



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

PEDRO HENRIQUE SANTIAGO DINIZ

**DESEMPENHO DE CONTROLADORES APLICADOS A GRUPO MOTOGERADOR
OPERANDO COM BIOGÁS DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

FORTALEZA

2020

PEDRO HENRIQUE SANTIAGO DINIZ

DESEMPENHO DE CONTROLADORES APLICADOS A GRUPO MOTOGERADOR
OPERANDO COM BIOGÁS DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de concentração: Sinais e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Jarbas Aryel Nunes da Silveira

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D612d Diniz, Pedro Henrique Santiago.

Desempenho de controladores aplicados a grupo motogerador operando com biogás de águas residuárias / Pedro Henrique Santiago Diniz. – 2020.
103 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Jarbas Aryel Nunes da Silveira.

1. Biogás. 2. Controle de Geração de Energia. 3. Lógica Fuzzy. 4. Modelagem de Grupos Motogeradores. 5. Otimização por Enxame de Partículas. I. Título.

CDD 388

PEDRO HENRIQUE SANTIAGO DINIZ

DESEMPENHO DE CONTROLADORES APLICADOS A GRUPO MOTOGERADOR
OPERANDO COM BIOGÁS DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de concentração: Sinais e Sistemas.

Aprovada em: 17/01/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jarbas Aryel Nunes da Silveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

À Deus por tamanha misericórdia para comigo.
Sei que não sou merecedor de abundantes
graças que Ele derrama constantemente em
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por toda saúde, alegria e conquistas em minha vida, como também as dificuldades, que também foram engrandecedoras para minha caminhada. Sei que não mereço tantas graças, as quais me foram concebidas apenas por misericórdia divina.

Aos meus pais, Deborah e Ricardo, pela educação e dedicação em todos os anos de minha vida, pelos sacrifícios de me dar sempre o melhor possível e seu apoio incondicional para vencer cada obstáculo.

Agradeço igualmente a minha irmã, Mariana, e minha namorada, Giovana, com quem tenho o prazer da convivência diária, por toda a cumplicidade e companheirismo entre nós, compartilhando alegrias e tristezas ao longo da vida. Aos meus avós, Dolores, Lourival e Francimar, por todo o cuidado, apoio e carinho não só comigo, mas juntamente com a minha irmã. Também sou grato por minhas tias, Danya e Morganna, e por meus primos, Rafaella, Aguiar Neto e Rebecca, por ajudarem na minha formação pessoal.

A todos os docentes da Universidade Federal do Ceará, responsáveis pela conclusão desta etapa da minha vida, compartilhando a cada dia os seus conhecimentos com todos os alunos. Especialmente ao professor Jarbas Aryel Nunes da Silveira, pela excelente e cuidadosa orientação, bem como os professores Giovanni Cordeiro Barroso e José Renato de Brito Sousa pela presença na composição da banca de defesa do presente trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Para construir um mundo, outro mundo tem que se desmoronar-se interiormente. E não há granadas que arranquem pela raiz uma edificação; os edifícios humanos morrem pedra por pedra”

(Inácio Larranãga)

RESUMO

O desenvolvimento de unidades produtoras de energia a partir de fontes de Energia Renovável (ER) é um desafio global real e moderno; portanto, o biogás aplicado em Motores de Combustão Interna (MCI) apresenta-se como uma excelente alternativa para essa tarefa desafiadora. O biogás pode ser obtido a partir de diferentes fontes e a sua composição varia de acordo com o tipo de biomassa utilizada, mas a maioria desse combustível é composta de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Essa variação na composição implica em mudança no Poder Calorífico Inferior (PCI), o qual influencia no aproveitamento do biogás em sistemas de geração de energia. No entanto, apesar desse combustível ser uma boa alternativa, ainda há dificuldades de se encontrar no mercado controlador capaz de manter a qualidade da energia gerada segundo os requisitos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Nesse contexto, essa dissertação apresenta quatro esquemas de controle para garantir a qualidade da energia de um grupo gerador operando com biogás proveniente do tratamento de águas residuárias. Para isso, foi desenvolvido um modelo matemático para representar os fenômenos mecânicos e elétricos envolvidos no processo de geração. Tal modelo foi linearizado por expansão de série de Taylor a fim de otimizar os parâmetros dos controladores Proporcionais, Integrais e Derivativos (PIDs) utilizados nos quatro esquemas de controle estudados. As técnicas de sintonia dos ganhos do PID foram duas: a primeira utilizando a ferramenta *tune* do ambiente Simulink do MATLAB; a segunda aplicando o método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO). O desempenho de cada sistema de controle foi avaliado sob três cenários de simulação: variação de carga; variação da composição de biogás; variação de carga e da composição de biogás simultaneamente. A partir dos testes realizados no ambiente Simulink do MATLAB, constatou-se que o melhor esquema de controle estudado é o que foi intitulado DOIS-PIDS, o qual é constituído de dois controladores PIDs otimizados pelo PSO operando em paralelo sendo comutados por controlador baseado em Lógica Fuzzy (LF). O DOIS-PIDS permite à unidade geradora permanecer conectada à rede sem pontos de desconexão em todos os três cenários de simulação, pois a frequência e a tensão permanecem dentro dos limites impostos pela ANEEL.

Palavras-chave: Biogás. Controle de Geração de Energia. Lógica Fuzzy. Modelagem de Grupos Motogeradores. Otimização por Enxame de Partículas.

ABSTRACT

The improvement of Renewable Energy Resources (RERs) based power plants is a real and modern global challenge, therefore, biogas applied in reciprocating Internal Combustion Engines (ICE) is a good alternative to this challenging task. Biogas can be obtained from various sources and its composition varies according to the biomass type used in its production, but the majority of this fuel is composed of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). This composition variation implies a change in the Lower Heating Value (LHV), it affects the use of biogas in energy generation systems. However, although this fuel is a good alternative, it is difficult to find in the market a reliable control to hold the power quality following National Energy Agency Electrical (ANEEL) requirements. In such a context, this dissertation presents a four control schemes to assure the power quality by a generator set operating with biogas from wastewater treatment. For this, a mathematical model was developed to represent the mechanical and electrical phenomena involved in the generation process. This model is linearized by expanding the Taylor series in order to optimize the parameters of the Proportional, Integral and Derivative (PIDs) controllers used in all control schemes studied. Two methods for PID tuning are used: the *tune* from Simulink environment in MATLAB; the Particle Swarm Optimization (PSO). The performance of each control system is evaluated under three simulation scenarios: load variation; biogas composition variation; load and biogas composition variation simultaneously. The tests in Simulink/MATLAB show that the best control scheme is the titled TWO-PIDS, it is composed by two PID controllers optimized by PSO and they operate in parallel and they are switched by a Fuzzy Logic controller. TWO-PIDS enables the power plant remain connected to the grid in all three simulation scenarios, because power frequency and voltage remained within limits imposed by ANEEL.

Keywords: Biogas. Fuzzy Logic. Generator Set Modelling. Particle Swarm Optimization. Power Generation Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – 10 países mais consumidores de energia elétrica	14
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira em 2018	15
Figura 3 – Ciclo de Trabalho de Motor de Combustão Interna (MCI) de quatro tempos ..	21
Figura 4 – Componentes básicos de um MCI	22
Figura 5 – Curvas de consumo, torque e potência de um MCI	23
Figura 6 – Vista esquemática de um Gerador Síncrono (GS) monofásico com um único enrolamento e dois polos	24
Figura 7 – Diagrama de fluxo de potência de um gerador Corrente Alternada (CA) trifásico	25
Figura 8 – Transformação do sistema de referência de um GS de 3 polos de abc para dq	26
Figura 9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta	28
Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada	29
Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema de controle <i>feedforward</i>	29
Figura 12 – Critérios de desempenho utilizados	30
Figura 13 – Exemplo de diagrama de Bode	31
Figura 14 – Sistema com realimentação negativa	32
Figura 15 – Exemplo de diagrama de Nyquist	33
Figura 16 – Margens de ganho e de fase de sistemas estáveis e instáveis	34
Figura 17 – Pertinência clássica	36
Figura 18 – Pertinência fuzzy	37
Figura 19 – Desenho esquemático de um sistema fuzzy	38
Figura 20 – Fluxograma do algoritmo Otimização por Enxame de Partículas ou <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	41
Figura 21 – Funcionamento do reator UASB	43
Figura 22 – Circuito equivalente do eixo d do GS	58

Figura 23 – Circuito equivalente do eixo q do GS	58
Figura 24 – Modelagem do grupo motogerador	60
Figura 25 – Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)	64
Figura 26 – Controladores PID e baseado em Lógica Fuzzy (LF) operando paralelamente	65
Figura 27 – Controlador fuzzy utilizado no PID-FUZZY-PARALELO	66
Figura 28 – Controlador PID com os termos atualizados em tempo real pela LF	67
Figura 29 – Controlador fuzzy utilizado no PID-FUZZY-CASCATA	67
Figura 30 – Controladores PID operando paralelamente sendo comutados pela LF	68
Figura 31 – Controlador fuzzy utilizado no DOIS-PIDS	69
Figura 32 – Cenário de variação de carga no VAR-CARGA	70
Figura 33 – Cenário de variação da composição do biogás no VAR-BIO	71
Figura 34 – Cenário de variação da composição do biogás no VAR-CARGA-BIO	72
Figura 35 – Modelo implementado no ambiente Simulink do MATLAB	75
Figura 36 – Margem de Ganho do Diagrama de Bode	82
Figura 37 – Margem de Fase do Diagrama de Bode	82
Figura 38 – Diagrama de Nyquist para o sistema sem controle	83
Figura 39 – Diagrama de Nyquist para o sistema controlado pelo PID	83
Figura 40 – Frequência elétrica para o controlador PID-CONVENCIONAL sob o cenário VAR-CARGA-BIO	87
Figura 41 – Frequência elétrica para o controlador PID-FUZZY-PARALELO sob o cenário VAR-CARGA-BIO	88
Figura 42 – Frequência elétrica para o controlador PID-FUZZY-CASCATA sob o cenário VAR-CARGA-BIO	89
Figura 43 – Frequência elétrica para o controlador DOIS-PIDS sob o cenário de variação VAR-CARGA-BIO	89
Figura 44 – Tensão elétrica sob o cenário VAR-CARGA-BIO	91

Figura 45 – Tempo de acomodação versus variação de carga	92
Figura 46 – <i>Overshoot</i> versus variação de carga	92
Figura 47 – <i>Undershoot</i> versus variação de carga	93
Figura 48 – Tempo de acomodação versus variação da composição de biogás	94
Figura 49 – <i>Overshoot</i> versus variação da composição de biogás	94
Figura 50 – <i>Undershoot</i> versus variação da composição de biogás	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalho publicado durante o mestrado	19
Tabela 2 – Terminologia da área de controle de sistemas	28
Tabela 3 – Composição do biogás proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) com o Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente ou Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)	43
Tabela 4 – Resumo dos trabalhos relacionados	48
Tabela 5 – Constantes intermediárias	62
Tabela 6 – Especificações técnicas e parâmetros de operação	74
Tabela 7 – Limites de variação da frequência	76
Tabela 8 – Limites de variação da tensão	76
Tabela 9 – Valores dos ganhos do controlador PID	78
Tabela 10 – Regiões lineares do controlador baseado em LF utilizado no PID-FUZZYPARALELO	78
Tabela 11 – Regiões lineares do controlador baseado em LF do PID-FUZZY-CASCATA	80
Tabela 12 – Regiões lineares do controlador baseado em LF utilizado no DOIS-PIDS ..	81
Tabela 13 – Margens de Ganho e de Fase	84
Tabela 14 – Comportamento da frequência para o cenário VAR-CARGA	85
Tabela 15 – Comportamento da tensão para o cenário VAR-CARGA	85
Tabela 16 – Comportamento da frequência para o cenário VAR-BIO	86
Tabela 17 – Comportamento da tensão para o cenário VAR-BIO	86
Tabela 18 – Comportamento da frequência para o cenário VAR-CARGA-BIO	90
Tabela 19 – Comportamento da tensão para o cenário VAR-CARGA-BIO	90
Tabela 20 – Resumo dos limites operacionais dos sistemas de controle	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	Alta Performance
CA	Corrente Alternada
CAG	Controlador Automático de Geração
CC	Corrente Contínua
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FT	Função de Transferência
GN	Gás Natural
GS	Gerador Síncrono
IA	Inteligência Artificial
IAE	Integral do Erro Absoluto ou <i>Integral Absolute Error</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos ou <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISE	Integral do Erro Quadrático ou <i>Integral Square Error</i>
ITAE	Integral do Erro Absoluto Multiplicado pelo Tempo ou <i>Integral Time Absolute Error</i>
ITSE	Integral do Erro Quadrático Multiplicado pelo Tempo ou <i>Integral Time Square Error</i>
LF	Lógica Fuzzy
MCI	Motor de Combustão Interna
MF	Margem de Fase
MG	Margem de Ganho
OS	Sobressinal ou <i>Overshoot</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PES	Sociedade de Potência e Energia ou <i>Power and Energy Society</i>
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PSO	Otimização por Enxame de Partículas ou <i>Particle Swarm Optimization</i>
SPD	Semi Plano Direito
TL	Tensão de Leitura

TR	Tensão de Referência
TS	Takagi-Sugeno
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente ou <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
US	Subsinal ou <i>Undershoot</i>
VC	Volume da Câmara
VD	Volume Deslocado
VW	Volkswagen
ZN	Ziegler Nichols

LISTA DE SÍMBOLOS

$\left(\frac{A}{F}\right)$	Razão Ar-Combustível (<i>Air-Fuel</i>)
A_e	Área efetiva da válvula borboleta
B	Amortecimento do grupo motogerador
c_1	Componente de aceleração (ou taxa de aprendizado) cognitivo
c_2	Componente de aceleração (ou taxa de aprendizado) social
C_d	Coefficiente de descarga da válvula borboleta
C_C	Composição percentual de carbono no biogas
C_H	Composição percentual de hidrogênio no biogas
C_O	Composição percentual de oxigênio no biogas
D	Diâmetro da válvula borboleta
$e(t)$	Erro entre a variável controlada e o valor almejado (setpoint)
f	Função não linear de p_m e p_j
f_a	Variável referente ao eixo estacionário a
f_b	Variável referente ao eixo estacionário b
f_c	Variável referente ao eixo estacionário c
f_d	Variável referente ao eixo do rotor d
f_q	Variável referente ao eixo do rotor q
$F(s)$	Função de transferência
g	Número do componente ($1 \leq g \leq m$)
g_{best}	Melhor solução encontrada por todas as partículas (ou solução global)
$G(s)$	Função de transferência
$G_{PID}(s)$	Função de transferência do controlador PID
H	Poder Calorífico Inferior (PCI)
$H(s)$	Função de transferência da malha de realimentação
i	Número da iteração
i_d	Corrente terminal da armadura do eixo d
i_{fd}	Corrente terminal do enrolamento de campo
i_{kd}	Corrente de enrolamento do amortecedor do eixo d
i_{kq}	Corrente de enrolamento do amortecedor do eixo q
i_q	Corrente terminal da armadura do eixo q
j	Número da partícula ($1 \leq j \leq n$)

J	Inércia do grupo motogerador
K_P	Ganho proporcional
K_I	Ganho integral
K_D	Ganho derivativo
L_{ls}	Indutância de fuga da fase da armadura
L_{lfd}	Indutância de fuga no enrolamento de campo
L_{lkd}	Indutância de vazamento do enrolamento do amortecedor do eixo d
L_{lkq}	Indutância de vazamento do enrolamento do amortecedor do eixo q
L_{md}	Indutância de acoplamento do eixo d
L_{mq}	Indutância de acoplamento do eixo q
m	Número de componentes dos vetores v e x
\dot{m}_{in}	Fluxo mássico do ar de admissão
\dot{m}_{cyl}	Fluxo mássico do ar para os cilindros
\dot{m}_f	Fluxo mássico de combustível
n	Número de partículas
N	Número de revoluções por ciclo termodinâmico
N_v	Número de voltas envolvendo no sentido horário o ponto crítico (-1;0) no plano s
$pbest_i$	Melhor solução encontrada pela partícula i (ou solução pessoal)
p_{cr}	Pressão crítica
P_e	Potência elétrica
P_j	Pressão à jusante da válvula borboleta
P_m	Pressão à montante da válvula borboleta
P	Número de polos de $G(s)H(s)$ no SPD
R	Constante ideal dos gases
r_1 e r_2	Números aleatórios distribuídos uniformemente no intervalo de 0 a 1
r_c	Razão de compressão do motor
R_{fd}	Resistência de enrolamento de campo
R_{kd}	Resistência de enrolamento de amortecimento do eixo d
R_{kq}	Resistência de enrolamento de amortecimento do eixo q
R_s	Resistência da fase da armadura
t	Tempo
t_r	Tempo de subida (<i>rising time</i>)
t_s	Tempo de acomodação (<i>settling time</i>)

T	Transformada de Park
T_c	Torque gerado pela combustão
T_f	Torque de fricção
T_l	Torque de carga (<i>load</i>)
T_m	Torque do motor
T_s	Torque de sucção
v_i	Velocidade da partícula i
V	Volume do coletor de admissão
V_d	Volume deslocado (soma dos volumes dos cilindros)
v_d	Tensão terminal da armadura do eixo d
v_{fd}	Tensão terminal do enrolamento de campo
v_q	Tensão terminal da armadura do eixo q
W	Componente de ponderação de inércia
x_j	Posição da partícula j
Z	Número de zeros de $1+G(s)H(s)$ no SPD
α	Ângulo de abertura da válvula borboleta
β_i	Parâmetros experimentais para estimar C_d
γ	Relação entre os calores específicos do ar à pressão e a volume constants
δ_i	Parâmetros experimentais para estimar h_v
ε	Força eletromotriz (FEM)
η_c	Eficiência da combustão
η_e	Eficiência elétrica (produção de energia a partir da energia mecânica)
η_{ign}	Eficiência de ignição
η_v	Eficiência volumétrica
θ	Posição angular do rotor
θ_m	Temperatura à montante da válvula borboleta
θ_j	Temperatura à jusante da válvula borboleta
ϕ_B	Fluxo magnético através de uma única espira
ψ_d	Fluxo total da armadura no eixo d
ψ_q	Fluxo total da armadura no eixo q
ω	Rotação do motor

SUMÁRIO

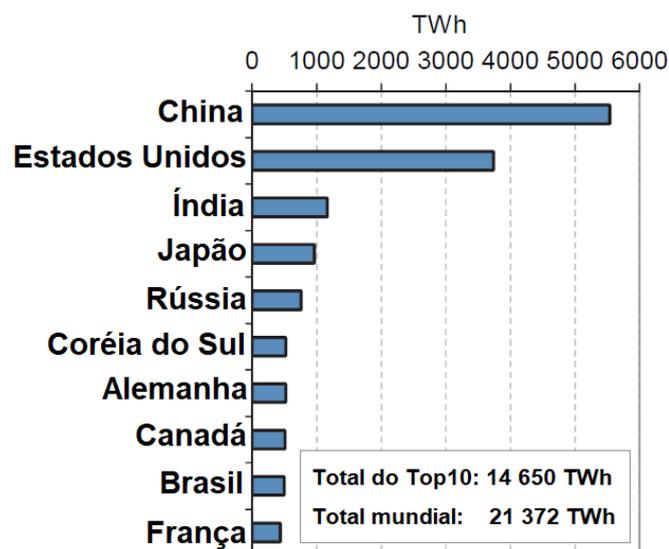
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	17
1.2	Estrutura do Trabalho	18
1.3	Produção Intelectual	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Motor de Combustão Interna	20
2.2	Gerador Síncrono	23
2.3	Sistemas de Controle	27
2.3.1	<i>Crítérios de Desempenho</i>	30
2.3.2	<i>Diagramas de Bode</i>	31
2.3.3	<i>Diagrama de Nyquist</i>	32
2.4	Controlador Proporcional Integral e Derivativo	34
2.5	Inteligência Artificial	36
2.5.1	<i>Lógica Fuzzy</i>	36
2.5.2	<i>Otimização por Enxame de Partículas</i>	38
2.6	Biogás de Águas Residuárias	41
3	TRABACHOS RELACIONADOS	44
3.1	Aplicação de Lógica Fuzzy em controle de grupo motogerador	44
3.2	Aplicação de Lógica Fuzzy em controle de grupo motogerador	45
3.3	Aplicação de Inteligência Artificial em controle de grupo motogerador	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	Modelagem do Grupo Motogerador	49
4.1.1	<i>Válvula Borboleta</i>	49
4.1.2	<i>Coletor de Admissão</i>	51
4.1.3	<i>Cilindros</i>	51
4.1.4	<i>Torque do Motor de Combustão Interna</i>	52
4.1.5	<i>Dinâmica do Movimento Rotacional</i>	54
4.1.6	<i>Modelagem</i>	54
4.1.7	<i>Energia Produzida</i>	55
4.2	Linearização do Modelo	58
4.3	Ajuste do Controlador Proporcional, Integral e Derivativo	62

4.4	Sistemas de Controle Propostos	63
4.4.1	<i>Controlador 1: PID-CONVENCIONAL</i>	64
4.4.2	<i>Controlador 2: PID-FUZZY-PARALELO</i>	65
4.4.3	<i>Controlador 3: PID-FUZZY-CASCATA</i>	66
4.4.4	<i>Controlador 4: DOIS-PIDS</i>	67
4.5	Cenários Simulados	68
4.5.1	<i>Cenário de Variação de Carga: VAR-CARGA</i>	69
4.5.2	<i>Cenário de Variação da Composição do Biogás: VAR-BIO</i>	70
4.5.3	<i>Cenário de Variação de Carga e da Composição do Biogás: VAR-CARGA- BIO</i>	71
4.6	Estudo de Caso	72
4.7	Variáveis de Resposta	73
5	RESULTADOS	77
5.1	Valores dos Ganhos do Controlador Proporcional, Integral e Derivativo ...	77
5.2	Regiões Lineares do Controlador Baseado em Lógica Fuzzy	77
5.3	Diagramas de Bode e de Nyquist	79
5.4	<i>Cenário de Variação de Carga: VAR-CARGA</i>	83
5.5	<i>Cenário de Variação da Composição do Biogás: VAR-BIO</i>	85
5.6	<i>Cenário de Variação de Carga e da Composição do Biogás ao mesmo tempo: VAR-CARGA-BIO</i>	86
5.7	Limites Operacionais dos Sistemas de Controle	89
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por eletricidade aumenta a cada ano e está sendo intensificada ainda mais devido aos avanços da tecnologia. O consumo mundial de energia elétrica de 1974 até 2017 cresceu em média 3,3 % ao ano, alcançando um patamar de 21.372 TWh (IEA, 2019a). Em 2017, o Brasil foi o nono país que mais consumiu energia elétrica, como mostrado na Figura 1. Portanto, produzir energia elétrica de maneira eficiente, confiável e acessível é um desafio mundial, real e moderno.

