4.4	Estabilizador de Potência ( <i>PSS-Power System Stabilizer</i> )	30
2.4.5	Limitadores	30
2.4.5.1	Limitador de sobre-excitação ( <i>OEL-Overexcitation Limiter</i> )	31
2.4.5.2	Limitador de sub-excitação ( <i>UEL-Underexcitation Limiter</i> )	32
2.4.5.3	Limitador de corrente do estator ( <i>SCL-Stator Current Limiter</i> )	34
2.4.5.4	Limitador de sub-frequência ( <i>UF-Underfrequency Limiter</i> ) ou Limitador Volts por Hertz (V/Hz)	34
<b>2.5</b>	<b>Regulador de Velocidade</b>	<b>36</b>
<b>2.6</b>	<b>Sintonia PID</b>	<b>38</b>
<b>2.7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>45</b>
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA NO RTDS</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulador Digital em Tempo Real - RTDS</b>	<b>46</b>
<b>3.2</b>	<b>Descrição do sistema elétrico da plataforma offshore</b>	<b>48</b>
3.2.1	Descrição do sistema de geração	49
3.2.2	Tipos de conexão	50
3.2.3	Sistema de distribuição	51
<b>3.3</b>	<b>Sistema de Geração no RTDS</b>	<b>52</b>

3.3.1	Modelo matemático do sistema de excitação . . . . .	53
3.3.1.1	Limitador de sobre-excitação (OEL) . . . . .	56
3.3.1.2	Limitador de sub-excitação (UEL) . . . . .	57
3.3.1.3	Limitador de sub-frequência (UF) . . . . .	58
3.3.2	Modelo matemático do regulador de velocidade . . . . .	59
<b>3.4</b>	<b>Sistema de Distribuição no RTDS . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>3.5</b>	<b>Premissas adotadas na modelagem do sistema no RTDS . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>3.6</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Validação do controle do sistema de geração . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1.1	Cenário 1 . . . . .	68
4.1.1.1	Inserção de Carga . . . . .	69
4.1.1.2	Rejeição de Carga . . . . .	70
4.1.2	Cenário 2 . . . . .	72
4.1.2.1	Inserção de Carga . . . . .	73
4.1.2.2	Rejeição de carga . . . . .	77
4.1.3	Cenário 3 . . . . .	80
4.1.3.1	Inserção de carga . . . . .	81
4.1.3.2	Rejeição de carga . . . . .	82
<b>4.2</b>	<b>Análise do comportamento do sistema integrado . . . . .</b>	<b>89</b>
4.2.1	Estudo de caso 1 . . . . .	91
4.2.2	Estudo de caso 2 . . . . .	93
4.2.3	Estudo de caso 3 . . . . .	94
4.2.4	Estudo de caso 4 . . . . .	96
4.2.5	Estudo de caso 5 . . . . .	98
4.2.6	Estudo de caso 6 . . . . .	99
<b>4.3</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>5.1</b>	<b>Considerações finais . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para desenvolvimentos futuros . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>5.3</b>	<b>Publicações . . . . .</b>	<b>104</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>105</b>