

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

Análise das metodologias de estudo de
partida de motores de grande porte em
sistemas elétricos isolados

Johnny José Orozco Niveló

Itajubá, 03 de março de 2022

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

Johnny José Orozco Niveló

**Análise das metodologias de estudo de
partida de motores de grande porte em
sistemas elétricos isolados**

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. José Maria de Carvalho Filho

Coorientador: Prof. Dr. Frederico Oliveira Passos

03 de março de 2022

Itajubá

*Dedico este trabalho com muito amor a toda
minha família, em especial para minha mãe
Gladys, meu pai Johnny, minha irmã Ni-
colle e minha esposa Jully.*

Agradecimentos

A Deus, por sua infinita misericórdia e permitindo-me terminar esta etapa do mestrado com sucesso.

À minha querida esposa e companheira de vida Jully Calderón, pelo amor incondicional e confiança em assumir este novo desafio de amor e estudo.

Aos meus pais Johnny Orozco e Gladys Niveló, e a minha irmã Nicolle, pelo apoio e carinho sempre na realização dos meus objetivos.

Aos meus sogros Efren e Katty e cunhadas Tatiana e Leticia por estarem sempre presentes neste projeto, apesar da distância.

À minha avó Gladys. E meus avós Cesar, Adriana e Luis (*in memoriam*) por serem exemplos de trabalho e de luta constante.

Ao professor Carlos Villegas e sua família (Laura e Mia), pela confiança, apoio e hospitalidade, por sempre nos receber com amor aqui em Itajubá.

Aos professores José Maria de Carvalho Filho e Frederico Oliveira Passos, pela confiança e orientações essenciais para este trabalho.

Aos demais professores e colegas do Grupo de Estudos da Qualidade da Energia e Proteção Elétrica - QMAP e do projeto de pesquisa, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À Fundação de Pesquisa e Assessoramento a Indústria - FUPAI, à Petrobrás, ao QMAP e à Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, pelo apoio financeiro e ensinamento de qualidade.

Resumo

Esta dissertação apresenta uma análise comparativa entre as duas principais metodologias utilizadas para realizar os estudos de partida de motores, sendo a primeira denominada de método estático (*snapshot*), no domínio da frequência, e a segunda, intitulada de método dinâmico (*The Speed-Torque and acceleration-Time*), no domínio do tempo, utilizando como estudo de caso uma plataforma *offshore* típica composta por geradores e motores de indução de grande porte. Para isso, foram utilizados o *software Power Tools for Windows* (PTW) e o simulador digital em tempo real (RTDS) para realizar a análise das duas metodologias. A partir dos resultados do estudo de caso são apontadas as principais vantagens, desvantagens de cada uma, assim como as diferenças nos requisitos associados aos parâmetros dos equipamentos do sistema elétrico necessários para aplicar cada metodologia. Os resultados das simulações mostraram que o estudo de partida do motor no domínio do tempo fornece informações mais completas que o estático, ainda mais para este tipo de sistema em particular. Este trabalho revela a necessidade de os critérios de seleção entre as duas metodologias serem definidos na norma IEEE 3002.7-2018 e para sistemas isolados é altamente recomendável realizar uma análise no domínio do tempo.

Palavras-chaves: Plataforma *offshore*, Partida de Motores, Gerador síncrono, Gerador de Indução, *software* no domínio da frequência, *software* no domínio do tempo.

Abstract

This dissertation presents a comparative analysis between the two main methodologies used to carry out the studies of motor starting, the first called the static method (*snapshot*), in the frequency domain, and the second, called the dynamic method (*The Speed-Torque and acceleration-Time*), in the time domain, using as a case study a typical *offshore* platform composed of generators and large induction motors. For this, the *software Power Tools for Windows* (PTW) and the real-time digital simulator (RTDS) were used to perform the analysis of the two methodologies. From the results of the case study, the main advantages and disadvantages of each one are pointed out, as well as the differences in the requirements associated with the parameters of the electrical system equipment necessary to apply each methodology. The simulation results showed that the study of motor starting in the time domain provides more complete information than the static one, even more for this type of system in particular. This work reveals the need for the selection criteria between the two methodologies to be defined in the IEEE 3002.7-2018 standard and for isolated systems it is highly recommended to perform a time domain analysis.