Figura 1 – 10 países mais consumidores de energia elétrica

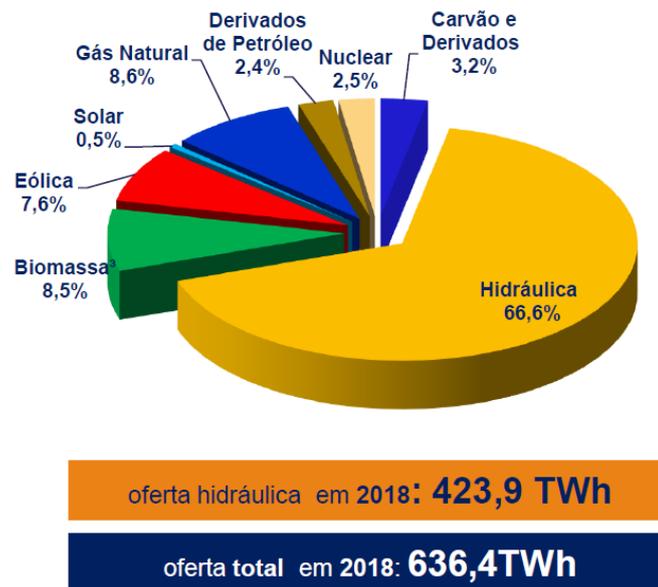


Fonte: IEA (2019a). Adaptado pelo autor.

Essa questão, aliada ao aquecimento global, às mudanças climáticas e à necessidade de gerar menos impactos ambientais, exige plantas de energias robustas a partir de fontes renováveis, aumentando, assim, a confiabilidade e disponibilidade da rede, além de mitigar os impactos ambientais causados pelos métodos de produção de energia convencional (ZHANG; JIANG, 2008).

A maior parte da energia elétrica produzida no Brasil já é de fontes renováveis de energia, sendo a maior parte proveniente das hidrelétricas, as quais responderam por 66,6 % da matriz elétrica brasileira em 2018, como mostrado na Figura 2 (MME, 2019). Inclusive, em 2017, o Brasil foi o terceiro maior produtor de energia elétrica a partir de hidrelétricas (IEA, 2019b).

Figura 2 – Matriz elétrica brasileira em 2018



Fonte: MME (2019). Adaptado pelo autor.

Entretanto, ainda há no País fontes renováveis de energia as quais possuem considerável potencial, mas participação modesta na matriz energética, como é o caso do biogás (MME, 2016). Estima-se que o Brasil tem potencial de suprir 24 % de sua demanda energética a partir de biogás produzido de saneamento e da indústria agropecuária (ABIOGAS, 2016).

O biogás é um combustível alternativo produzido a partir da digestão anaeróbica (em um ambiente com ausência de oxigênio) de matéria orgânica. Esse processo, que também é conhecido como metanização, pode ser obtido de várias fontes, como resíduos de alimentos, tratamento de águas residuárias e biomassa, em geral, presente no setor agroindustrial (MME, 2016).

Esse gás tem sido usado como uma alternativa aos combustíveis fósseis, como forma de reduzir os efeitos nocivos da poluição no meio ambiente e diversificar a matriz energética mundial. No entanto, diferentemente do Gás Natural, o biogás possui uma composição química altamente variável, que afeta diretamente as características de combustão desse combustível (SPEIGHT, 2008; OLSSON; FALLDE, 2015; KAN *et al.*, 2018).

Sua composição é variável, principalmente devido ao tipo de biomassa utilizada em sua produção, mas a maioria do biogás é composta de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (RAZBANI; MIRZAMOHAMMAD; ASSADI, 2011). O biogás bruto das águas residuárias normalmente consiste em CH_4 (60 - 65 mol %), CO_2 (35 - 40 mol %), H_2S (0,1 - 0,5 mol %) e

vestígios de outros gases. Desse modo, o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás bruto varia de $1,86 \times 10^4$ a $2,42 \times 10^4$, enquanto o PCI do metano puro é $3,57 \times 10^4$ kJ/m³ (STERN *et al.*, 1998).

Entretanto, o uso direto de biogás bruto não é apropriado, não apenas devido à alta concentração de CO₂, mas também devido a presença de impurezas, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), que é altamente corrosivo, cujo efeito é potencializado pela presença de umidade (SCHOMAKER *et al.*, 2000). Outros constituintes minoritários do biogás de águas residuárias são água, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, mercaptanos, hidrocarbonetos halogenados e siloxanos (EKLUND *et al.*, 1998).

A purificação do biogás consiste na remoção desses gases para aumentar a concentração de metano. Assim, o valor do PCI desse combustível renovável aumenta à medida que os compostos nocivos, como o sulfeto de hidrogênio, e os compostos inertes, como o dióxido de carbono, são removidos. A concentração de metano pode ser aumentada para valores superiores ao Gás Natural (GN) e, nesse caso, o biogás se torna biometano (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). Essa variabilidade de composição é um desafio quando o objetivo é a produção de eletricidade por combustão de biogás.

Diante desse contexto, objetiva-se nesta dissertação propor sistemas de controle que garantam boa qualidade da energia produzida a partir da utilização do biogás em grupo motogerador, o qual é constituído de um Motor de Combustão Interna (MCI) e de um Gerador Síncrono (GS). O MCI transforma a energia química do combustível em energia mecânica, a qual é convertida em energia elétrica pelo GS (BEST *et al.*, 2007). O estudo do desempenho do grupo motogerador a biogás faz parte de um projeto maior que visa a geração de energia ambientalmente sustentável a partir do biogás de ETE.

O uso de grupos motogeradores para geração de energia elétrica é uma prática comum na indústria, todavia, normalmente, utiliza o Diesel como combustível em motores de ignição por compressão (ciclo Diesel). Como alternativa para o uso do biogás, um grupo motogerador à Diesel pode ser convertido para o ciclo dual, no qual há apenas a substituição parcial do combustível Diesel pelo biogás. Entretanto, o biogás pode ser aplicado em motores de combustão por centelha (ciclo Otto), em que o motor pode ser convertido para operar somente com biogás, havendo uma substituição total do combustível (em geral, gasolina) (NATHAN; MALLIKARJUNA; RAMESH, 2010).

Em boa parte dos casos, grupos motogeradores possuem um controlador PID para regular a velocidade de rotação do eixo de acordo com a carga exigida pelo GS. Em outras palavras, à medida que há um aumento na demanda de carga pela rede elétrica, o GS requer mais energia mecânica do MCI, de modo que a válvula borboleta abre mais para aumentar a vazão de ar e combustível utilizados a fim de produzir mais energia (requerida pela rede) com a mesma qualidade.

No entanto, o projeto de um sistema de controle adequado para um grupo motogerador a biogás é uma tarefa desafiadora, porque o processo de geração de energia usando esse equipamento possui uma grande variedade de pontos de operação, potência variável no lado da carga, não linearidades no processo de combustão e incerteza dos parâmetros operacionais (XU *et al.*, 2018). Assim, para otimizar a geração de energia a partir do biogás, são propostos três controladores diferentes do PID para regular a qualidade da frequência e tensão da energia produzida por um grupo gerador a biogás.

1.1 Objetivos

Nesta dissertação o objetivo principal é propor estratégias de controle para regulação de grupo motogerador a biogás, de modo que a energia produzida tenha boa qualidade, a fim de ser injetada na rede elétrica. Para tal, alguns objetivos específicos destacam-se:

- Modelar o grupo motogerador e seu comportamento dinâmico para diferentes condições de operação;
- Linearizar o modelo obtido a fim de facilitar a otimização de técnicas de controle;
- Propor arquiteturas de controladores a fim de regular o sistema;
- Aprimorar, por meio de técnicas de otimização, as constantes dos controladores PID utilizados;
- Estudar o comportamento da composição do biogás proveniente de ETE;
- Avaliar o desempenho das arquiteturas de controle.

1.2 Estrutura do trabalho

Este capítulo contextualiza a necessidade crescente de geração de energia de maneira confiável e proveniente de fontes renováveis, além de introduzir o problema de geração de energia a partir de motogerador operando com biogás de águas residuárias.

O Capítulo 2 descreve os principais conceitos utilizados nessa dissertação, os quais abrangem diversas áreas como a de MCI, GS, sistemas de controle, controlador PID e Inteligência Artificial (IA).

Uma breve revisão literária a respeito dos principais aspectos dessa dissertação é apresentada no Capítulo 3, ressaltando as principais contribuições dessa dissertação. Os trabalhos relacionados são divididos em três domínios do conhecimento: Modelagem de MCI; aplicação de LF em controle de grupo motogerador; aplicação de em controle de grupo motogerador.

O Capítulo 4 expõe a metodologia utilizada no trabalho. Para tal, são detalhados: a modelagem do motor e do GS do grupo motogerador; o processo de linearização do modelo; os métodos de ajuste dos controles PID utilizados; os quatro sistemas de controle estudados nesta dissertação; os cenários de simulação considerados.

Os resultados de simulação, que dão embasamento às conclusões deste trabalho, são apresentados no Capítulo 5. É exposto uma análise do grupo motogerador com e sem controle por meio dos diagramas de Bode e de Nyquist. Também é analisado o desempenho de cada um dos quatro controladores para os cenários de simulação. Por fim, é definido os limites operacionais de cada sistema de controle, isto é, quanto de variação abrupta (variação degrau) de carga ou da composição do biogás pode haver sem que a energia gerada pelo motogerador fique fora dos parâmetros da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais desta dissertação, bem como os trabalhos futuros que devem ser desenvolvidos.

1.3 Produção intelectual

Durante o mestrado foi publicado trabalho em congresso de nível internacional conforme descrito na Tabela 1. O congresso foi realizado em setembro de 2019 e foi organizado pela Sociedade de Potência e Energia ou *Power and Energy Society* (PES), a qual faz parte do

Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos ou *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE).

Tabela 1 – Trabalho publicado durante o mestrado

Trabalho	Novel Composed Speed Controller Applied to Biogas Generator Set;
Conferência	IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America 2019;
Relação com a dissertação	Publicação contendo os resultados preliminares. Este trabalho estuda os primeiros dois controladores abordados nessa dissertação (PID-CONVENCIONAL e PID-FUZZYPARALELO) sob dois cenários de simulação: cenário de variação de carga abrupta com composição do biogás constante; e cenário de variação abrupta da composição do biogás com carga constante

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos utilizados referentes à área de Motor de Combustão Interna (MCI), Gerador Síncrono (GS), sistemas de controle, controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) e Inteligência Artificial (IA).

2.1 Motor de Combustão Interna

MCI são constituídos com o objetivo de transformar a energia química de um combustível em energia mecânica na forma de trabalho, por meio de um processo de combustão dentro da própria máquina. Os dois principais tipos de motores são o de ciclo Otto, que precisam de uma fonte de calor para iniciar o processo de combustão (ignição por centelha) e o de ciclo Diesel, o qual começa o processo de queima do combustível devido à alta pressão no interior da câmara de combustão (ignição por compressão) (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2015).

Além dessa classificação conforme o mecanismo de ignição, os MCI podem ser agrupados em diversas categorias, como ciclo de trabalho, *design* básico do motor, configuração da câmara de combustão, método de resfriamento, entre outros (HEYWOOD *et al.*, 1988).

Particularmente, o motor de ciclo Otto, o qual é analisado neste estudo, é vantajoso para aplicações que exigem potência até aproximadamente 225 kW ou 300 HP (MORAN *et al.*, 2010), e pode ser adaptado para operação com outros combustíveis além daquele designado pelo fabricante, como GN e biogás (AYARZA *et al.*, 2008).

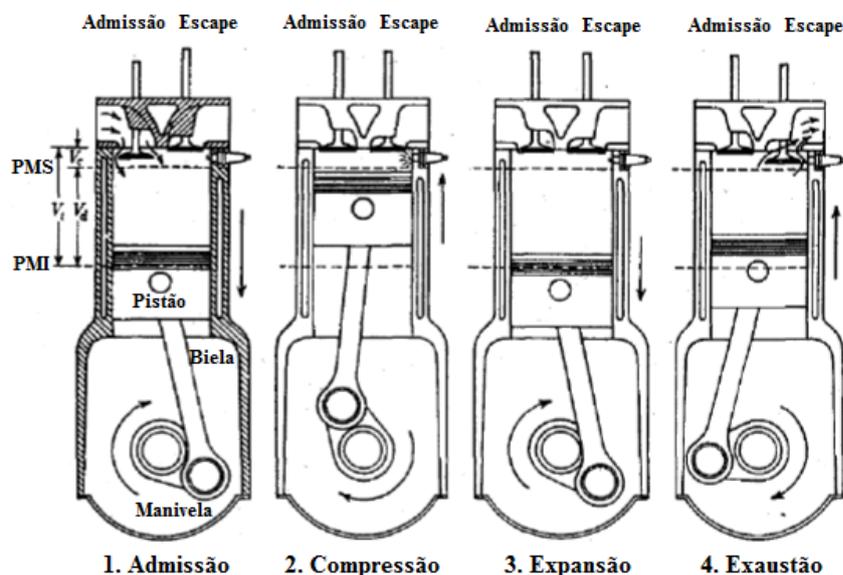
A maior parte dos MCI opera segundo o ciclo de trabalho de quatro tempos, no qual o pistão executa quatro cursos distintos (Figura 3) dentro do cilindro para cada duas rotações do eixo de manivela. Essas etapas se repetem durante o funcionamento do equipamento, realizando o seguinte ciclo teórico (MORAN *et al.*, 2010):

1. Admissão. Com a válvula de admissão aberta e a de exaustão fechada, o pistão aspira mistura fresca de ar e combustível para dentro do cilindro, executando um curso do Ponto Morto Superior (PMS) ao Ponto Morto Inferior (PMI), que corresponde ao Volume Deslocado (VD) ou a cilindrada;
2. Compressão. Com ambas as válvulas fechadas, o pistão comprime a mistura de ar e combustível dentro do cilindro do PMI até o PMS, ficando a mistura sob alta pressão contida apenas no Volume da Câmara (VC) ou volume morto. Segundo Moran *et al.*

(2010), os motores de ignição por centelha possuem valores típicos de taxa de compressão entre 8 e 12;

3. Expansão ou Explosão. Também é denominado curso de potência. A vela de ignição lança uma centelha elétrica no interior da câmara de combustão e dá início ao processo de queima, o qual libera uma grande quantidade de energia, impulsionando o pistão ao PMI. Segundo Heywood *et al.* (1988), o trabalho realizado no pistão (sinal positivo) nesse tempo é cerca de cinco vezes maior que o trabalho do pistão (sinal negativo) no curso de compressão;
4. Exaustão ou Escape. Com a válvula de escape aberta e a de admissão fechada, os produtos da combustão saem do cilindro, primeiramente, porque a pressão no interior da câmara é substancialmente maior que a pressão externa e, em segundo, devido ao movimento do pistão em direção ao PMS.

Figura 3 – Ciclo de Trabalho de MCI de quatro tempos



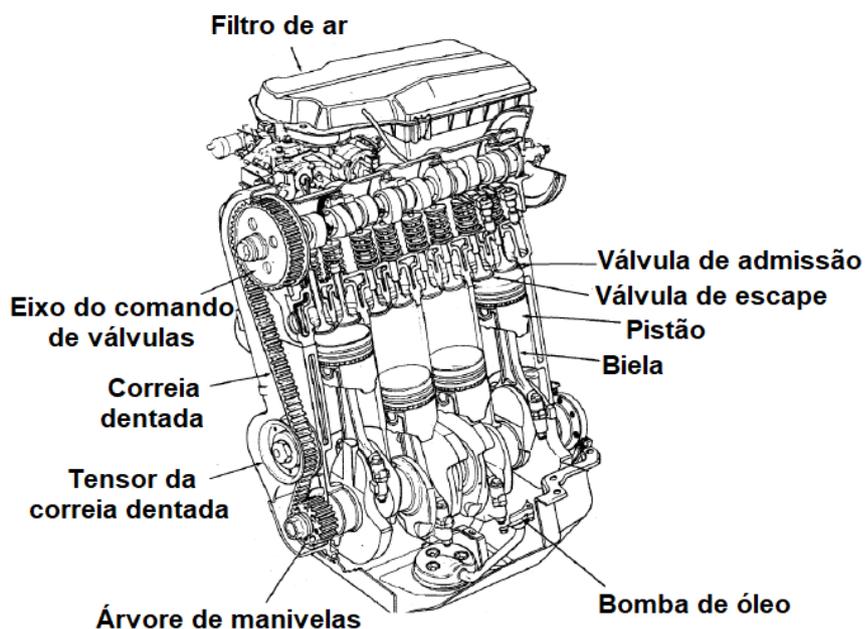
Fonte: Heywood *et al.* (1988). Adaptado pelo autor.

Vale ressaltar que também existe MCI que funciona com o ciclo de trabalho denominado dois tempos, que foi concebido para proporcionar um projeto de válvulas mais simples e maior potência de saída para um motor de mesmo tamanho. Entretanto, devido ao alto consumo de óleo, menor rendimento e outros fatores, esse ciclo de trabalho, em geral, só é utilizado em MCI de grande porte, enquanto os de médio e pequeno são, normalmente, de quatro tempos (HEYWOOD *et al.*, 1988).

Além dos componentes do MCI já citados como, pistão, biela, manivela há outros elementos básicos, ilustrados na Figura 4. Fundamentalmente, o motor é dividido em três partes: cárter (que é um reservatório de óleo lubrificante), bloco (onde estão os cilindros) e cabeçote (o qual contém as válvulas de admissão e escape e vela de ignição).

O ar admitido pelo MCI passa pelo filtro e chega ao coletor de admissão, onde a válvula borboleta dosa o fluxo de ar que entra a partir do seu grau de abertura, então o ar mistura-se com o combustível por meio de bicos injetores, os quais são controlados pela Unidade de Controle Eletrônico do motor e, assim, a mistura ar-combustível realiza o ciclo termodinâmico dentro dos cilindros conforme já explicado anteriormente. O trabalho realizado pelo MCI (resultante de vários ciclos termodinâmicos) é transmitido ao GS pelo eixo de manivelas ou virabrequim (MORAN *et al.*, 2010).

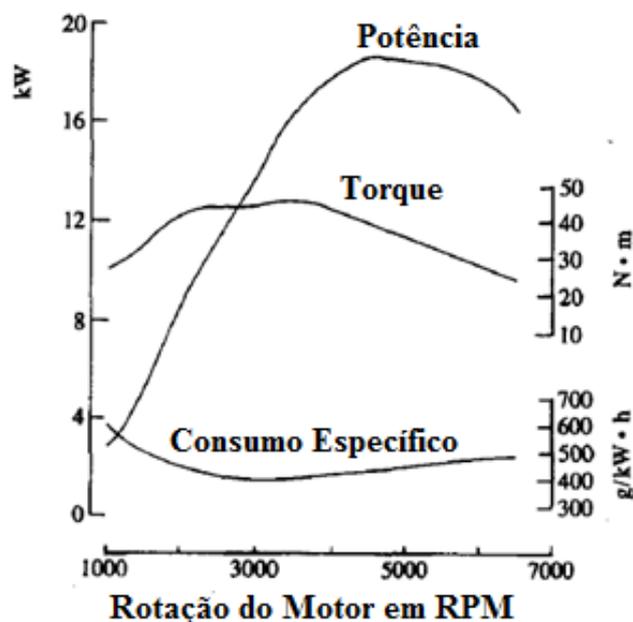
Figura 4 – Componentes básicos de um MCI



Fonte: Heywood *et al.* (1988). Adaptado pelo autor.

Por fim, vale destacar as curvas de desempenho do MCI (Figura 5), as quais são três: torque, potência e consumo específico. A análise de tais curvas é fundamental a fim de definir a rotação de operação do motor dependendo da sua aplicação. No caso da utilização de MCI em grupos geradores, a velocidade angular de funcionamento deve ser aquela com maior torque (SOUZA, 2016).

Figura 5 – Curvas de consumo, torque e potência de um MCI



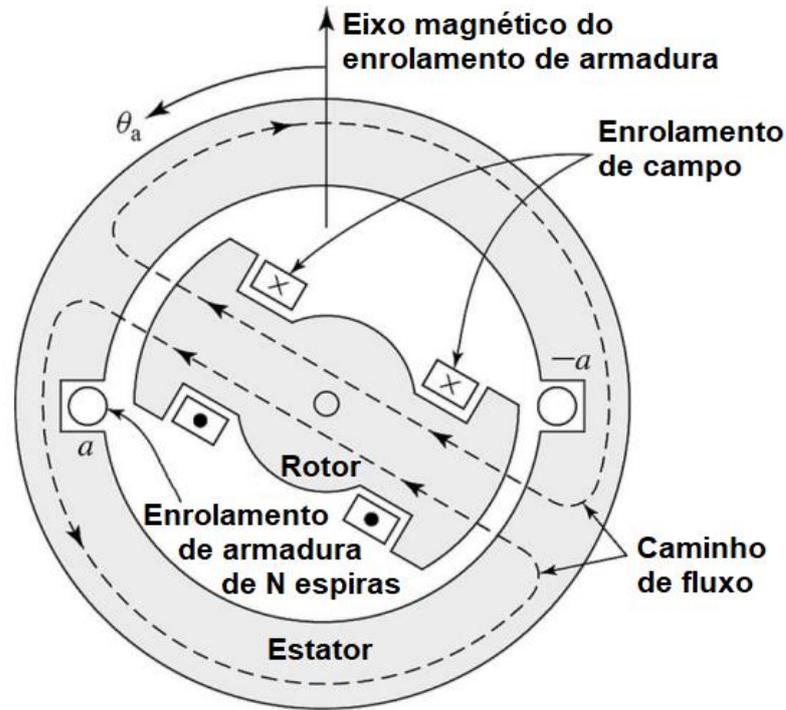
Fonte: Heywood et al. (1988). Adaptado pelo autor.

2.2 Gerador Síncrono

Também chamado de alternador síncrono, GS é uma máquina elétrica em que a frequência da corrente de sua armadura é proporcional à rotação do equipamento, a qual é definida pela máquina primária. O GS é utilizado para converter energia mecânica em energia elétrica de Corrente Alternada (CA) (CHAPMAN, 2013). Esses equipamentos podem operar em paralelo, de modo que os sistemas de fornecimento de energia elétrica dos países industrializados contêm centenas deles operando em paralelo (UMANS; FITZGERALD; KINGSLEY, 2013).

Os componentes básicos de um gerador síncrono (Figura 6) são: (1) rotor ou campo - parte rotativa, constituída por lâminas de um material ferromagnético envolvidas por um número par de enrolamentos de condutores de cobre, que tem como finalidade produzir um campo magnético constante para induzir tensões no enrolamento do estator; (2) estator ou armadura - peça fixa, também composta por lâminas de um material ferromagnético envoltas por um conjunto de enrolamentos, montada em volta do rotor de modo que este possa girar no seu interior (NASCIMENTO JUNIOR, 2006).

Figura 6 – Vista esquemática de um GS monofásico com um único enrolamento e dois polos.



Fonte: Umans, Fitzgerald e Kingsley (2013).

Em geral, o seu funcionamento pode ser resumido como o campo magnético, o qual é alimentado por uma tensão contínua, criado através do giro em velocidade constante a partir de uma fonte de energia mecânica conectada ao seu eixo, por exemplo um MCI, de modo que ao movimentar o rotor, o campo magnético gerado pelos seus polos tenha um movimento relativo aos condutores do enrolamento do estator (NASCIMENTO JUNIOR, 2006).

Acarretando, assim, numa variação da intensidade do campo magnético que atravessa os enrolamentos da armadura ao longo do tempo e, desse modo, conforme a lei de Faraday-Lenz- Neumann (Equação 2.1), haverá uma tensão induzida aos terminais do estator (UMANS; FITZGERALD; KINGSLEY, 2013).

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

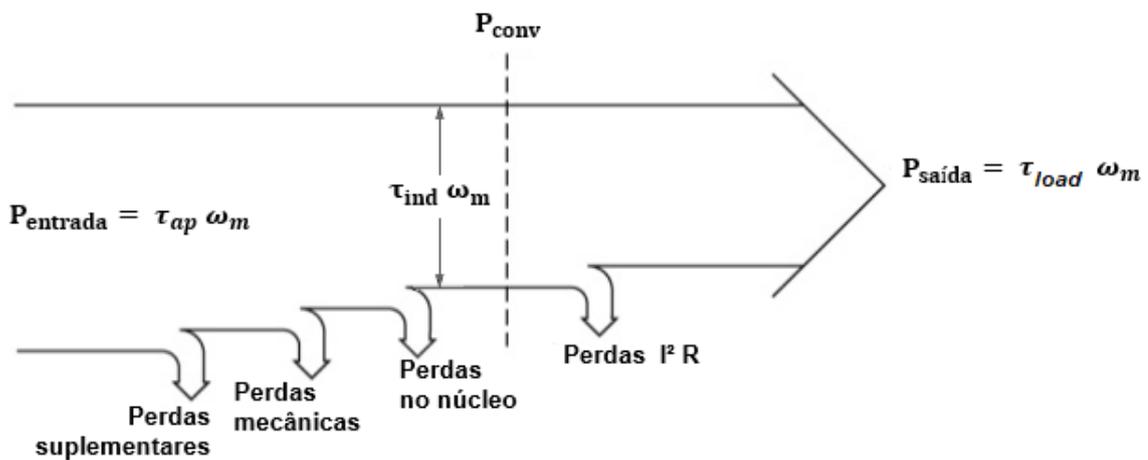
em que ε é a força eletromotriz (FEM) induzida; N é o número de espiras idênticas do fio; ϕ_B é o fluxo magnético através de uma única espira.

Ademais, é importante evidenciar que, como todo processo físico real, há perdas associadas ao processo de conversão de energia mecânica em elétrica. Chapman (2013) divide as perdas elétricas e define suas causas como:

- Perdas no cobre ou perdas elétricas. Ocorrem devido ao efeito Joule, isto é, o aquecimento devido ao efeito resistivo dos enrolamentos utilizados;
- Perdas no ferro ou perdas no núcleo. Decorrem por causa da histerese magnética e das correntes parasitas (ou correntes de Foucault);
- Perdas mecânicas. Causadas, em geral, pelo atrito entre as partes móveis do gerador e pela resistência do ar ao movimento do rotor;
- Perdas suplementares. Definidas, essencialmente, como as perdas que não se enquadram nas classificações anteriores.

Na Figura 7 são mostrados os tipos de perdas (conforme definido), as energias mecânica (P_{entrada}) e elétrica produzida pelo GS ($P_{\text{saída}}$). As variáveis ω_n , τ_{ap} , τ_{ind} e τ_{load} são, respectivamente, a rotação do motor e os torques aparente, indicado e da carga.

Figura 7 – Diagrama de fluxo de potência de um gerador CA trifásico



Fonte: Chapman (2013).

Para análise do comportamento dinâmico do GS é comum a alteração do sistema de referência no qual as variáveis elétricas estão expressas. Em geral, o referencial adotado na modelagem de GS (e o referencial adotado neste trabalho) é o dq (eixo direto e eixo em quadratura). Nele, todas as variáveis são expressas de modo que um observador hipotético estivesse posicionado no rotor. A transformação da referência de abc (referência estacionária)

para dq (referência do rotor) é obtida pela matriz T a seguir (Equação 2.2), também denominada de transformada de Park (KOVÁCS, 1983; KRAUSE *et al.*, 2002):

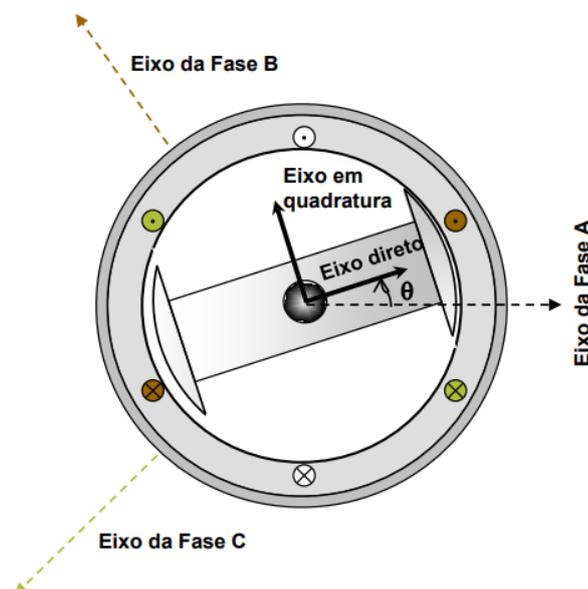
$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Onde a posição angular do rotor, θ , é função do tempo, t . Essa transformação pode ser melhor visualizada na Figura 8. Os eixos direto e em quadratura são, respectivamente, os eixos d e q e são posicionados com relação ao rotor do GS, de modo que o posicionamento dos eixos variam de acordo com θ .

Desse modo, qualquer conjunto de variáveis trifásicas f_a, f_b, f_c expressas no sistema de referência abc podem ser transformadas nas variáveis f_d e f_q representadas no sistema de referência dq pela multiplicação pela transformada de Park (BOLDEA; NASAR, 2016), conforme exposto na Equação 2.3:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Figura 8 – Transformação do sistema de referência de um GS de 3 polos de abc para dq



Fonte: Boldea e Nasar (2016). Adaptado pelo autor.

Essa transformação de sistema de referência preserva a energia do sistema em qualquer instante de tempo, de modo que a potência em determinado tempo t na referência abc é igual a potência na referência dq (LEONHARD, 2001).

2.3 Sistemas de Controle

Os sistemas de controle possuem como objetivo geral manter um sinal de saída em um comportamento pré-estabelecido, normalmente, o ponto ótimo de operação, a fim de minimizar ou eliminar totalmente os efeitos provocados por perturbações, as quais podem gerar condições instáveis no processo e, conseqüentemente, diminuir a eficiência do sistema e pôr em risco pessoas e/ou equipamentos (DUARTE FILHO, 2014). Para isso, os controladores aplicam sinais adequados na entrada do processo por meio de atuadores com o intuito de atenuar a perturbação. De acordo com a configuração em que o sinal de controle é determinado, pode-se classificar o sistema controlador em malha aberta ou malha fechada (OGATA, 2009). Alguns termos próprios desse ramo estão expostos na Tabela 2 (BEGA *et al.*, 2006).

Na Figura 9 é mostrado o esquema de um sistema de controle em malha aberta, o qual é caracterizado pela independência entre a saída do processo e o controle do mesmo. Em outras palavras, a saída da planta não exerce qualquer influência na ação do controlador. A partir da aplicação de determinado sinal de controle, a variável controlada apresenta comportamento específico, com exceção da presença de perturbações, fazendo com que o sistema de controle não atinja os valores desejados. Na prática, o controle em malha aberta somente deve ser utilizado em sistemas para os quais a relação entre a entrada e a saída seja bem conhecida e que não tenham perturbações internas ou externas significativas (PIRES, 2014; DUARTE FILHO, 2014).

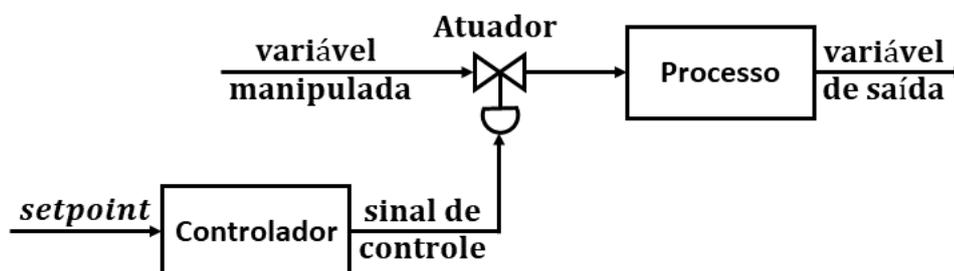
Já na Figura 10 é mostrado o diagrama de blocos do controle em malha fechada, *feedback* ou com realimentação. Nele o ajuste do processo depende da saída do mesmo, ou seja, a saída da planta é utilizada como base para determinação do sinal de controle a ser aplicado na entrada do processo. Para tal, a variável de saída é medida por meio de um sensor e, então, é comparada com o valor de referência (ou *setpoint*). A diferença entre os dois valores resulta no erro, o qual é utilizado na determinação do sinal de controle a ser aplicado no processo (BROGAN *et al.*, 2016).

Tabela 2 – Terminologia da área de controle de sistemas

Termo	Definição
Variável manipulada ou variável de entrada	É aquela que se varia a fim de controlar o sistema
Variável controlada ou variável de saída	É aquela que se deseja controlar. Essencialmente, também é uma variável medida, já que para conter certo parâmetro em um determinado intervalo de valores, é necessário medi-lo com algum sensor, para garantir que ele está na faixa desejada
Ponto de ajuste, valor de referência ou <i>setpoint</i>	É o valor alvo no qual o sistema de controle é ajustado para controlar o processo
Erro ou <i>offset</i>	É a diferença entre o valor da variável medida/controlada e o valor do ponto de ajuste
Elemento final de controle, atuador ou regulador	É o equipamento que comanda a variável manipulada
Controlador	É o componente o qual compara o sinal de um ou mais sensores com o SP e transmite algum comando para o elemento final de controle
Erro residual ou estacionário	É um resto do <i>offset</i> que o controlador não conseguiu anular, permanecendo, assim, na resposta deste componente
Distúrbio ou variável de perturbação	É uma entrada no processo a qual não pode ser manipulada
Sensor	É todo equipamento que converte um estímulo físico e/ou químico em outra grandeza física para fins de medição e/ou monitoramento

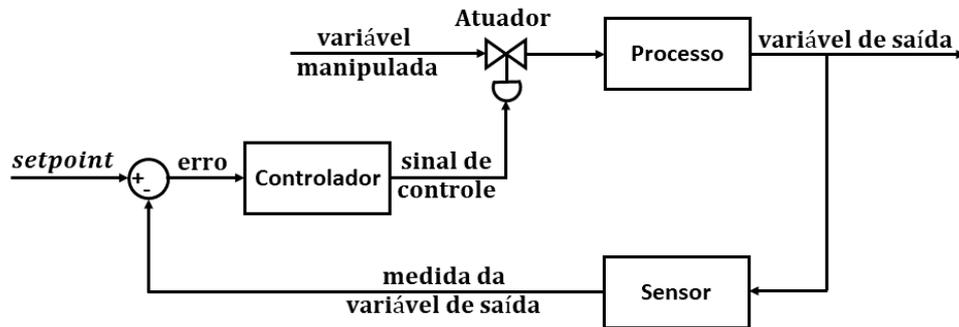
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta



Fonte: elaborado pelo autor.

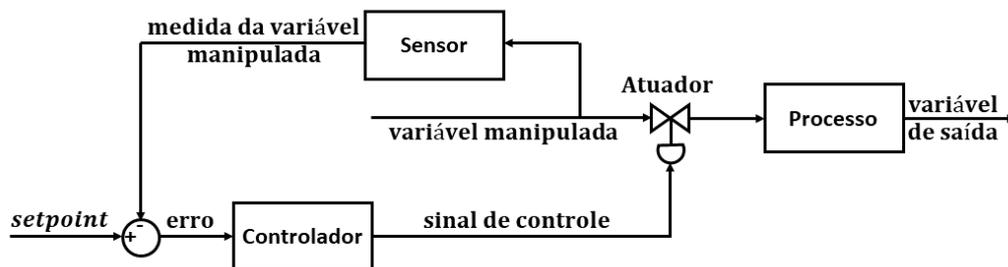
Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada



Fonte: elaborado pelo autor.

Alternativamente, na Figura 11 é mostrada uma estratégia de controle denominada *feedforward* ou com alimentação, na qual a ação corretiva atua na entrada do sistema antes que o distúrbio se propague no processo. De modo geral, a realimentação detecta tanto problemas do processo quanto da sua entrada, entretanto possui uma resposta mais lenta, enquanto o controle com alimentação possui uma característica antecipatória, mas não corrige erros do processo (OGATA, 2009).

Figura 11 – Diagrama de blocos de um sistema de controle *feedforward*



Fonte: elaborado pelo autor.

Dessas estratégias de controle mais básicas, sucedem técnicas mais avançadas, como controle em cascata (em que o controlador mestre ou *master* utiliza um ponto de medição secundário além do convencional para manipular o *setpoint* do controlador escravo ou *slave* o qual lida com a variável controlada); de relação ou razão (em que uma variável é manipulada em relação à outra para manter a razão entre as duas variáveis); seletivo (no qual a quantidade de variáveis manipuladas é superior ao de variáveis controladas); entre outras (CARLOS; SMITH; ARMANDO, 2019).