Keywords: *Offshore* Platform, Motor Starting, Synchronous Generator, Induction Generator, Frequency Domain Software, Time Domain Software.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Circuito do estator e do rotor da máquina de indução	27
Figura 2.2 – Enrolamentos do estator na coordenada d–q.	31
Figura 2.3 – Circuito equivalente em regime permanente da máquina de indução . .	36
Figura 2.4 – Circuito Thevenin equivalente da máquina de indução	36
Figura 2.5 – Circuito equivalente DQ da máquina de indução trifásica idealizada . .	37
Figura 3.1 – Características típicas de torque–escorregamento do motor e da carga .	43
Figura 3.2 – Características típicas da tensão do terminal do gerador para vários sistemas excitadores/reguladores	43
Figura 3.3 – Representação simplificada do sistema regulador/excitador do gerador .	44
Figura 4.1 – Diagrama unifilar simplificado e seções do sistema elétrico da plataforma	46
Figura 4.2 – Conexão em duplo I da topologia da plataforma	47
Figura 4.3 – Conexão em L da topologia da plataforma	47
Figura 4.4 – Motores e barramentos selecionados para a análise de partida	51
Figura 4.5 – Características do <i>software</i> - PTW	53
Figura 4.6 – Parametrização do cálculo de fluxo de carga no PTW	55
Figura 4.7 – Parâmetros do motor de compressor de gas de 11MW - PTW	56
Figura 4.8 – Estrutura do <i>hardware</i> do RTDS (Aplicação em um esquema de teste HIL)	58
Figura 4.9 – Três subsistemas do RSCSD/ <i>Draft</i> usados para um sistema elétrico de potência	60
Figura 4.10–Distribuição dos <i>racks</i> para o sistema elétrico da plataforma	61
Figura 4.11–Modelo de carga constante usado nos painéis de 0,48 kV e 0,69 kV. . .	61
Figura 4.12–Parâmetros do motor do compressor de gás (11 MW).	63
Figura 4.13–Diagrama do bloco do sistema de geração.	64
Figura 4.14–Modelo matemático do sistema de excitação	66
Figura 4.15–Modelo matemático do conjunto governador-turbina	67
Figura 5.1 – Comparação das potências fornecidas pelos geradores principais	70
Figura 5.2 – (a) Comparação do carregamento em MW, (b) Comparação de carre- gamento em MVAR dos painéis de 13,8 kV e 4,16 kV	71
Figura 5.3 – (a) Comparação do carregamento em MW, (b) Comparação de carre- gamento em MVAR dos painéis de 480 V	72
Figura 5.4 – Fluxo de potência da plataforma na topologia original “3GS” no RTDS	72
Figura 5.5 – Comparação das potências fornecidas pelos geradores principais.	74
Figura 5.6 – Fluxo de potência da plataforma na topologia alternativa “2GS+GI+COMP” com a compensação de reativos de 24 MVAR no RTDS	75