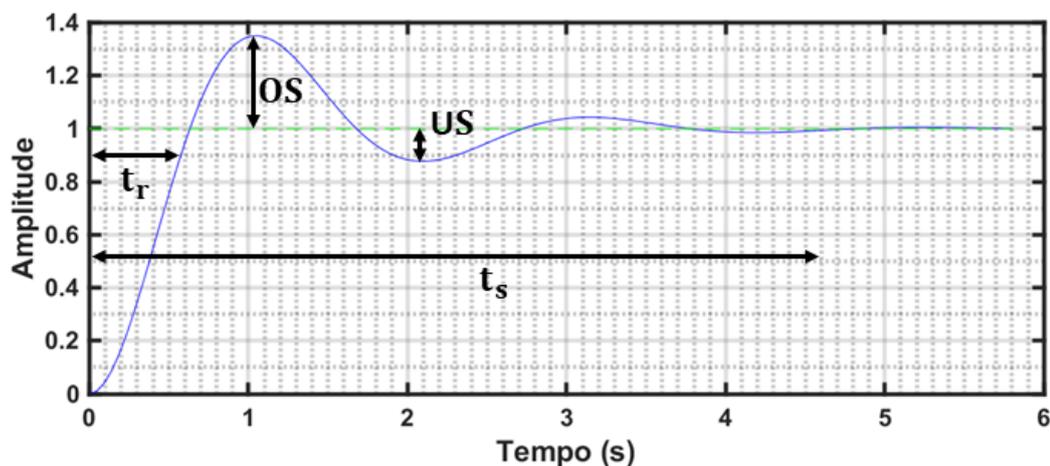
2.3.1 Critérios de Desempenho

O principal critério para ajuste do controle de um sistema e que sempre deve ser visado é a sua estabilidade. Algumas técnicas utilizadas neste trabalho que auxiliam na avaliação da estabilidade e de desempenho são:

- Overshoot (Sobressinal ou *Overshoot* (OS)): maior valor (expresso como porcentagem do valor de referência) que a variável de saída ultrapassa o *setpoint* (JAGATHEESAN *et al.*, 2017);
- Undershoot (Subsinal ou *Undershoot* (US)): oposto de OS. Menor valor (também expresso em porcentagem do valor de referência) que a variável de saída fica abaixo do *setpoint* (JAGATHEESAN *et al.*, 2017);
- Tempo de estabilização ou de acomodação (t_s): tempo decorrido até que a variável de saída permaneça dentro de determinado intervalo (MAYA; LEONARDI, 2015). No caso estudado nesta dissertação, é considerado o intervalo de operação normal definido pela ANEEL;
- Tempo de subida (t_r): tempo transcorrido para que a resposta atinga 90 % do *setpoint* (ALOMOUSH, 2010).

Tais critérios, conforme explicados acima, podem ser visualizados na Figura 12, na qual é apresentada a resposta de uma Função de Transferência (FT) de 2ª ordem a uma entrada de degrau unitário.

Figura 12 – Critérios de desempenho utilizados



Fonte: elaborado pelo autor.

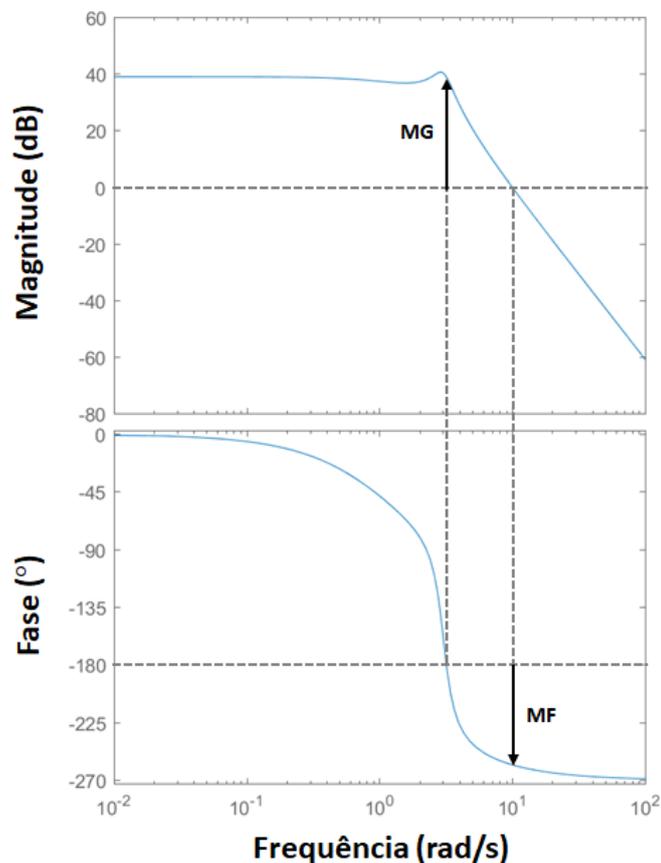
2.3.2 Diagramas de Bode

Os diagramas de Bode são particularmente úteis para análise rápida das características de resposta e estabilidade de sistemas de circuito fechado. Esses diagramas consistem em (SEBORG *et al.*, 2010):

1. Gráfico log-log da magnitude versus a frequência;
2. Gráfico semilog do ângulo de fase versus a frequência.

A partir desses diagramas podem ser determinadas a Margem de Ganho (MG) e a Margem de Fase (MF) do sistema. A MG é o valor do módulo na frequência em que o ângulo é -180° . Enquanto a MF é o atraso de fase adicional na frequência na qual o módulo da FT de malha aberta ($G(s)H(s)$) é unitário. Tanto a MG, quanto a MF indicam se o sistema é estável ou instável (SEBORG *et al.*, 2010). Na Figura 13 são mostrados exemplos de diagramas de Bode e as MG e MF representadas graficamente.

Figura 13 – Exemplo de diagrama de Bode



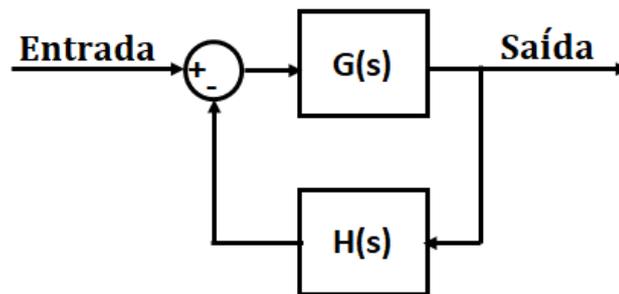
Fonte: elaborado pelo autor.

2.3.3 Diagrama de Nyquist

O diagrama de Nyquist ou diagrama polar é também um método gráfico, aplicável especificamente aos sistemas de controle com realimentação e permite que se avalie o quanto estável é o sistema de malha fechada a partir da resposta em frequência do sistema em malha aberta (FADALI; VISIOLI, 2012).

Considerando o sistema com realimentação indicado na Figura 14. Sua função de transferência é exposta na Equação 2.4. Para que esse sistema seja estável é necessário que $F(s)$ não tenha polos no Semi Plano Direito (SPD) do plano s . Essa condição é equivalente a que a função $1+G(s)H(s)$ não possua zeros no SPD (OGATA, 2009).

Figura 14 – Sistema com realimentação negativa



Fonte: elaborado pelo autor.

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.4)$$

em que $G(s)$ é a FT de malha direta e $H(s)$ é a FT da malha de realimentação.

O diagrama de Nyquist auxilia na detecção da presença de zeros de $1 + G(s)H(s)$ no SPD, a partir de $G(s)H(s)$, e, para tal, pode-se utilizar a seguinte relação (FADALI; VISIOLI, 2012):

$$Z = N_v + P \quad (2.5)$$

em que Z é o número de zeros de $1+G(s)H(s)$ no SPD; N_v é o número de voltas envolvendo no sentido horário o ponto $(-1;0)$ no plano s ; e P é o número de polos de $G(s)H(s)$ no SPD.

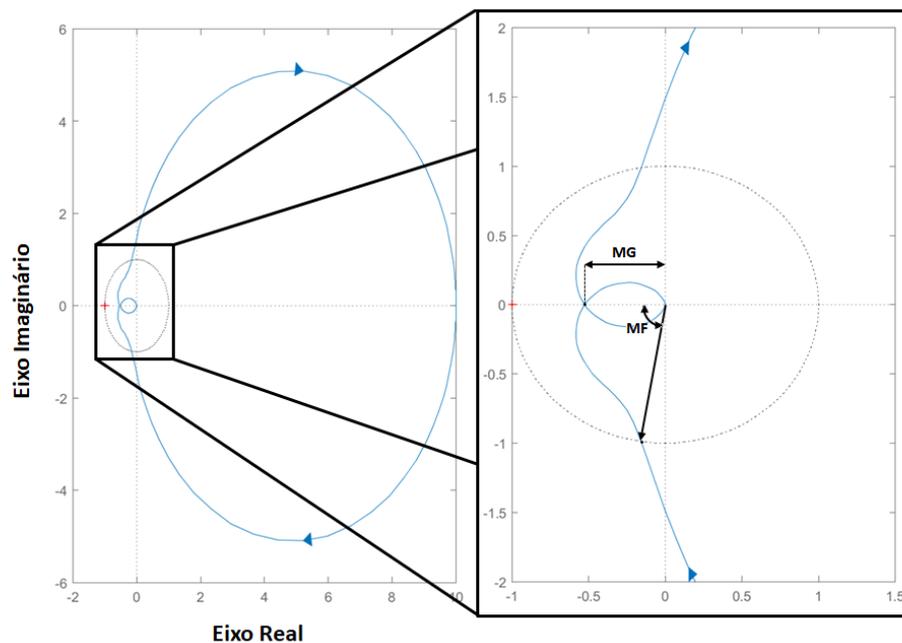
Vale ressaltar que, na contagem do número de envolvimentos do ponto crítico (N_v), as voltas no sentido horário são positivas, enquanto no sentido anti-horário são negativas (MAYA; LEONARDI, 2015).

E sabe-se que os zeros de $1+G(s)H(s)$ são os polos de $F(s)$. Então, se $Z \leq 0$, a FT $F(s)$ é estável; caso contrário ($Z > 0$), será instável (FADALI; VISIOLI, 2012).

A proximidade da curva do ponto $(-1;0)$ no diagrama de Nyquist pode ser utilizada como uma medida da margem de estabilidade. Em geral, quanto mais próximo a FT estiver do ponto crítico, mais oscilatória será a resposta do sistema, pois mais próximo os zeros de $1+G(s)H(s)$ estarão do SPD (OGATA, 2009).

As MG e MF também podem ser determinadas pelo diagrama de Nyquist, assim como pelo diagrama de Bode. Na Figura 15 é mostrado um exemplo de diagrama de Nyquist, com um zoom para melhor visualização das MG e MF representadas graficamente.

Figura 15 – Exemplo de diagrama de Nyquist

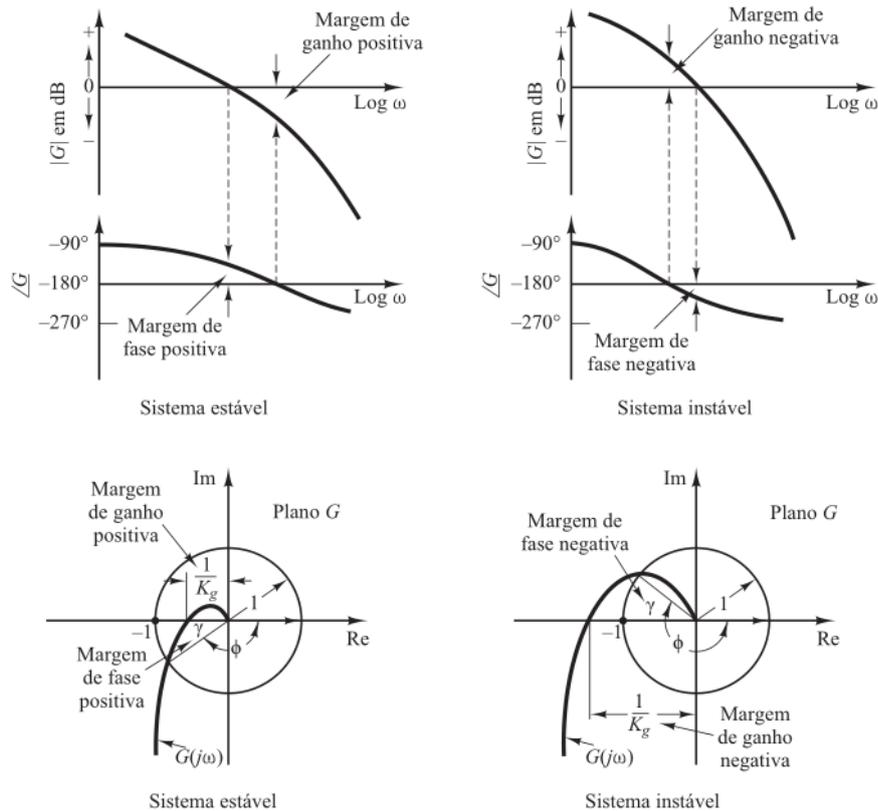


Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 16 são mostrados valores positivos e negativos para as MG e MF de dois sistemas, tanto para os diagramas de Bode quanto para o de Nyquist. Como pode ser observado, se a MG e a MF forem positivas (como é o caso da Figura 15), o sistema é estável, caso a MG e MF sejam negativas (por exemplo, na Figura 13), o sistema é instável (OGATA, 2009).

As MG e MF podem ser utilizadas como requisitos de projeto de um controlador. Entretanto ambas devem ser fornecidas para o projeto, pois apenas a MG ou a MF não fornece indicação suficiente sobre a estabilidade do sistema (OGATA, 2009).

Figura 16 – Margens de ganho e de fase de sistemas estáveis e instáveis



Fonte: Ogata (2009).

2.4 Controlador Proporcional Integral e Derivativo

O controlador PID foi desenvolvido no século XX e é um dos métodos mais utilizados na indústria e o mais utilizado em sistemas de controle com realimentação (CAMPESTRINI, 2006; ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995). A razão de sua popularidade deve-se ao fato de ser facilmente implementado e ser simples ajustar os seus parâmetros, além de ser de baixo custo, robusto e versátil. Assim, o algoritmo PID fornece respostas em regime permanente e transiente satisfatórias para uma grande variedade de processos industriais (GUIMARÃES, 2013; TEI38 XEIRA *et al.*, 2010). O controlador PID (Equação 2.6) consiste

de três termos, denominados proporcional (K_P), integral (K_I) e derivativo (K_D). Cada termo, consiste numa ação. O termo proporcional gera uma saída proporcionalmente ao erro. Ele reduz o tempo de subida, mas aumenta o sobressinal, em outras palavras, aumenta a velocidade da resposta, todavia torna a resposta mais oscilatória, principalmente, se o ganho estiver muito alto (JAGATHEESAN *et al.*, 2017). Ademais, essa ação não é capaz de fazer com que a variável retorne ao *setpoint*, originando um erro estacionário, o qual pode ser diminuído ao aumentar o valor do ganho K_P , mas pode tornar a resposta oscilatória, conforme mencionado (TEIXEIRA *et al.*, 2010).

A ação integral não pode ser empregada separadamente de uma ação proporcional. A sua principal característica é a eliminação do erro residual, proveniente de um sistema de controle puramente proporcional (OGATA, 2009). Além disso, a adoção de um controlador com forte caráter integral reduz o tempo de subida e aumenta o tempo de acomodação e o sobressinal. Entretanto, tal medida pode levar a resposta à instabilidade, assim como, um termo integral pouco atuante produz uma resposta com estabilização lenta (CAMPESTRINI, 2006).

Por fim, a ação derivativa também não pode ser empregada isoladamente da ação proporcional. Esse termo gera uma resposta proporcional à taxa de variação do erro, sendo uma atuação antecipatória. Essa ação provoca uma redução no tempo de estabilização e no sobressinal. O ganho derivativo melhora a estabilidade geral do sistema e o desempenho do processo durante o regime transiente. Entretanto esse termo não corrige o erro residual (GUIMARÃES, 2013).

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.6)$$

A sintonia de um controlador é a tarefa principal da fase de operação e de manutenção de um projeto de sistema de controle, pois um bom ajuste garante que o sistema de controle atenda a um conjunto de especificações exigidas pelo problema específico (TEIXEIRA *et al.*, 2010). No controlador PID, o ajuste é realizado pela regulagem dos seus ganhos (K_P , K_I e K_D), os quais podem ser determinados por diferentes métodos, como abordagem da tentativa e erro, métodos baseados em Zeigler-Nichols, em lugar das raízes, em índice de desempenho, entre outros (ALOMOUSH, 2010). Existem também métodos baseados em Inteligência Artificial (IA), como Algoritmo Genético, Otimização por Enxame de Partículas (PSO), Otimização de Colônia de Formigas (GUIMARÃES, 2013).

2.5 Inteligência Artificial

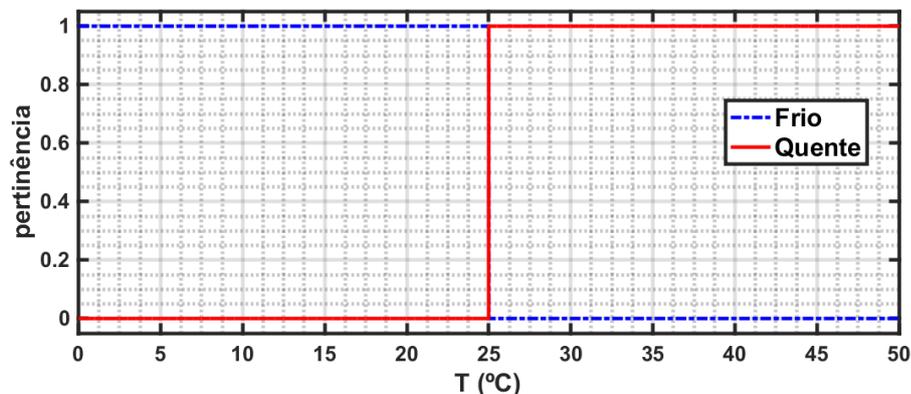
O uso de IA para sintonia de controladores vem sendo amplamente difundida nos últimos anos, principalmente, devido a essas técnicas, quando comparadas com os métodos convencionais, exigirem menos esforço por parte do projetista e apresentarem resultados mais satisfatórios (DUARTE FILHO, 2014). Ademais, as técnicas de trabalho com sistemas não-lineares, tratam incertezas e informações vagas com mais facilidade (PIRES, 2007). Os métodos de utilizados nesse trabalho são: LF e PSO, o quais são detalhados a seguir.

2.5.1 Lógica Fuzzy

A teoria de conjuntos *fuzzy*, proposta originalmente por Zadeh (1965), trata-se de uma abordagem diferente que é apropriada para trabalhar com informações imprecisas e/ou vagas por meio de raciocínio aproximado. Este conjunto de regras modela o pensamento humano, apto a processar informações incertas e qualitativas (BIAZETO, 2015).

Na teoria de conjuntos clássica, determinado elemento pertence ou não pertence a um conjunto, enquanto na teoria *fuzzy* há o conceito de pertinência, o qual indica o grau que o elemento pertence a este ou àquele conjunto. Por exemplo, na classificação se o ambiente está quente ou frio, caso a temperatura de 25 °C seja definida como o limite entre os dois estados (Figura 17), se o termômetro medir 24 °C o ambiente vai ser classificado como frio, enquanto que se a medição for 26 °C, o ambiente já é considerado quente.

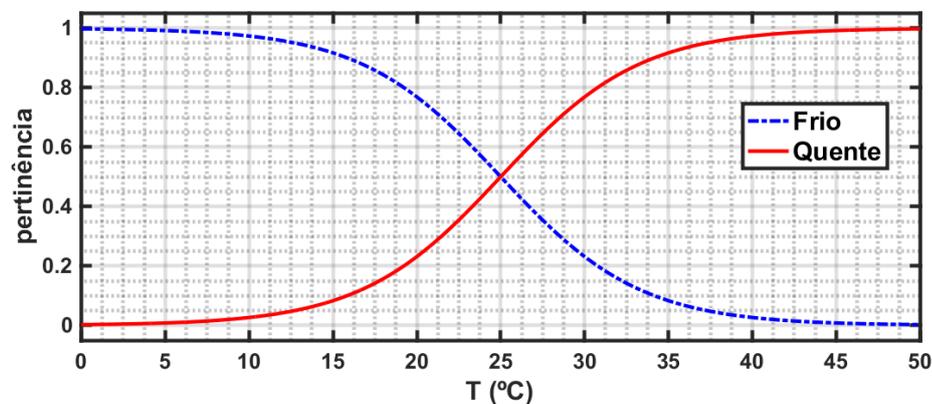
Figura 17 – Pertinência clássica



Fonte: elaborado pelo autor.

Já para conjuntos *fuzzy* a transição entre quente e frio pode ser feita mais suavemente. Um exemplo é a utilização de uma sigmoide para representar a pertinência das duas classificações, conforme exposto na Figura 18. Desse modo, as temperaturas de 24 e 26 °C possuem pertinências de ambas classificações. Em conjuntos *fuzzy* pode-se ainda utilizar outros formatos para a pertinência, como: triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outras (ENGELBRECHT, 2007).

Figura 18 – Pertinência *fuzzy*



Fonte: elaborado pelo autor.

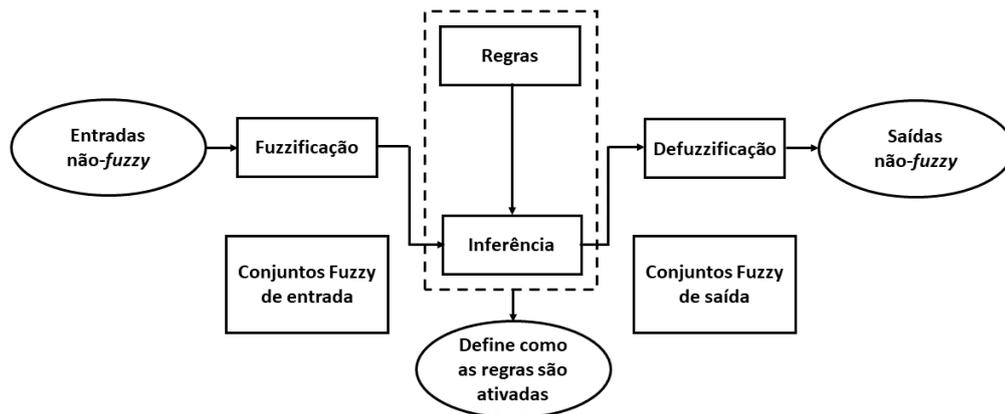
Em conjuntos *fuzzy* utiliza-se o conceito de variáveis linguísticas (ou variáveis *fuzzy*), as quais são variáveis com valores que são palavras ou frases da linguagem natural e podem ser divididas em (ZADEH, 1975):

- Variáveis de quantificação: tudo, maioria, muitos, nenhum, etc;
- Variáveis de habitualidade: às vezes, frequentemente, sempre, raramente, etc;
- Variáveis de probabilidade: possível, provável, certo, etc.

Assim, utilizam-se as variáveis linguísticas para determinar as entradas (fuzzificação) e as saídas (defuzzificação) do sistema *fuzzy*. Ademais, um conjunto de regras do tipo 'se-então', baseadas no conhecimento e na experiência humana, são definidas, como: se o ambiente está quente então ligar o ar condicionado; se o ambiente está frio então desligar o ar condicionado. Desse modo, é possível inferir as saídas do sistema a partir da pertinência da variável, por exemplo, uma determinada temperatura pode pertencer a ambos os conjuntos (quente e frio), mas pertencer mais (possuir pertinência maior) a um conjunto do que outro. Assim, a inferência possuirá maior contribuição da regra que possui o conjunto com maior

pertinência. Esse sistema que combina conjuntos *fuzzy* com regras *fuzzy* compõem o controlador baseado em LF (ENGELBRECHT, 2007). Na Figura 19 é mostrado o desenho esquemático de de um sistema *fuzzy*.

Figura 19 – Desenho esquemático de um sistema *fuzzy*



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dessa estrutura geral, como mostrada na Figura 19, existem vários controladores baseados em LF. As principais diferenças entre eles são na implementação do mecanismo de inferência e no processo de defuzzificação (ENGELBRECHT, 2007). Neste trabalho é utilizado o modelo *fuzzy* de Takagi-Sugeno (TS) o qual foi proposto, originalmente, por Takagi e Sugeno (1985) e, posteriormente, aperfeiçoado por Sugeno e Kang (1986).

O modelo de TS busca modelar a dinâmica não-linear do sistema por meio da interpolação de modelos dinâmicos lineares. Assim a etapa de inferência não é determinada apenas pela regra com maior pertinência, mas pela combinação linear das regras com pertinência maior que zero. A principal vantagem de controladores por LF, os quais utilizam essa metodologia, é que eles proporcionam um controle mais dinâmico com ótima transição entre as categorias de saída (ENGELBRECHT, 2007).

2.5.2 Otimização por Enxame de Partículas

O algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) é uma metodologia de busca baseada na simulação do comportamento social de aves as quais constituem um bando. Ele foi proposto por Kennedy e Eberhart (1995) com a intenção inicial de simular graficamente

o movimento elegante e imprevisível de um bando, a fim de descobrir padrões que regulem a capacidade das aves voarem em sincronia e, de repente, mudar de direção com um reagrupamento em uma nova formação. A partir desse objetivo inicial, o conceito evoluiu para um algoritmo de otimização simples e eficiente (ENGELBRECHT, 2007).

O comportamento social de aves que serviu de inspiração para o PSO foi o comportamento de forrageamento. As partículas (aves no modelo referente à biologia) são geradas aleatoriamente no espaço de busca. Cada partícula corresponde a uma possível solução (para a função-objetivo) representada pela sua posição dentro desse espaço de busca. Para buscar uma solução ótima ou próxima da ótima, cada partícula possui sua própria experiência (fator ou componente cognitivo) e conhecimento sobre o comportamento dos seus vizinhos (fator ou componente social) (LIN; HUANG; CHENG, 2010).

É possível resumir o processo de forrageamento em três princípios (EBERHART; SHI; KENNEDY, 2001):

1. Avaliação: as partículas possuem a capacidade de sentir o ambiente de forma a estimar seu próprio comportamento;
2. Comparação: as partículas se comparam umas com as outras;
3. Imitação: as partículas tentam seguir aquelas que possuem melhores resultados.

Desse modo, cada partícula voa pelo espaço de busca com uma velocidade que é dinamicamente modificada de acordo com sua própria experiência de vôo e também com a experiência de vôo das outras partículas. A velocidade de cada partícula (Equação 2.7) é atualizada a partir da velocidade atual e das distâncias da posição atual para a melhor solução pessoal ($pbest_{j,g}$) e para a melhor solução global ($gbest_g$) (SAHU; PANDA; SEKHAR, 2015):

$$v_{j,g}^{(i+1)} = W v_{j,g}^{(i)} + c_1 r_1 (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(i)}) + c_2 r_2 (gbest_g - x_{j,g}^{(i)}) \quad (2.7)$$

em que W é o componente de ponderação de inércia; c_1 e c_2 são, respectivamente, os componentes de aceleração cognitivo e social; r_1 e r_2 são, respectivamente, números aleatórios distribuídos uniformemente no intervalo de 0 a 1; x_i é a posição da partícula j ; e i é o número da iteração.

A Equação 2.7 pode ser separada em três termos (ENGELBRECHT, 2007):

1. Termo de inércia: $W v_{j,g}^{(i)}$. Fornece uma memória da direção dos vãos anteriores da partícula e evita mudanças bruscas de velocidade. Originalmente, o componente de ponderação de inércia não existia, sendo proposto por Shi e Eberhart (1998);
2. Termo cognitivo: $c_1 r_1 (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(i)})$. Tendência das partículas regressarem a sua melhor posição;
3. Termo social: $c_2 r_2 (gbest_g - x_{j,g}^{(i)})$ Tendência das partículas se direcionarem para a melhor posição do bando.

Os componentes de aceleração social e cognitivo são comumente definidos com o valor 2. Pode-se mudar esses valores, mas, usualmente, a soma deles é quatro (EBERHART; SHI, 2000).

O componente de ponderação de inércia foi proposto por Shi e Eberhart (1998) com o intuito de reduzir a importância do termo de inércia da Equação 2.7, proporcionando assim, um melhor controle entre exploração global e local (respectivamente, termos social e cognitivo da Equação 2.7), resultando em uma quantidade menor de iterações para encontrar uma solução ótima (EBERHART; SHI, 2000).

Já a posição de cada partícula (representando uma possível solução para o problema) é atualizada somando vetorialmente a posição atual da partícula e sua velocidade já atualizada (ENGELBRECHT, 2007), conforme mostrado na Equação 2.8:

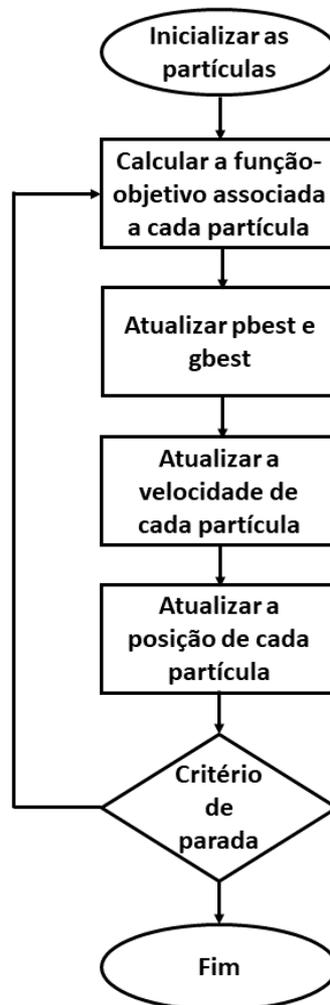
$$x_{j,g}^{(i+1)} = x_{j,g}^{(i)} + v_{j,g}^{(i+1)} \quad (2.8)$$

A metodologia desenvolvida pelo PSO pode ser resumida por meio do fluxograma mostrado na Figura 20. Os parâmetros do algoritmo e as posições e velocidades das partículas são inicializados. Então, calcula-se a função-objetivo para cada partícula e compara com os valores de $pbest$ e $gbest$, atualizando-os, caso o novo valor seja melhor. Depois a velocidade e a posição de cada partícula são atualizadas de acordo com as Equações 2.7 e 2.8. Volta-se a calcular a função-objetivo e as etapas subsequentes, até que o critério de parada seja satisfeito, normalmente, um determinado número de iterações.

2.6 Biogás de Águas Residuárias

O Biogás é um combustível constituído principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) produzido a partir de fermentação de matéria orgânica por bactérias. Esse combustível pode ser produzido de diferentes fontes, como aterro sanitário, lodo de esgoto, digestores de resíduos biológicos (GIACAGLIA; DIAS, 1993; RASI; VEIJANEN; RINTALA, 2007).

Figura 20 – Fluxograma do algoritmo PSO



Fonte: elaborado pelo autor.

O aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica ocasiona uma redução no potencial de poluição do meio ambiente, visto que o metano (CH_4) apresenta um potencial

de aquecimento global cerca de 24 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2). Desta forma, se o CH_4 for emitido para a atmosfera, ele agrava o aquecimento global mais do que se ele fosse coletado e utilizado na geração de energia elétrica (COELHO; VELÁZQUEZ; SILVA, 2006; CHERNICHARO, 2007). Segundo Lobato (2011) a maioria dos aterros sanitários e das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) domésticos ou industriais, com o intuito de reduzir os impactos ambientais, simplesmente queima o biogás antes de lançá-lo para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético.

O biogás é produzido por meio de biodigestores, os quais, segundo Chernicharo *et al.* (2001), podem ser divididos em: biodigestores de fluxo hidráulico descontínuo (biodigestor de batelada) e biodigestores de fluxo hidráulico contínuo. Neste último grupo está a maioria dos biodigestores encontrados no Brasil, sendo o mais comum o UASB.

UASB são reatores nos quais o esgoto afluente entra pelo fundo e, em seu movimento ascendente, atravessa uma camada de lodo biológico que se encontra em sua parte inferior e, após passar por um separador de fases, escoar em direção à superfície. Os sólidos orgânicos suspensos são digeridos através da ação de bactérias, resultando na produção de biogás e no crescimento da biomassa bacteriana. O biogás segue em trajetória ascendente com o líquido, após este ultrapassar a camada de lodo, em direção ao separador de fases. Várias unidades estão implantadas, principalmente em países de clima tropical e subtropical (HAANDEL; LETTINGA; HAANDEL, 1994; ANDRADE NETO, 1997).

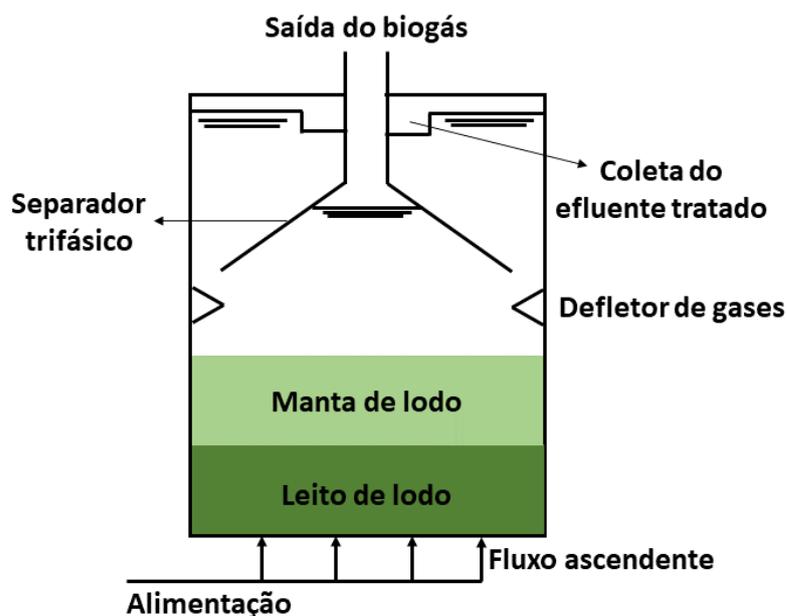
Na figura 21 é mostrado as características do reator UASB. O esgoto entra pelo fundo e seu fluxo ascendente forma duas camadas: leito de lodo, com partículas granulares com elevada capacidade de sedimentação, e a manta de lodo, com partículas mais dispersas e mais leves. No reator há um separador trifásico, de modo que o lodo fique na parte inferior, enquanto que o biogás e o efluente tratado na fase líquida saiam pela parte superior do reator. O biogás é direcionado para o centro por meio dos defletores de gases, enquanto o efluente tratado passa pelos defletores e decanta para, posteriormente, ser coletado.

Como já dito, o biogás possui composição variável, principalmente devido ao tipo de matéria orgânica utilizada. Na Tabela 3 são mostrados os valores dos principais componentes do biogás produzido a partir de ETE utilizando o UASB.

Segundo Chernicharo (2007), as características do biogás dependem, principalmente, da pressão, temperatura, umidade, pH, concentração química do resíduo e

impermeabilidade ao ar. Sendo necessário a remoção de componentes, especialmente, o sulfeto de hidrogênio, devido a ser altamente corrosivo.

Figura 21 – Funcionamento do reator UASB



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Composição do biogás proveniente de ETE com o UASB

	Fórmula Química	Unidade	Valor
Metano	CH_4	%	60 a 85
Dióxido de Carbono	CO_2	%	5 a 25
Nitrogênio	N_2	%	10 a 20
Hidrogênio	H_2	%	0 a 3
Monóxido de Carbono	CO	%	0 a 0,3
Sulfeto de Hidrogênio	H_2S	%	1000 a 2000

Fonte: Lobato (2011).

A purificação do biogás consiste na remoção desses gases para aumentar a concentração de metano. Assim, o valor do PCI desse combustível renovável aumenta à medida que os compostos nocivos, como o sulfeto de hidrogênio, e os compostos inertes, como o dióxido de carbono, são removidos. A concentração de metano pode ser aumentada para valores superiores ao GN e, nesse caso, o biogás se torna biometano (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são apresentados trabalhos relacionados com a pesquisa desenvolvida nessa dissertação, a qual, como é abordado no Capítulo 4, propõe controladores que utilizam técnicas como Lógica Fuzzy (LF) e Otimização por Enxame de Partículas ou *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Os trabalhos relacionados mostram como estão as pesquisas na área de modelagem de MCI (Seção 3.1), de utilização de LF no sistema de controle de grupos motogeradores (Seção 3.2) e de uso do PSO para otimizar os parâmetros do sistema de controle (Seção 3.3).

3.1 Modelagem de Motor de Combustão Interna

A operação de um motor de ignição por compressão operando com misturas de Diesel, biodiesel e biogás é modelada em Graciano, Vargas e Ordonez (2015). O modelo é desenvolvido para operação dinâmica e de regime permanente, combinando princípios da termodinâmica clássica e transferência de calor, com o uso de correlações empíricas e teóricas. A modelagem é ajustada e validada experimentalmente por comparação direta dos resultados obtidos com dados experimentais publicados anteriormente e curvas nominais do motor. Em seguida, a modelagem é usada para simular diferentes cenários de mistura de combustível. Os resultados da simulação mostram a redução de potência do motor para diferentes diminuições no consumo de combustível fóssil.

Uma modelagem para motores de combustão por centelha é apresentada em Bastida, Ugalde-Loo e Abeysekera (2017). O Motor de Combustão Interna (MCI) opera com Gás Natural (GN) em uma unidade de produção combinada de energia mecânica e térmica (sistema de cogeração). Um modelo não linear que descreve o sistema é obtido e linearizado para diferentes pontos operacionais (diferentes condições de carga), então, chega-se a uma Função de Transferência (FT) que representa o modelo, permitindo o projeto de um sistema de controle linear no domínio da frequência. O controlador proposto obtém bons resultados, no entanto, a qualidade da energia não é analisada neste trabalho.

Resultados experimentais de emissão e desempenho de uma unidade geradora de motores alimentados com biogás proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) são confrontados com resultados de simulação em Faria *et al.* (2017). Para o uso desse combustível

em um MCI, foram necessárias adaptações no equipamento. Os resultados experimentais mostram uma redução na emissão e no desempenho ao utilizar o biogás, o que está de acordo com a literatura. Ademais, um modelo de simulação para prever características de desempenho foi confrontado com os resultados experimentais, constatando-se diferença inferior a 5 %. Tal desigualdade foi considerada aceitável, principalmente, devido às suposições feitas no modelo e às correlações empíricas utilizadas. O modelo de simulação pode ser adaptado para o estudo de diferentes composições de biogás, auxiliando os estudos experimentais relacionados a utilização desse combustível em MCI.

Um modelo de simulação de unidade de geração de energia e recuperação de calor (sistema de cogeração) para MCI foi desenvolvido em Yun *et al.* (2013). Com o uso do modelo são obtidas estimativas dos mapas de desempenho e eficiência da energia térmica útil e da energia elétrica para diferentes motores. A utilização do modelo proporciona melhores resultados do que aqueles os quais consideram constante a eficiência da unidade geradora de energia. Os resultados de simulação são validados com base nos dados técnicos de um grupo motogerador de 15 kW.

3.2 Aplicação de Lógica Fuzzy em controle de grupo motogerador

Em Kumar *et al.* (2017) é proposto um estudo de simulação da aplicação de biogás em um MCI para produzir eletricidade fornecendo energia mecânica a um Gerador Síncrono (GS) de ímã permanente. Os desempenhos de dois controladores são avaliados: Proporcional, Integral e Derivativo (PID) e um controlador baseado em LF. Os resultados da simulação mostram que o sistema baseado em LF controla o mecanismo melhor que o PID. No entanto, o desempenho dos controladores não é analisado em diferentes cenários de carga.

Um controlador intitulado fuzzy-PI (combinação de LF com técnica proporcional e integral) é elaborado para regular a tensão e a frequência de um gerador de indução auto-excitado acionado por um motor de velocidade constante para alimentar cargas trifásicas de 4 fios em Jain *et al.* (2018). Com base nos resultados obtidos, é demonstrado que o desempenho transitório dos reguladores fuzzy-PI é considerado satisfatório como balanceador e nivelador de carga, eliminador de harmônicos e controlador de tensão e frequência.

Um esquema de controle composto de regulação de velocidade é proposto em Chen e Wu (2017). É proposto um controlador baseado em LF com uma entrada, a derivada do erro

da velocidade, e três saídas, as três constantes do PID. Assim, o PID ajustado pelo controlador de LF regula a velocidade do motor de acordo com o erro de velocidade angular. Pelos resultados, constata-se que o sistema de controle composto possui melhor desempenho que o controlador PID apenas. No entanto, nesse artigo, as respostas dos controladores para condições de variações de carga não são analisadas.