Figura 5.7 – Comparação do perfil de tensão do barramento principal de 13,8 kV durante a partida do motor M1-11 MW para os três cenários de tensão de pré-partida no RTDS	91
Figura 5.8 – Velocidade dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW no RTDS	91
Figura 5.9 – Frequência do sistema durante a partida do motor M1-11 MW no RTDS	92
Figura 5.10–Potência ativa dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW no RTDS	92
Figura 5.11–Potência reativa dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW no RTDS	93
Figura 5.12–Corrente dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW no RTDS	93
Figura 5.13–Potência ativa e reativa no RTDS consumida pelo motor M1-11 MW durante a partida	94
Figura 5.14–Corrente de partida do motor M1-11 MW no RTDS	94
Figura 5.15–Fator de potência do motor M1-11 MW no RTDS	95
Figura 5.16–Velocidade do motor M1-11 MW durante a partida no RTDS	95
Figura 5.17–Torque eletromagnético do motor e torque de carga durante a partida do motor M1-11 MW no RTDS	96
Figura 5.18–Comparação do perfil de tensão do barramento principal de 13,8 kV durante a partida do motor M1-11 MW para os cenários “2GS+GI+COMP” com 24MVar e 32MVar no RTDS	96
Figura 5.19–Comparação do perfil de tensão do barramento principal de 13,8 kV durante a partida do motor M1-11 MW para os cenários “3GS” e “2GS+GI+COMP” com 24MVar e 32MVar no RTDS	97
Figura 5.20–Velocidade dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW para o cenário “2GS+GI+COMP_24MVar_1,03p.u.” no RTDS	98
Figura 5.21–Velocidade dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW para o cenário “2GS+GI+COMP_32MVar_1,03p.u.” no RTDS	98
Figura 5.22–Potência ativa dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW para o cenário “2GS+GI+COMP_24MVar_1,03p.u.” no RTDS	99
Figura 5.23–Potência ativa dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW para o cenário “2GS+GI+COMP_32MVar_1,03p.u. no RTDS	99
Figura 5.24–Potência reativa dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW para o cenário “2GS+GI+COMP_24MVar_1,03p.u. no RTDS	100
Figura 5.25–Potência reativa dos geradores durante a partida do motor M1-11 MW para o cenário “2GS+GI+COMP_32MVar_1,03p.u. no RTDS	101
Figura A.1–Processo de autoexcitação do gerador de indução	115

Figura A.2–Limites para determinar o BCs para suporte de reativo do SEIG– curva de magnetização da máquina de indução versus curva de carga do capacitor	117
Figura A.3–Curva de capacidade de uma máquina síncrona de polos lisos	119
Figura B.1–Folha de dados do GI	120
Figura C.1–Parâmetros do GI no PTW	121
Figura D.1–Diagrama de bloco do sistema de geração com GI	122
Figura D.2–Entrada da malha de controle de potência do GI	123
Figura D.3–Turbina do GI	124
Figura E.1–Folha de dados do motor de indução de 11 MW	125

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Tensões Remanescentes Recomendadas– IEEE Std. 3002.7-2018	40
Tabela 4.1 – Barramentos monitorados.	50
Tabela 4.2 – Comparações de fluxo de potência, considerando $X d'$ e $X d''$	57
Tabela 4.3 – Parâmetros do motor de indução (11 MW) em p.u.	62
Tabela 4.4 – Parâmetros de configuração do gerador síncrono.	64
Tabela 4.5 – Inercia dos equipamentos de potência do sistema de geração.	65
Tabela 4.6 – Parâmetros do modelo matemático do sistema de excitação.	66
Tabela 4.7 – Parâmetros do modelo matemático simplificado do conjunto governador-turbina	68
Tabela 5.1 – Passos de capacitância para o modelo	73
Tabela 5.2 – Queda de tensão em % – 3GS_1,00p.u. – PTW e RTDS	77
Tabela 5.3 – Erro absoluto em % – 3GS_1,00p.u. – RTDS Vs. PTW	78
Tabela 5.4 – Queda de tensão em % – 3GS_1,03p.u. – PTW e RTDS	79
Tabela 5.5 – Diferença absoluta em % – 3GS_1,03p.u. – RTDS Vs. PTW	80
Tabela 5.6 – Queda de tensão em % – 3GS_1,05p.u. – PTW e RTDS	81
Tabela 5.7 – Erro absoluto em % – 3GS_1,05p.u. - RTDS Vs. PTW	81
Tabela 5.8 – Queda de tensão em % – 2GS+GI+COMP_24MVA _r _1,00p.u. – PTW e RTDS	82
Tabela 5.9 – Erro absoluto em % – 2GS+GI+COMP_24MVA _r _1,00p.u. – RTDS Vs. PTW	82
Tabela 5.10–Queda de tensão em % – 2GS+GI+COMP_24MVA _r _1,03p.u. – PTW e RTDS	83
Tabela 5.11–Erro absoluto em % – 2GS+GI+COMP_24MVA _r _1,03p.u. – RTDS Vs. PTW	84
Tabela 5.12–Queda de tensão em % – 2GS+GI+COMP_24MVA _r _1,05p.u. – PTW e RTDS	85
Tabela 5.13–Erro absoluto em % – 2GS+GI+COMP_24MVA _r _1,05p.u. – RTDS Vs. PTW	85
Tabela 5.14–Queda de tensão em % – 2GS+GI+COMP_32MVA _r _1,00p.u. – PTW e RTDS	86
Tabela 5.15–Erro absoluto em % – 2GS+GI+COMP_32MVA _r _1,00p.u. – RTDS Vs. PTW	87
Tabela 5.16–Queda de tensão em % – 2GS+GI+COMP_32MVA _r _1,03p.u. – PTW e RTDS	88
Tabela 5.17–Erro absoluto em % – 2GS+GI+COMP_32MVA _r _1,03p.u. – RTDS Vs. PTW	88