Uma estratégia de controle baseado em LF para operação de um grupo gerador a Diesel conectado ou não à rede é proposta em Reis *et al.* (2013). A LF é combinada com o PID, resultando em um controlador intitulado Fuzzy PD + I. O controlador do sistema foi projetado para reduzir as oscilações de tensão nos terminais e fornecer um fator de potência mais próximo de um. O controlador apresenta bons resultados e sua principal vantagem é a flexibilidade da estratégia de controle, que permite que o grupo gerador opere no modo autônomo (*off-grid*) ou conectado à rede sem modificar os circuitos de controle do sistema, e a transição entre os dois modos ocorre sem causar grandes perturbações no sistema.

3.3 Aplicação de Inteligência Artificial em controle de grupo gerador

O desempenho de diferentes funções objetivo comumente usadas em controladores de carga e automáticos de geração é avaliado em Jagatheesan *et al.* (2017). As funções objetivo comumente usadas são Integral do Erro Quadrático ou *Integral Square Error* (ISE), Integral do Erro Quadrático Multiplicado pelo Tempo ou *Integral Time Square Error* (ITSE), Integral do Erro Absoluto ou *Integral Absolute Error* (IAE), Integral do Erro Absoluto Multiplicado pelo Tempo ou *Integral Time Absolute Error* (ITAE). Nesse trabalho, as funções objetivo são usadas para ajustar os valores do controlador PID usando Inteligência Artificial (IA) com base na técnica de Otimização de Colônias de Formigas. O desempenho dos sistemas de energia é medido analisando-se a resposta do controlador no domínio do tempo por meio dos seguintes parâmetros: tempo de acomodação, subsinal (ou *undershoot*) e sobressinal (ou *overshoot*). O sobressinal é menor usando as funções objetivo ITAE e IAE. Embora o controlador PID baseado em ITSE garanta um menor subsinal, mas, em comparação às outras funções objetivo, sua resposta demora mais tempo para acomodar-se.

O PSO é usado para ajustar os parâmetros do controlador PID responsável por regular um motor de Corrente Contínua (CC) em Solihin, Tack e Kean (2011). Esse método de otimização é comparado com o Ziegler Nichols (ZN), o qual, geralmente, produz um grande

overshoot. Com o uso do controlador PID-PSO são obtidos melhores resultados do que com a utilização do PID-ZN.

A utilização de PSO para otimizar os parâmetros do Controlador Automático de Geração (CAG) é estudada em Abdel-Magid e Abido (2003). O CAG tem o objetivo de regular as variações na frequência elétrica, controlando o balanço entre a geração e a carga demandada. As funções objetivo utilizadas na técnica de PSO foram o ISE e o ITAE. O PSO mostrou-se mais eficaz na otimização do que as técnicas convencionais, e averigou-se que ITAE possui melhor amortecimento e resposta transitória que o ISE.

Em Sahu, Panda e Sekhar (2015) é investigado o uso de PSO juntamente com Reconhecimento de Padrões na otimização de um controlador (constituído de LF e PID) proposto para CAG. A otimização pela técnica híbrida (PSO com Reconhecimento de Padrões) é comparada com outras técnicas, como Otimização por Cultura de Bactérias, Algoritmo Genético e ZN. É observado que a abordagem PSO com Reconhecimento de Padrões possui melhor desempenho que as outras técnicas de otimização para os cenários testados, que incluem a variação de carga.

Uma síntese dos trabalhos relacionados e seus resultados é apresentada na Tabela 4. A Tabela apresenta a divisão dos assuntos como expostos nas seções desse capítulo. É possível notar que os temas separadamente são recorrentes no meio acadêmico, mas a pesquisa desses temas combinados, como ocorre nessa dissertação, apresenta-se como um estudo original.

Desses trabalhos relacionados, há alguns usados como base para o desenvolvimento dessa dissertação. As principais referências utilizadas como base são:

- Bastida, Ugalde-Loo e Abeysekera (2017): modelagem de um MCI de ciclo Otto operando com GS e, posteriormente sua linearização por expansão de série de Taylor. A modelagem é aprimorada nessa dissertação, além de utilizar o biogás como combustível no motor no lugar do GN.
- Chen e Wu (2017): estudo de controlador baseado em LF o qual determina os parâmetros de controle PID. Esse esquema de controle é um dos quatro analisados nesse trabalho. Os outros três controladores são dois propostos pelo autor e o que é atualmente utilizado no mercado. Todos os esquemas de controle são detalhados na Seção 4.4.
- Jagatheesan *et al.* (2017): utilização das quatro principais funções objetivo para ajustar os parâmetros do controle PID por meio da Otimização por Colônia de Formigas. Nessa dissertação, é utilizado duas dessas quatro funções objetivos, entretanto será utilizado o

PSO, pois, em comparação com outras técnicas de Inteligência Artificial (IA), apresenta desempenho satisfatório com menor custo computacional.

Tabela 4 – Resumo dos trabalhos relacionandos

Assunto	Referência	Resultados
Modelagem de MCI	Graciano, Vargas e Ordonez. (2015)	Modelagem de motor ciclo Diesel operando com misturas de Diesel, biodiesel e biogás. Modelo validado experimentalmente.
	Bastida, Ugalde-Loo e Abeysekera (2017)	Modelagem de um MCI de ciclo Otto operando com GN e linearização do modelo para chegar em uma FT que represente o sistema.
	Faria <i>et al.</i> (2017)	Modelagem de motor de ciclo Otto operando com biogás proveniente de ETE. Modelo validado experimentalmente.
	Yun <i>et al.</i> (2013)	Modelagem de unidade de cogeração constituída de motor de ciclo Otto. Modelo validado experimentalmente.
Aplicação de LF em controle de grupo motogerador	Kumar <i>et al.</i> (2017)	Estudo de simulação de controle de motogerador a biogás. O controle baseado em LF proposto no trabalho alcança melhor desempenho que o PID, o qual é comumente utilizado em grupos motogeradores.
	Jain <i>et al.</i> (2018)	O controle fuzzy-PI proposto no trabalho apresenta bom desempenho transitório para regular a tensão e a frequência de gerador de indução auto-excitado acionado por um motor de velocidade constante.
	Chen e Wu (2017)	Sistema de controle constituído de controlador baseado em LF o qual determina os parâmetros do controlador PID proposto no trabalho possui melhor desempenho em regular a velocidade de motor, quando comparado com controlador PID, usualmente aplicado em motogeradores.
	Reis <i>et al.</i> (2013)	Estratégia de controle que consiste na combinação de LF com PID aplicado a grupo motogerador a Diesel. Tal controlador mostra-se flexível na transição entre modo autônomo (off-grid) e conectado à rede (on-grid).
Aplicação de PSO em controle de grupo gerador	Jagatheesan <i>et al.</i> (2017)	Análise das funções objetivo mais comumente utilizadas para ajustar as constantes do PID utilizando Otimização de Colônia de Formigas. Cada PID ajustado obtém resultados diferentes de acordo com a função-objetivo utilizada.
	Solihin, Tack e Kean (2011)	PSO é utilizado para ajustar os parâmetros do PID responsável por controlar um motor CC. Para o problema exposto neste trabalho, o ajuste feito pelo PSO alcançou melhor desempenho que aquele realizado por ZN.
	Abdel-Magid e Abido (2003)	Utilização de PSO para otimizar os parâmetros de CAG. O PSO mostrou-se mais eficaz que técnicas convencionais.
	Sahu, Panda e Sekhar (2015)	Utilização de PSO combinado com Reconhecimento de Padrões na otimização de um CAG constituído de LF e PID. A otimização proporcionada pelo PSO com Reconhecimento de Padrões possui melhor desempenho que Algoritmo de Otimização por Cultura de Bactérias, Algoritmo Genético e ZN.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, são avaliados os desempenhos de quatro controladores: Proporcional, Integral e Derivativo (PID), amplamente utilizado no mercado; PID e controlador baseado em Lógica Fuzzy (LF) operando em paralelo; PID cujos ganhos são determinados em tempo real por LF; e dois PIDs operando em paralelo sendo comutados por controlador baseado em LF. O desempenho de cada controlador é avaliado em difentes cenários, conforme é explicitado na Seção 4.5. Entretanto, primeiramente foi necessário modelar o grupo motogerador a biogás (Seção 4.1) para, então, ser possível analisar o desempenho desses quatro controladores.

4.1 Modelagem do Grupo Motogerador

O Motor de Combustão Interna (MCI) de ciclo Otto foi segmentado em componentes que foram modelados com auxílio da fluido e termodinâmica.

4.1.1 Válvula Borboleta

No motor de ciclo Otto, o ar é fornecido a uma certa pressão e misturado ao combustível em uma proporção constante (razão Ar-Combustível fixa) antes de ser puxado para dentro do cilindro para queimar. Existe uma variedade de modelos para modelar o sistema de admissão de ar, variando de muito complexos a simples. Na modelagem desse trabalho (Equação 4.1), considera-se que o ar é um gás ideal e compressível (YAR; BHATTI; AHMED, 2018):

$$\dot{m}_{in} = \frac{p_m}{\sqrt{R \theta_m}} A_e C_d f \quad (4.1)$$

em que \dot{m}_{in} é o fluxo mássico de ar que entra pela válvula borboleta, p_m é a pressão a montante da válvula borboleta; R é a constante ideal dos gases; θ_m é a temperatura a montante da válvula; A_e é a área efetiva da válvula borboleta; C_d é o coeficiente de descarga da válvula borboleta; e f é uma função não linear de p_m e p_j (pressão a jusante da válvula borboleta).

A área efetiva (Equação 4.2) é função do ângulo de abertura da válvula borboleta (a qual varia de 0° a 90°). Enquanto o fator f (Equação 4.3) depende da proporção entre a pressão ambiente (a montante da válvula borboleta) e a pressão dentro do coletor de admissão (à jusante da válvula borboleta) (GUZZELLA; ONDER, 2009). Já o coeficiente de descarga da válvula borboleta (Equação 4.4) também depende da abertura dessa válvula (MAHMOUDI, 2015). Assim como a área efetiva.

$$A_e = (1 - \cos \alpha) \frac{\pi}{4} D^2 \quad (4.2)$$

$$f = \begin{cases} \sqrt{\gamma \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} & \text{se } p_j < p_{cr} \\ \sqrt{\left(\frac{p_j}{p_m} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left[1 - \left(\frac{p_j}{p_m} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} & \text{se } p_j \geq p_{cr} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$C_d = \beta_3 \alpha^3 + \beta_2 \alpha^2 + \beta_1 \alpha \quad (4.4)$$

em que α é o ângulo de abertura da válvula borboleta; D é o diâmetro da válvula borboleta; γ é a relação entre os calores específicos do ar a pressão constante e a volume constante; p_j é a pressão a jusante da válvula borboleta; e as constantes β_i são parâmetros experimentais para estimar C_d .

A estimativa do fator f possui dois casos. No primeiro ($p_j < p_{cr}$), há a formação de um escoamento subsônico, enquanto, no segundo caso, um escoamento não linear é desenvolvido. Em todos os cenários de simulação realizados nesse trabalho, foi observado que o escoamento permaneceu subsônico. A pressão crítica que determina qual a faixa de cada caso é estimada a partir da relação γ , conforme explicitado pela Equação 4.5:

$$p_{cr} = \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.5)$$

4.1.2 Coletor de Admissão

O Coletor de admissão é responsável por fornecer uma vazão constante de ar para os cilindros de acordo com os requisitos de combustão (como a quantidade de potência gerada) (GUZZELLA; ONDER, 2009). Assim, a vazão mássica que passa pelo coletor de admissão é dada pela Equação 4.6.

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{cyl} \quad (4.6)$$

em que \dot{m}_{cyl} é o fluxo mássico de ar que sai do coletor de admissão para os cilindros do MCI.

Nessa modelagem, foi considerado que o coletor de admissão é adiabático, o qual, segundo Guzzella e Onder (2009), é uma aproximação razoável que introduz erros pequenos no modelo. Assim, utilizando a equação dos gases ideais, a equação diferencial para a pressão à jusante da válvula borboleta é expressa pela Equação 4.7 (ERIKSSON, 2007):

$$\dot{p}_j = \frac{R \theta_j}{V} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{cyl}) \quad (4.7)$$

em que θ_j é a temperatura a jusante da válvula borboleta; e V é o volume do coletor de admissão.

4.1.3 Cilindros

A vazão de ar (\dot{m}_{cyl}) que entra nos cilindros (Equação 4.8) pode ser calculada considerando a razão ar-combustível contante e estequiométrica. Também é possível considerar condições isotérmicas, assim, a temperatura no cilindro será a mesma que no coletor de admissão (ERIKSSON; NIELSEN, 2014).

$$\dot{m}_{cyl} = \frac{\eta_v V_d p_j \omega}{2 \pi N R \theta_j} \quad (4.8)$$

em que η_v é a eficiência volumétrica do MCI; V_d é o Volume Deslocado (VD) do motor; ω é a velocidade angular do MCI; e N é o número de revoluções por ciclo termodinâmico.

A eficiência volumétrica (Equação 4.9) varia com a velocidade angular do motor, ou seja, essa variável depende do ponto de operação do sistema. Os parâmetros da equação (δ_i) são determinados experimentalmente.

$$\eta_v = \delta_0 + \delta_1 \omega + \delta_2 \omega^2 \quad (4.9)$$

A vazão de combustível (Equação 4.10), então, é determinada a partir da vazão de ar que entra nos cilindros (Equação 4.8) e da razão ar-combustível estequiométrica (Equação 4.11), a qual é estimada segundo Cortez, Lora e Gomez. (2008).

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{cyl} \left(\frac{F}{A} \right) \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{F}{A} \right) = 0,3421 C_H + 0,1148 C_C - 0,043 C_O \quad (4.11)$$

em que \dot{m}_f é o fluxo mássico de combustível que entra nos cilindros do motor; $\left(\frac{F}{A} \right)$ é a razão estequiométrica entre combustível e ar; e C_H , C_C e C_O são, respectivamente, a composição percentual de hidrogênio, carbono e oxigênio no biogás.

4.1.4 Torque do Motor de Combustão Interna

A diferença de pressão gerada pelo processo de combustão induz a força provocada pelo pistão a qual é transmitida ao eixo de manivelas e, conseqüentemente, ao GS (ISERMANN, 2014). O torque do motor (o qual é transmitido ao GS) é resultante de vários torques, conforme descrito em Bastida, Ugalde-Loo e Abeysekera (2017), Guzzella e Onder (2009), Isermann (2014), Yun et al. (2013) pela Equação 4.12:

$$T_m = T_c - T_f - T_s \quad (4.12)$$

em que T_m é o torque do motor; T_c é o torque gerado pela combustão do biogás; T_f é o torque de fricção; e T_s é o torque de sucção.

O torque da combustão (Equação 4.13) considera a vazão de massa de combustível que queima no MCI (\dot{m}_f), seu Poder Calorífico Inferior (PCI) (H) e a eficiência da combustão (η_c).

$$T_c = \eta_c \dot{m}_f H \quad (4.13)$$

O PCI varia de acordo com a composição do biogás, conforme já mencionado. O valor dessa grandeza pode ser estimado de acordo com Cortez, Lora e Gomez (2008) pela Equação 4.14:

$$H = 1000 (1030 C_H + 339 C_C - 109 C_O) \quad (4.14)$$

Já a eficiência da combustão (Equação 4.15) depende de parâmetros de projeto do MCI, além do ponto de operação do sistema:

$$\eta_c = 0,775 \left[1 - \frac{1}{r_c^\gamma - 1} \right] \quad (4.15)$$

em que r_c é a razão de compressão do MCI.

O torque de fricção (Equação 4.16) é devido ao amortecimento do grupo motogerador e é dependente da velocidade angular do equipamento:

$$T_f = B \omega \quad (4.16)$$

em que B é o amortecimento do grupo motogerador.

Por fim, o torque de sucção (Equação 4.17) é relacionado com o trabalho realizado pelo MCI para admitir o ar do coletor de admissão para dentro dos cilindros:

$$T_s = (p_m - p_j) \frac{V_d}{4 \pi} \quad (4.17)$$

4.1.5 Dinâmica do Movimento Rotacional

A dinâmica rotacional é dominante em um MCI. Pode-se modelar a velocidade angular do motor utilizando a segunda lei de Newton para o movimento rotacional (ERIKSSON, 2007):

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (T_m - T_l) \quad (4.18)$$

em que T_l é o torque devido a carga elétrica e é função da rotação do MCI, como expresso pela Equação 4.19:

$$T_l = \frac{P_e}{\omega \eta_e} \quad (4.19)$$

em que P_e é a potência elétrica; e η_e é a eficiência da conversão da energia mecânica em elétrica.

4.1.6 Modelagem

A partir das equações matemáticas que descrevem cada estágio do grupo motogerador, é possível juntar essas equações e obter um sistema de duas equações diferenciais, expresso pelas Equações 4.20 e 4.21:

$$\dot{p}_j = \left[(\beta_3 \alpha^3 + \beta_2 \alpha^2 + \beta_1 \alpha) (1 - \cos \alpha) \frac{\pi D^2}{4} \frac{p_m}{R \theta_m} f - (\delta_0 + \delta_1 \omega + \delta_2 \omega^2) \frac{V_d}{2 \pi N R \theta_m} p_m \omega \right] \frac{R \theta_m}{V} \quad (4.20)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \left[\frac{\eta_c \eta_e V_d H \left(\frac{F}{A} \right)}{2 \pi N R \theta_j} (\delta_0 + \delta_1 \omega + \delta_2 \omega^2) p_j - B \omega - (p_m - p_j) \frac{V_d}{4 \pi} - \frac{P_e}{\omega \eta_e} \right] \quad (4.21)$$

4.1.7 Energia Produzida

Conforme já dito, o GS produz energia elétrica a partir da energia mecânica fornecida pelo MCI. A modelagem do GS é obtida baseado nos sistemas de referência da máquina síncrona, no qual o eixo q é 90° a frente do eixo d em relação ao sentido de rotação (ROLAN et al., 2009).

Supondo um GS trifásico com três enrolamentos de armadura idênticos, distribuídos simetricamente ao redor do entreferro e um enrolamento de campo, e com um enrolamento do amortecedor. Normalmente, os enrolamentos de armadura são colocados no estator e os enrolamentos de campo e de amortecimento no rotor. No entanto, há casos em que enrolamentos de armadura são colocados no rotor e enrolamentos de campo no estator (o excitador não possui enrolamentos de amortecedor). Isso não afeta a abordagem da modelagem do GS, uma vez que apenas o movimento relativo entre os enrolamentos do estator e do rotor é importante (JADRIC, 1998).

A fim de simplificar a modelagem apresentada nesse trabalho, algumas suposições foram consideradas (JADRIC; FRANCIC, 1997):

- Todos os enrolamentos no GS produzem uma força magnetomotriz senoidal;
- A permeabilidade do ferro no GS é infinita. Isso é equivalente a negligenciar todos os efeitos devido à saturação magnética e ao fluxo marginal;
- O projeto do rotor é a única causa para a assimetria magnética da máquina;
- O valor local da densidade de fluxo magnético é obtido pela multiplicação dos valores locais de força magnetomotriz e de condutividade magnética. O terceiro harmônico da densidade do fluxo magnético resultante dessa multiplicação é desprezado, de acordo com a primeira consideração.

Os erros introduzidos por essas suposições são normalmente pequenos o suficiente para serem insignificantes, principalmente, do ponto de vista do desempenho dinâmico da máquina (JADRIC, 1998).

A abordagem utilizada nessa dissertação considera as correntes como as variáveis independentes das equações as quais descrevem o funcionamento dinâmico do GS. As equações são obtidas a partir da 2ª lei de Kirchoff (também conhecida como lei das malhas) para cada enrolamento, ou seja, equipara-se a tensão no terminal do enrolamento à soma das quedas de tensão resistivas e indutivas no enrolamento (KRAUSE et al., 2002).

Para calcular a queda de tensão indutiva através de um enrolamento, é necessário avaliar o fluxo magnético total associado ao enrolamento. Isso é alcançado por meio de uma matriz de indutância, que relaciona todas as ligações de fluxo dos enrolamentos com as correntes de todos os enrolamentos. Quando isso é feito para uma máquina síncrona de pólo saliente, é obtida uma matriz de indutância dependente da posição do rotor, devido à sua assimetria magnética. Então, pode-se alterar o sistema de referência no qual as variáveis elétricas e magnéticas do GS estão expressas a fim de solucionar essa dependência da matriz de indutância na posição do rotor. O referencial comumente adotado para a solução desse problema é o dq (eixo direto e eixo em quadratura) (JADRIC, 1998).

O modelo matemático da armadura do GS no referencial dq é dado por Boldea (2015), Krause et al. (2002), conforme expresso pelas Equações 4.22 e 4.23:

$$v_d = -R_s i_d - \omega \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (4.22)$$

$$v_q = -R_s i_q + \omega \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (4.23)$$

em que R_s é a resistência da fase da armadura; i_d e i_q são, respectivamente, as correntes terminal da armadura dos eixos d e q ; ψ_d e ψ_q são, respectivamente, os fluxos total da armadura dos eixos d e q .

Os fluxos totais da armadura nos eixos d e q são, respectivamente, expressos pelas Equações 4.24 e 4.25 (JADRIC; BOROJEVIC; JADRIC, 2000):

$$\psi_d = -(L_{ls} + L_{md}) i_d + L_{md} (i_{fd} + i_{kd}) \quad (4.24)$$

$$\psi_q = -(L_{ls} + L_{mq}) i_q + L_{mq} i_{kd} \quad (4.25)$$

em que L_{ls} é a indutância de fuga da fase da armadura; L_{md} e L_{mq} são, respectivamente, as indutâncias de acoplamento dos eixos d e q ; i_d e i_q são, respectivamente, as correntes terminal da armadura dos eixos d e q ; i_{kd} e i_{kq} são, respectivamente, as correntes de enrolamento do amortecedor dos eixos d e q ; e i_{fd} é a corrente terminal do enrolamento de campo.

Assim, as Equações 4.22 e 4.23 podem ser reescritas, resultando nas Equações 4.26 e 4.27:

$$v_d = -R_s i_d - \omega \psi_q - (L_{ls} + L_{md}) \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (4.26)$$

$$v_q = -R_s i_q + \omega \psi_d - (L_{ls} + L_{mq}) \frac{di_q}{dt} + L_{mq} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (4.27)$$

As equações de campo e do amortecedor do GS são expressas por Jadric, Borojevic e Jadric (2000) de acordo com as Equações 4.28, 4.29 e 4.30:

$$v_{fd} = R_{fd} i_{fd} - L_{md} \frac{di_d}{dt} + (L_{lfd} + L_{md}) \frac{di_{fd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (4.28)$$

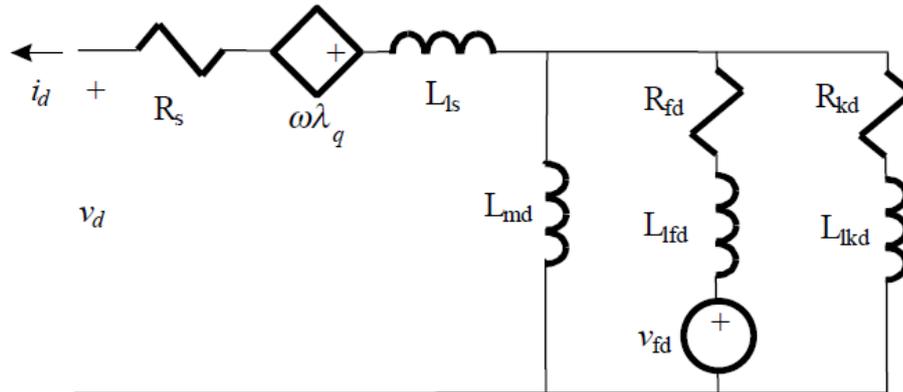
$$0 = R_{kd} i_{kd} - L_{md} \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} + (L_{lkd} + L_{md}) \frac{di_{kd}}{dt} \quad (4.29)$$

$$0 = R_{kq} i_{kq} - L_{mq} \frac{di_q}{dt} + (L_{lkq} + L_{mq}) \frac{di_{kq}}{dt} \quad (4.30)$$

em que R_{fd} é a resistência de enrolamento de campo; R_{kd} e R_{kq} são, respectivamente, as resistências de enrolamento de amortecimento dos eixos d e q ; i_d e i_q são as correntes terminais da armadura dos eixos d e q , respectivamente; L_{lfd} é a indutância de fuga no enrolamento de campo; L_{lkd} e L_{lkq} são, respectivamente, as indutâncias de vazamento do enrolamento do amortecedor dos eixos d e q .

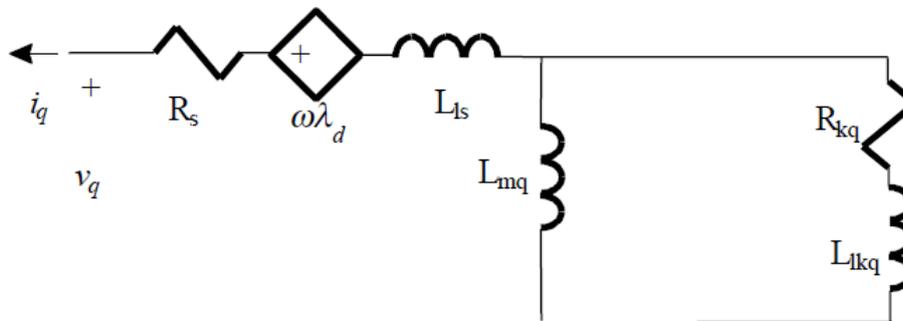
Os circuitos equivalentes do GS no sistema de referência dq são mostrados nas Figuras 22 e 23. A variável mecânica, ω , é obtida a partir da modelagem do grupo motogerador, cujos resultados estão expressos na Subseção 4.1.6.

Figura 22 – Circuito equivalente do eixo d do GS



Fonte: Jadric (1998).

Figura 23 – Circuito equivalente do eixo q do GS



Fonte: Jadric (1998).

4.2 Linearização do Modelo

A modelagem de grupos motogeradores a biogás obtida neste trabalho é composta por um sistema não linear de equações diferenciais. Entretanto, para o estudo de sistemas de controle da válvula borboleta, faz-se necessário a linearização das equações mecânicas presentes nessa modelagem (Equações 4.20 e 4.21). A linearização por expansão da série de Taylor apresenta-se como uma técnica adequada para esse tipo de análise e não representa perdas significativas para o modelo, podendo ser utilizada no projeto de controladores para

aplicações semelhantes à proposta neste trabalho (BASTIDA; UGALDE-LOO; ABEYSEKERA., 2017).

Apenas as equações mecânicas (expressas na Subseção 4.1.6) são linearizadas, pois os esquemas de controle propostos nessa dissertação são apenas para regular a velocidade angular do equipamento de acordo com a carga requerida e a composição do biogás queimado. Ou seja, nesse trabalho, não é proposto sistema de controle para regular diretamente a tensão de saída do GS, mas, conforme é comentado (Seção 5), os controles propostos interferem indiretamente na tensão de saída do GS.

O sistema linearizado contém uma entrada, α , e uma saída, ω , como mostrado na Figura 24. Vale resaltar que a linearização do modelo é utilizada apenas para fins de otimização dos esquemas de controle, enquanto que os desempenhos dos controladores são avaliados no ambiente Simulink do MATLAB, utilizando o modelo completo e sem linearização exposto na Figura 24.

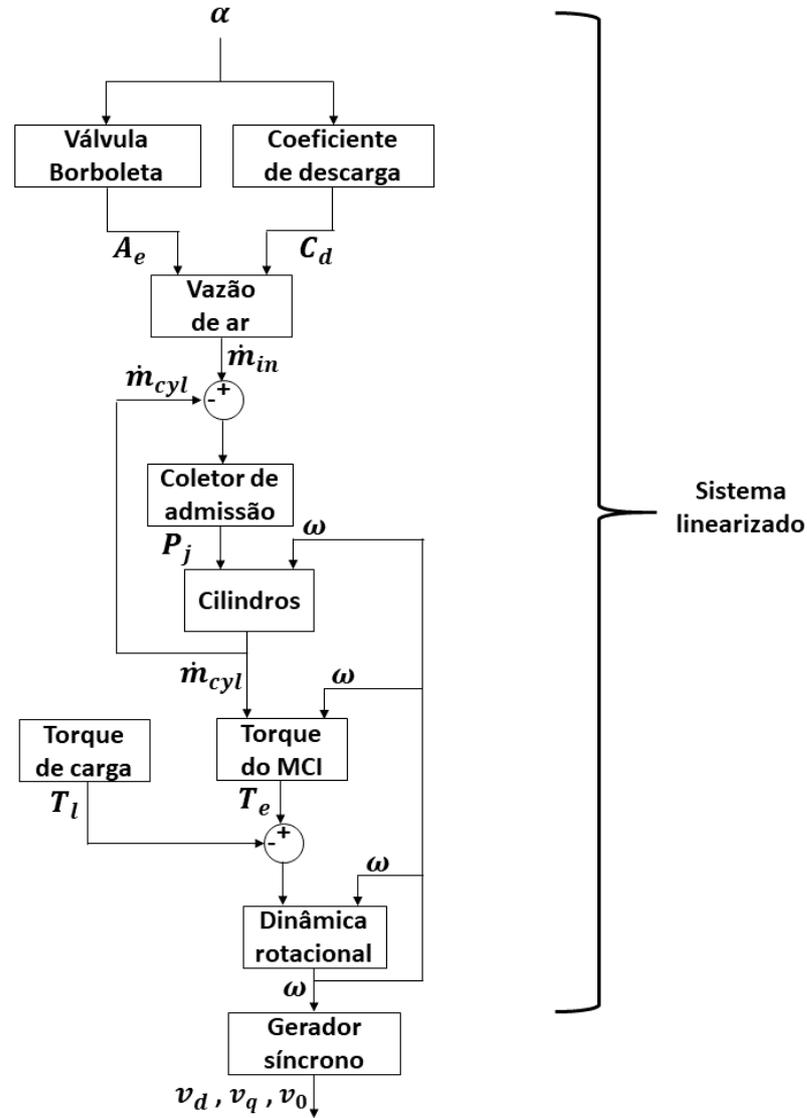
Conforme já explicado, só as equações mecânicas são linearizadas (Equação 4.20 e 4.21). Essas equações diferenciais são reescritas com o auxílio de constantes intermediárias, resultando nas Equações 4.31 e 4.32:

$$\dot{p}_j = (\varepsilon_1 \alpha^3 + \varepsilon_2 \alpha^2 + \varepsilon_3 \alpha) (1 - \cos \alpha) + (\varepsilon_4 + \varepsilon_5 \omega + \varepsilon_6 \omega^2) p_j \omega \quad (4.31)$$

$$\dot{\omega} = (\lambda_1 + \lambda_2 \omega + \lambda_3 \omega^2) p_j - \lambda_4 \omega + \lambda_5 \quad (4.32)$$

As as constantes intermediárias ε_i e λ_i são provenientes do desenvolvimento da modelagem já explicitada, resultando na combinação de vários parâmetros apresentados ao longo do modelo matemático (Tabela 5). Cada ponto de operação diferente estudado nesse trabalho é representado por diferentes constantes, gerando um comportamento diferente para cada condição de funcionamento do grupo motogerador.

Figura 24 – Modelagem do grupo motogerador



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

A linearização do sistema de equações composto pelas Equações 4.31 e 4.32 usando a expansão de série de Taylor é dada pelas Equações 4.33 e 4.34:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{p}_j \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_j} & \frac{\partial f_1}{\partial \omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_j} & \frac{\partial f_2}{\partial \omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_j \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} \end{bmatrix} [\Delta \alpha] = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_j \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} [\Delta \alpha] \quad (4.33)$$

$$\Delta y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta p_j \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

As funções f_1 e f_2 referem-se às Equações 4.31 e 4.32, respectivamente. Além disso, no modelo linearizado, são considerados os valores das variáveis p_j e ω no regime permanente, isto é, quando as variações em relação ao tempo são zero.

Na Tabela 5 são mostrados os valores das constantes intermediárias definidas nas Equações 4.31 e 4.32. As constantes intermediárias a , b , c , d e e são provenientes das derivadas parciais.

Vale ressaltar também, que a saída do modelo linearizado é ω , enquanto a entrada é α . A matriz de transição de estados é dada pela Equação 4.35:

$$\begin{aligned} \phi(s) &= \left(sI - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_j} & \frac{\partial f_1}{\partial \omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_j} & \frac{\partial f_2}{\partial \omega} \end{bmatrix} \right)^{-1} = \begin{bmatrix} s-a & -b \\ -c & s-d \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \frac{1}{s^2 - (a+d)s + (ad-bc)} \begin{bmatrix} s-d & b \\ c & s-a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Por fim, essa representação no espaço de estados pode ser apresentado por um modelo de Função de Transferência (FT), conforme exposto na Equação 4.36:

$$\begin{aligned} G(s) &= [0 \quad 1] \phi(s) \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} \end{bmatrix} = [0 \quad 1] \frac{1}{s^2 - (a+d)s + (ad-bc)} \begin{bmatrix} s-d & b \\ c & s-a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{e}{s^2 - (a+d)s + (ad-bc)} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Essa FT obtida a partir do modelo linearizado retrata a modelagem de acordo com o ponto de operação escolhido. Nesse estudo, as funções de transferência para diferentes pontos são usadas para o ajuste do controle PID, o qual, conforme é mostrado mais a frente, é utilizado nos esquemas de controle para regular a válvula borboleta do grupo motogerador a biogás.

Tabela 5 – Constantes intermediárias

Constante	Valor
ε_1	$\beta_3 \frac{R \theta_m \pi D^2}{V} f$
ε_2	$\beta_2 \frac{R \theta_m \pi D^2}{V} f$
ε_3	$\beta_1 \frac{R \theta_m \pi D^2}{V} f$
ε_4	$\delta_0 \frac{R \theta_m}{V} \frac{V_d}{2 \pi N R \theta_m}$
ε_5	$\delta_1 \frac{R \theta_m}{V} \frac{V_d}{2 \pi N R \theta_m}$
ε_6	$\delta_2 \frac{R \theta_m}{V} \frac{V_d}{2 \pi N R \theta_m}$
λ_1	$\delta_0 \frac{1}{J} \frac{\eta_c \eta_e V_d H \left(\frac{F}{A}\right)}{2 \pi N R \theta_j} + \frac{V_d}{4 \pi}$
λ_2	$\delta_1 \frac{1}{J} \frac{\eta_c \eta_e V_d H \left(\frac{F}{A}\right)}{2 \pi N R \theta_j}$
λ_3	$\delta_2 \frac{1}{J} \frac{\eta_c \eta_e V_d H \left(\frac{F}{A}\right)}{2 \pi N R \theta_j}$
λ_4	B
λ_5	$-p_m \frac{V_d}{4 \pi} - \frac{P_e}{\omega \eta_e}$
a	$\varepsilon_4 \omega_s + \varepsilon_5 \omega_s^2 + \varepsilon_6 \omega_s^3$
b	$(\varepsilon_4 + 2 \varepsilon_5 \omega_s + 3 \varepsilon_6 \omega_s^2) p_{j,s}$
c	$\lambda_1 + \lambda_2 \omega_s + \lambda_3 \omega_s^2$
d	$\lambda_2 p_{j,s} + 2 \lambda_3 p_{j,s} \omega_s - \lambda_4$
e	$\text{sen } \alpha (\varepsilon_1 \alpha^3 + \varepsilon_2 \alpha^2 + \varepsilon_3 \alpha) - (\text{cos } \alpha - 1)(3 \varepsilon_1 \alpha^2 + 2 \varepsilon_2 \alpha + \varepsilon_3)$

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

4.3 Ajuste do Controlador Proporcional Integral e Derivativo

Nessa dissertação, são avaliados o desempenho de quatro sistemas de controle, todos eles possuem pelo menos um controlador PID, conforme explicado mais detalhadamente na Seção 4.4. Os controles PID são ajustados utilizando a técnica de PSO e também pela ferramenta de tune do ambiente *Simulink* do Matlab. Para tal, o sistema composto pelo controlador PID e pelo grupo motogerador (representado pela linearização obtida na Seção 4.2) tem sua resposta avaliada por meio de funções-objetivo, de modo que o conjunto dos três

parâmetros do controle PID o qual fornecer o melhor valor da função-objetivo são os parâmetros considerados ótimos. Em outras palavras, os termos do PID ajustado são aqueles que proporcionem o melhor valor da função-objetivo, podendo esse valor ser o máximo ou o mínimo possível (dependendo se a função-objetivo é um problema de minimização ou de maximização).

Conforme já mencionado, as funções objetivo comumente utilizadas são: Integral do Erro Quadrático ou *Integral Square Error* (ISE), Integral do Erro Absoluto ou *Integral Absolute Error* (IAE), Integral do Erro Absoluto Multiplicado pelo Tempo ou *Integral Time Absolute Error* (ITAE) e Integral do Erro Quadrático Multiplicado pelo Tempo ou *Integral Time Square Error* (ITSE) (JAGATHEESAN *et al.*, 2017; ALOMOUSH, 2010). Nesse estudo, apenas duas funções-objetivo são utilizadas: ITAE (Equação 4.37), a qual garante o mais baixo tempo de acomodação (JAGATHEESAN *et al.*, 2017) e ISE (Equação 4.38), cujo tempo de subida é o menor (PANDA; SAHU; MOHANTY, 2012). Ambas funções-objetivo são problemas de minimização, ou seja, $pbest_{j,g}$ e $gbest_g$ são, respectivamente, os menores valores pessoal e global do ITAE e do ISE.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4.37)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (4.38)$$

em que $e(t)$ é o erro do sinal de saída de um controle *feedback*, o qual é definido como a diferença entre a resposta do sistema e o sinal de referência do controle (*setpoint*).

4.4 Sistemas de Controle Propostos

Neste trabalho, são avaliados os desempenhos de quatro controladores, tais sistemas de controle são referenciados neste trabalho da seguinte maneira:

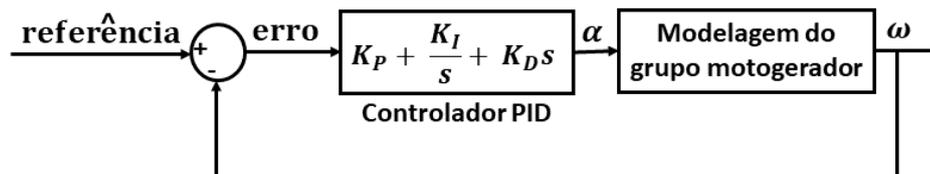
- PID-CONVENCIONAL: PID, amplamente utilizado no mercado para controle de diversos sistemas e equipamentos, dentre eles grupo motogeradores;

- PID-FUZZY-PARALELO: PID e controlador baseado em LF operando em paralelo. Esse esquema de controle é proposto pelo autor;
- PID-FUZZY-CASCATA: PID com seus parâmetros atualizados em tempo real por um controlador baseado em LF. Esse esquema de controle é proposto por Chen e Wu (2017);
- DOIS-PIDS: Operação paralela de dois PIDs sendo controlados por controlador baseado em LF. Esse esquema de controle também é proposto pelo autor.

4.4.1 Controlador 1: PID-CONVENCIONAL

O controle convencional de grupo motogeradores possui uma entrada, erro entre a velocidade angular (variável medida) e a referência (*setpoint*), e uma saída, o ângulo de abertura da válvula borboleta, como mostrado na Figura 25. Os coeficientes do PID foram ajustados utilizando a ferramenta *tune* do ambiente *Simulink* do Matlab e também pelo método PSO, conforme já mencionado na Seção 4.3. A função-objetivo utilizada nesse controle por essa técnica de otimização é a ITAE (Equação 4.37) a fim de garantir um menor tempo de acomodação ao sistema, ou seja, uma estabilização mais rápida.