Tabela 5.18–Queda de tensão em % – 2GS+GI+COMP_32MVar_1,05p.u. – PTW e RTDS	89
Tabela 5.19–Erro absoluto em % – 2GS+GI+COMP_32MVar_1,05p.u. – RTDS Vs. PTW	90
Tabela A.1–Comparação entre GS e GI.	114
Tabela D.1–Parâmetros de configuração de GI	122

Lista de abreviaturas e siglas

A	Aberto
AG	Gerador Auxiliar
AGR	Sala do Gerador Auxiliar
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
<i>AVR</i>	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
BC	Banco de Capacitores
CA	Corrente alternada
CCM	Centro de controle de motores
CDC	Centro de distribuição de carga
DC	Corrente contínua
DI	Duplo I
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor</i>
EG	Gerador de Emergência
EGR	Sala do Gerador de Emergência
F	Fechado
FEM	Força Eletromotriz
GI	Gerador de Indução
GS	Gerador síncrono
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>HIL</i>	<i>Hardware-in-the-loop</i>
<i>IRC</i>	<i>InterRack Communication Card</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
MM	Multi-massa

<i>PHIL</i>	<i>Power Hardware-in-the-loop</i>
PN	Painel
<i>PTW</i>	<i>Power Tools for Windows</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
<i>RISC</i>	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
<i>RTDS</i>	<i>Real Time Digital Simulator</i>
<i>SEIG</i>	<i>Self-Excited Induction Generators</i>
<i>SIL</i>	<i>Softaware-in-the-loop</i>
TG	Turbina a gás
TL	Turbina livre
UEP	Unidade Estacionária de Petróleo
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

Lista de símbolos

ΔW	Variação de velocidade
ϕ_g	Ângulo como gerador
ϕ_m	Ângulo como motor
ψ_a	Enlace de fluxo no enrolamento da fase a do estator
ψ_b	Enlace de fluxo no enrolamento da fase b do estator
ψ_c	Enlace de fluxo no enrolamento da fase c do estator
ψ_A	Enlace de fluxo no enrolamento da fase A do rotor
ψ_B	Enlace de fluxo no enrolamento da fase B do rotor
ψ_C	Enlace de fluxo no enrolamento da fase C do rotor
ψ_{Dr}	Enlaces de fluxo do eixo direto do rotor
ψ_{ds}	Enlaces de fluxo do eixo direto do estator
ψ_{Qr}	Enlaces de fluxo do eixo de quadratura do rotor
ψ_{qs}	Enlaces de fluxo do eixo de quadratura do estator
θ	Diferença angular
C	Capacitância
E_f	Tensão de campo
E_G	Tensão interna do gerador
E_L	Tensão de terminal do gerador
f_s	Frequência elétrica
i_a	Corrente no enrolamento da fase a do estator
i_b	Corrente no enrolamento da fase b do estator
i_c	Corrente no enrolamento da fase c do estator
i_A	Corrente no enrolamento da fase A do rotor

i_B	Corrente no enrolamento da fase B do rotor
i_C	Corrente no enrolamento da fase C do rotor
i^T	Matriz transposta de corrente
i_d	Corrente do eixo direto do estator
i_D	Corrente do eixo direto do rotor
I_L	Corrente de linha
i_q	Corrente do eixo de quadratura do estator
i_Q	Corrente do eixo de quadratura do rotor
\bar{I}_r	Corrente do rotor
\bar{I}_s	Corrente do estator
J	Momento de inercia
L	Indutância
L_{aa}	Auto-indutância nos enrolamentos do estator
L_{AA}	Auto-indutância nos enrolamentos do rotor
L_{aA}	Valor máximo de indutância mutua nos enrolamentos do estator e do rotor
L_{ab}	Indutância mutua entre os enrolamentos do estator
L_{AB}	Indutância mutua entre os enrolamentos do rotor
L_m	Indutância mutua
L_{rr}	Indutância própria do rotor
L_{ss}	Indutância própria do estator
n_r	Velocidade do rotor
n_s	Velocidade síncrona
P	Operador diferencial $\frac{d}{dt}$
P_n	Potência ativa nominal
P_r	Potência instantânea do rotor

P_s	Potência instantânea do estator
p_f	Número de polos
Q_{fase}	Potência reativa de fase
Q_g	Potência reativa como gerador
Q_m	Potência reativa como motor
R_r	Resistência do enrolamento do rotor
R_s	Resistência do enrolamento do estator
s	Escorregamento
S	Potência aparente
T_{em}	Torque electromagnético
T_m	Torque mecânico da carga
V	Tensão nominal
\bar{V}_s	Tensão do estator
\bar{V}_r	Tensão do rotor
V_a	Tensão no enrolamento da fase a do estator
V_b	Tensão no enrolamento da fase b do estator
V_c	Tensão no enrolamento da fase c do estator
V_A	Tensão no enrolamento da fase A do rotor
V_B	Tensão no enrolamento da fase B do rotor
V_C	Tensão no enrolamento da fase C do rotor
V_D	Tensão do eixo direto do rotor
V_d	Tensão do eixo direto do estator
V_L	Tensão de linha
V_{lim}	Sinal da somatória dos limitadores
V_p	Tensão da excitatriz
V_Q	Tensão do eixo de quadratura do rotor

V_q	Tensão do eixo de quadratura do estator
V_{ref}	Tensão de referência da malha de controle do sistema de excitação
V_{RLMT}	Limitador máximo e mínimo
ω_s	Velocidade síncrona [rad/seg]
ω_r	Velocidade angular do rotor [rad/seg]
X_m	Reatância de magnetização
X_r	Reatância de dispersão do rotor
X_s	Reatância de dispersão do estator

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Visão Geral	21
1.2	Motivação	23
1.3	Objetivos	24
1.4	Estrutura da dissertação	24
2	MÁQUINAS DE INDUÇÃO	26
2.1	Considerações Iniciais	26
2.2	Modelagem da Máquina de Indução	26
2.2.1	Equações da Máquina de Indução	27
2.2.2	Equações do Motor de Indução nas Variáveis $d,q,0$	30
2.2.3	Operação em Regime Permanente	34
2.2.4	Operação em Regime Transitório	37
2.3	Considerações Finais	38
3	METODOLOGIAS PARA ESTUDO DE PARTIDA DE MOTORES	39
3.1	Considerações Iniciais	39
3.2	Estudos de Partida de Motores	39
3.3	Metodologia <i>Snapshot</i>	40
3.4	Metodologia <i>Speed - Torque and Acceleration - Time</i>	41
3.5	Influência do Sistema de Geração	43
3.6	Considerações Finais	44
4	SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA	45
4.1	Considerações Iniciais	45
4.2	Descrição do Sistema de Geração da Plataforma	45
4.3	Descrição do Sistema de Distribuição	46
4.3.1	Condições Operacionais das Cargas	46
4.3.2	Cargas do Sistema	48
4.4	Barramentos e Motores Selecionados para Análise	50
4.5	Modelagem do Sistema Elétrico da Plataforma no PTW e RTDS	52
4.5.1	<i>Power Tools for Windows</i> - PTW	52
4.5.1.1	Estudo de Partida de Motores	54
4.5.1.2	Modelagem da Carga da Plataforma	55
4.5.1.3	Modelagem dos Motores de Indução	55
4.5.1.4	Sistema de Geração Síncrona	56

4.5.2	O Simulador Digital em Tempo Real - RTDS	57
4.5.2.1	Característica do RTDS para Modelagem	59
4.5.2.2	Modelagem da Carga na Plataforma	61
4.5.2.3	Modelagem dos Motores de Indução	62
4.5.2.4	Sistema de Geração Síncrona	63
4.5.2.4.1	Modelo Matemático do Controle de Excitação	65
4.5.2.4.2	Modelo Matemático do Regulador de Velocidade (Governador)	66
4.6	Considerações Finais	68
5	RESULTADOS	69
5.1	Considerações Iniciais	69
5.2	Resultados de Fluxo de Potência	69
5.2.1	Resultados na Topologia Atual “3GS”	69
5.2.2	Resultados na Topologia Alternativa de “2GS+GI+COMP”	73
5.3	Cenários Avaliados	75
5.4	Resultados de Quedas de Tensão	77
5.4.1	Topologia Atual “3GS”	77
5.4.1.1	Avaliação 3GS_1,00p.u.	77
5.4.1.2	Avaliação 3GS_1,03p.u.	78
5.4.1.3	Avaliação 3GS_1,05p.u.	80
5.4.2	Topologia Alternativa “2GS+GI+COMP”	81
5.4.2.1	Avaliação 2GS+GI+COMP_24Mvar_1,00p.u.	81
5.4.2.2	Avaliação 2GS+GI+COMP_24Mvar_1,03p.u.	83
5.4.2.3	Avaliação 2GS+GI+COMP_24Mvar_1,05p.u.	84
5.4.2.4	Avaliação 2GS+GI+COMP_32MVar_1,00p.u.	85
5.4.2.5	Avaliação 2GS+GI+COMP_32MVar_1,03p.u.	87
5.4.2.6	Avaliação 2GS+GI+COMP_32MVar_1,05p.u.	89
5.5	Análise Dinâmica dos Resultados	90
5.5.1	Resultados na Topologia Atual “3GS”	90
5.5.2	Resultados na Topologia Alternativa “2GS+GI+COMP”	96
5.6	Considerações Finais	101
6	CONCLUSÃO	103
6.1	Conclusões Gerais	103
6.2	Sugestões para Desenvolvimentos Futuros	105
	REFERÊNCIAS	106

	ANEXOS	111
	ANEXO A – GERADORES DE INDUÇÃO	112
A.1	Histórico de Aplicações	112
A.2	Principais Aplicações e Características	112
A.3	Geradores de Indução Autoexcitados	114
A.3.1	Suporte de Reativo	114
A.3.1.1	Banco de Capacitores	115
A.3.1.2	Operação em Paralelo do GS com GI sem capacitores	118
A.3.1.3	Operação em Paralelo do GS com GI com capacitores	119
	ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO GERADOR DE INDUÇÃO	120
	ANEXO C – CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DO GERADOR DE INDUÇÃO NO PTW	121
	ANEXO D – MODELO E PARÂMETROS UTILIZADOS NO GERADOR DE INDUÇÃO	122
	ANEXO E – FOLHA DE DADOS DO MOTOR DE INDUÇÃO DE 11 MW	125