Figura 25 – Controlador PID



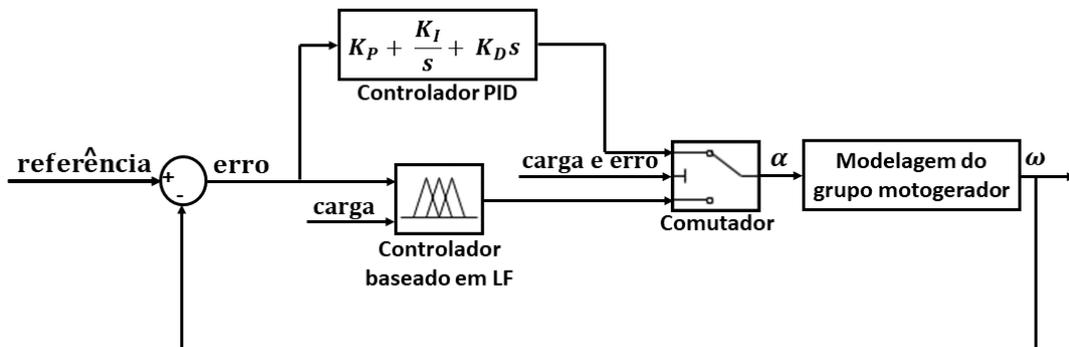
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

É difícil o ajuste adequado do PID para todos os cenários possíveis de carga e de composição do biogás, assim, deve-se optar por uma situação de operação que seja intermediária aos cenários utilizados. Como os casos simulados (Seção 4.5) variam a carga e a porcentagem de metano no biogás de 70 a 100 %, os parâmetros do PID foram ajustados para a condição de 85 % de carga e 85 % de metano no biogás.

4.4.2 Controlador 2: PID-FUZZY-PARALELO

Nesse controle (Figura 26), o PID é o mesmo do PID-CONVENCIONAL (tendo seus parâmetros ajustados de dois modos), enquanto o controle baseado em LF (Figura 27) possui duas entradas, a carga requerida pelo GS e o erro entre a velocidade angular e a referência, e uma saída, o ângulo de abertura da válvula borboleta. Desse modo, o controle por LF é uma combinação de característica *feedback*, erro como entrada, e *feedforward*, carga demandada.

Figura 26 – Controladores PID e baseado em LF operando paralelamente

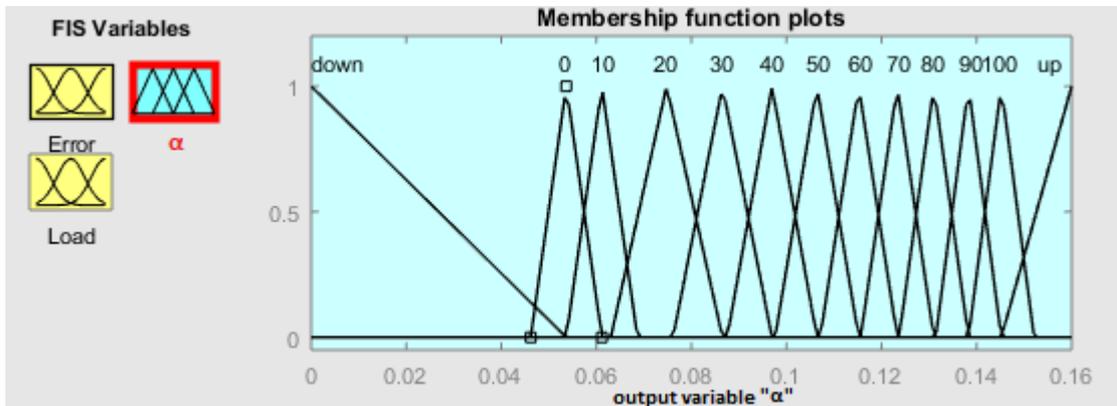


Fonte: elaborado pelo autor (2019)

No controlador baseado em LF, as entradas erro e carga são divididas, respectivamente, em cinco (*very slow*, *slow*, *right*, *fast* e *very fast*) e onze (0 a 100 %) regiões lineares. Já a saída, α , é composta por treze (*down*, *up* e de 0 a 100 %) regiões lineares. Os limites de cada região foram determinados de modo que as regiões se cruzassem e uma terminasse onde a outra é máxima, conforme pode ser visto na Figura 27. Os limites das treze regiões da saída, α , foram determinados a partir dos valores dessa variável no regime estacionário.

Para entender como funcionam as regras desse controlador por LF, supõe-se que a carga requerida pelo GS é 50 % da carga nominal do MCI. Se o erro estiver na região *very slow*, *slow*, *right*, *fast* ou *very fast*, a saída será, respectivamente, relacionada a região *up*, 60 %, 50 %, 40 % e *down*.

Figura 27 – Controlador fuzzy utilizado no PID-FUZZY-PARALELO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

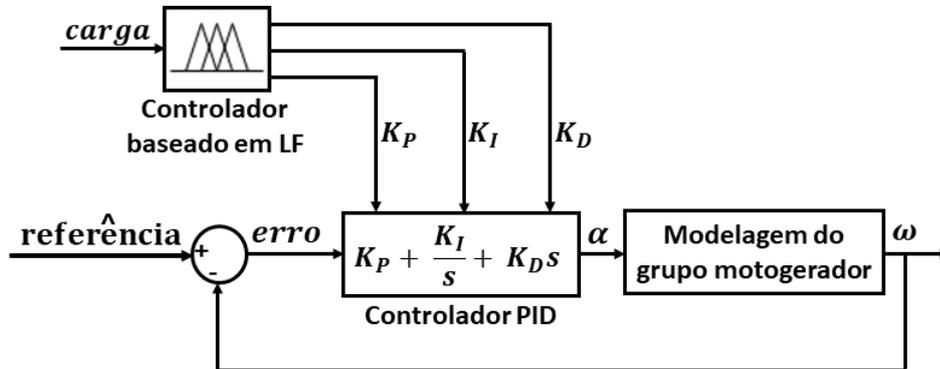
A condição para substituição do controlador (de PID para LF e vice-versa) é tempo ou mudança abrupta de uma das duas entradas. Quando há uma variação repentina da carga, o sistema passa a ser controlado pela LF até que decorram 0,5 s sem mudanças abruptas nas entradas, então, o sistema passa a ser controlado pelo PID. O mesmo acontece quando há uma alteração brusca do erro (por exemplo, causado por uma mudança na composição do biogás), o sistema é controlado pela LF até 0,5 s sem variações severas. Essa condição de troca dos controladores foi proposta com o intuito de amenizar a transição durante a mudança de situações de operação.

4.4.3 Controlador 3: PID-FUZZY-CASCATA

O controle baseado em LF no PID-FUZZY-CASCATA (Figura 28) possui apenas uma entrada, a carga requerida pelo GS, e três saídas, os coeficientes do PID. A entrada e as saídas são compostas cada um por onze (0 a 100 %) regiões lineares. Os limites de cada região foram determinados de modo que as regiões se cruzassem e uma terminasse onde a outra é máxima, conforme pode ser visto na Figura 29.

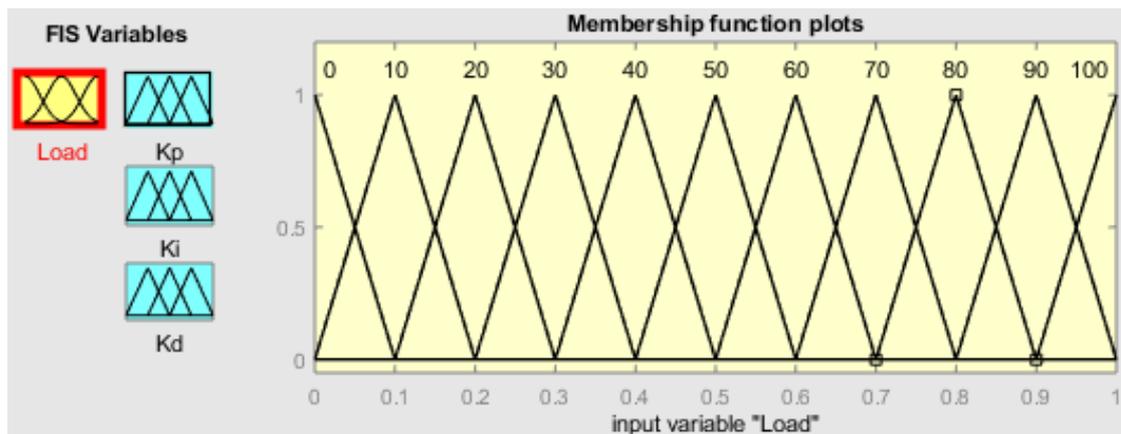
Por exemplo, se a carga demandada pelo GS for 43 % da carga nominal do MCI, então, a entrada será classificada dentro das regiões intituladas 40 e 50 %, assim, os valores dos coeficientes k_P , k_I e k_D serão provenientes de combinações lineares entre as duas regiões. Os valores das regiões das três saídas desse controlador por LF foram determinadas a partir do ajuste do controlador PID para cada cenário de carga.

Figura 28 – Controlador PID com os termos atualizados em tempo real pela LF



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 29 – Controlador fuzzy utilizado no PID-FUZZY-CASCATA



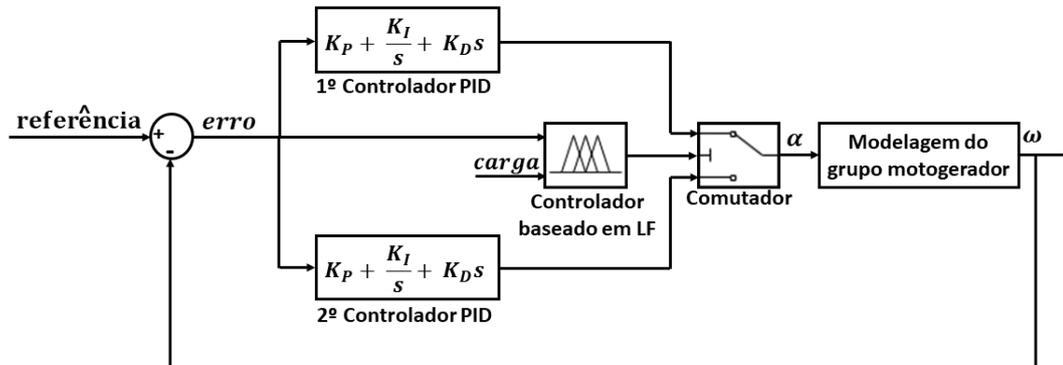
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

4.4.4 Controlador 4: DOIS-PIDS

Por fim, há dois controles PID operando em paralelo no sistema de controle DOISPIDS (Figura 30), sendo ambos comutados por um controlador baseado em LF. Foi proposto dois PIDs, o primeiro com o intuito de atuar ao ligar o motor e quando há grandes variações de erro, enquanto o segundo seja aplicado em variações de erro menores a fim de zerar o erro residual.

Esse segundo controlador PID é igual ao PID usado nos outros três sistemas de controle, sendo ajustado por dois métodos diferentes: o primeiro utilizando a ferramenta de *tune*

Figura 30 – Controladores PID operando paralelamente sendo comutados pela LF



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

do ambiente *Simulink* do Matlab (com as configurações em *default*) e o segundo otimizando os parâmetros pela técnica do PSO com a função objetivo ITAE (Equação 4.37).

Já o primeiro PID será ajustado também por dois métodos diferentes, de maneira similar ao primeiro PID. A primeira opção de ajuste também é utilizando a ferramenta *tune* do ambiente *Simulink* do Matlab, mas de maneira que a resposta possua comportamento transitório mais agressivo e tempo de resposta mais rápido (configurações que podem ser alteradas no *tune*). Enquanto a segunda maneira de ajustar os parâmetros desse primeiro PID é aplicando a otimização por PSO só que utilizando a função objetivo ISE (Equação 4.38), pois possui tempo de subida menor como já explicitado na Seção 4.3.

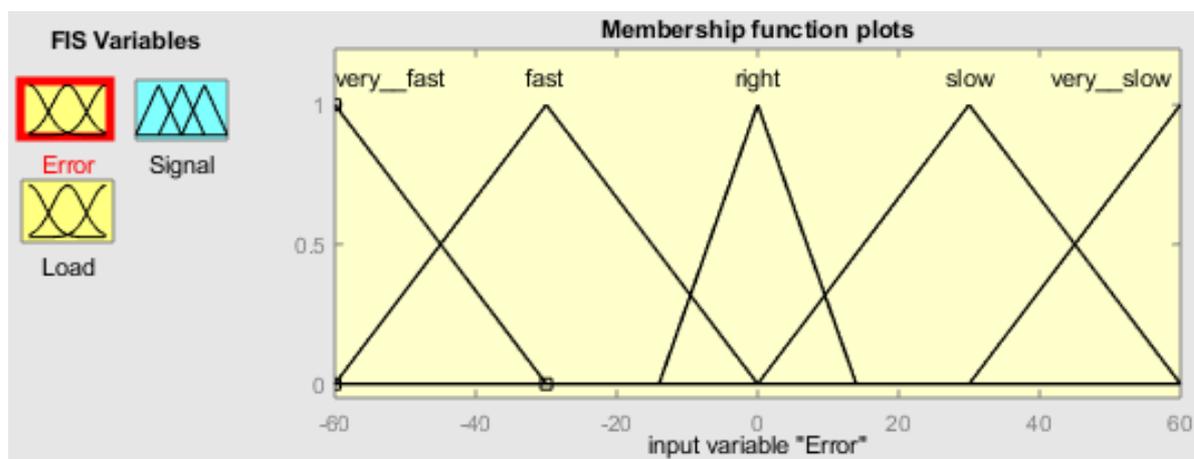
Esse dois PIDs são comutados de acordo com o controlador baseado em LF (Figura 31), o qual possui duas entradas, carga requerida pelo GS e erro entre a velocidade angular e a referência (*setpoint*), e uma saída, sinal o qual decide qual controlador atuará no sistema. As entradas erro e carga são divididas, respectivamente, em cinco (*very slow, slow, right, fast, very fast*) e onze (0 a 100 %) regiões lineares, enquanto a saída é dividida em duas regiões lineares, uma selecionando o primeiro PID para atuar no sistema e outra optando pelo segundo PID.

4.5 Cenários Simulados

Os quatro controladores, já explicados na Seção 4.4, foram avaliados em três cenários, os quais são referenciados neste trabalho da seguinte maneira:

- VAR-CARGA: Variação de carga abrupta (variação degrau), enquanto a composição de biogás permanece constante;
- VAR-BIO: Variação da composição de biogás de maneira abrupta (variação degrau) com carga constante;
- VAR-CARGA-BIO: Variação de carga e da composição do biogás simultaneamente.

Figura 31 – Controlador fuzzy utilizado no DOIS-PIDS



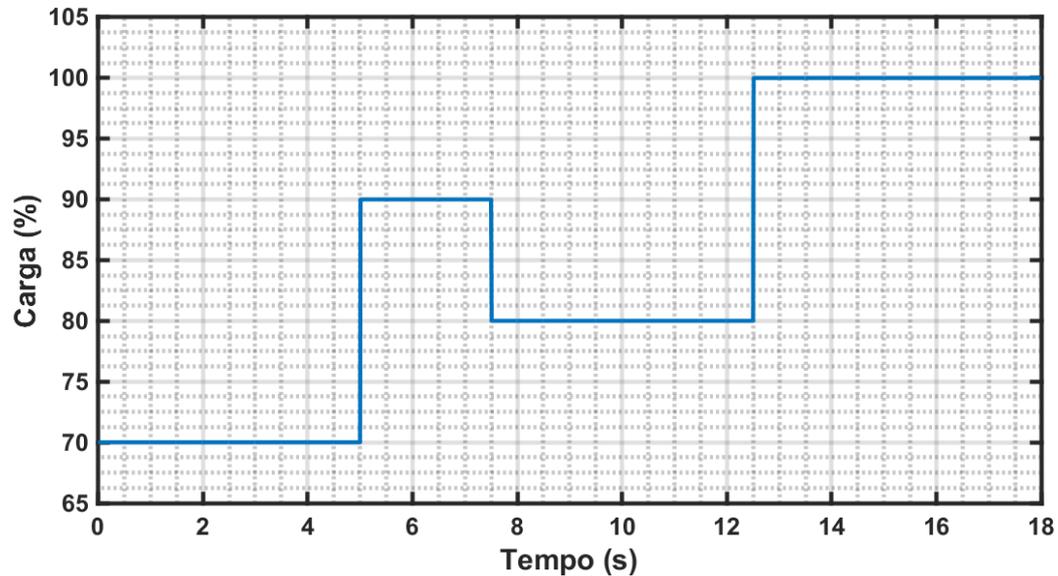
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

4.5.1 Cenário de Variação de Carga: VAR-CARGA

Como se sabe, a carga elétrica demandada por determinado sistema está continuamente mudando (ALOMOUSH, 2010), podendo assim aumentar ou diminuir a demanda abruptamente. No caso do grupo motogerador estudado nesse trabalho, o equipamento será conectado diretamente à rede de transmissão, assim, espera-se que não haja variações abruptas da demanda de energia, conforme poderia ser observado no caso de um sistema *off-grid*. Entretanto, optou-se por simular uma condição drástica de funcionamento, a fim de testar os limites de operação do equipamento.

O cenário de variação de carga está exposto na Figura 32. No gráfico pode-se observar que os valores de carga são expressados em percentual, essa porcentagem é referente à carga nominal do MCI. Como já mencionado (Seção 4.6), nessa dissertação utiliza-se o motor Volkswagen (VW) Alta Performance (AP) 2.0, cuja potência nominal é de 67 kW ao operar em 3600 rpm. Ou seja, se o gráfico mostra 70 % de carga, por exemplo, equivale a 47 kW de potência requerida pelo GS.

Figura 32 – Cenário de variação de carga no VAR-CARGA



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Para esse cenário de variação de carga, a composição do biogás é considerada constante. Como o biogás é majoritariamente composto por metano e dióxido de carbono (já mencionado no Capítulo 1), é considerado em todas as simulações que esse combustível é constituído apenas desses dois componentes. No caso desse primeiro cenário de simulação, optou-se por fixar a composição de biogás em 85 % de CH_4 e 15 % de CO_2 .

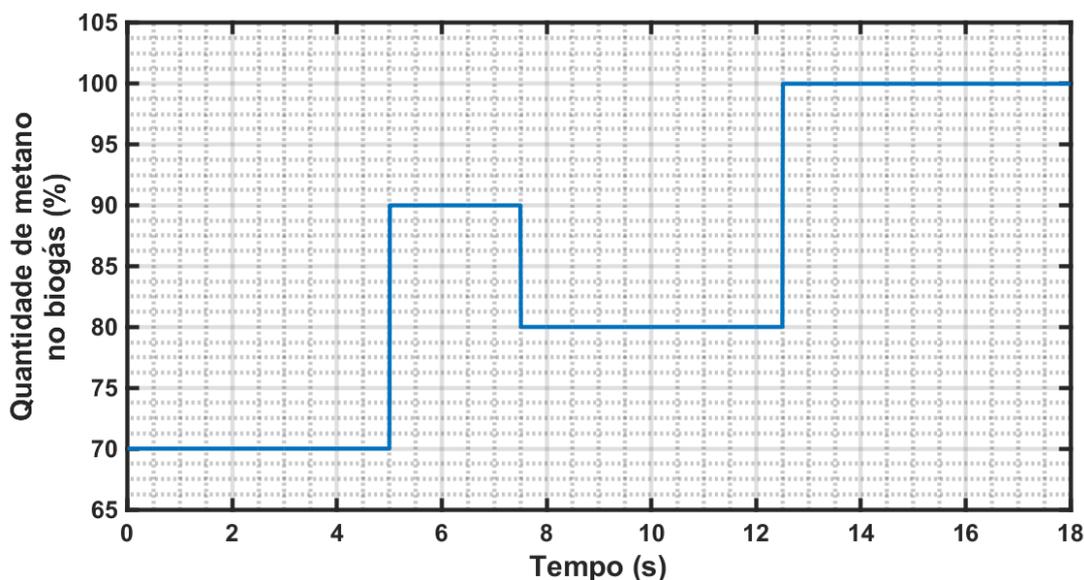
4.5.2 Cenário de Variação da Composição do Biogás: VAR-BIO

A composição do biogás depende, principalmente, do tipo de biomassa utilizado (RAZBANI; MIRZAMOHAMMAD; ASSADI, 2011), mas também de outros fatores, como pH, temperatura, entre outros. Assim como no caso da variação de carga, a variação da composição de biogás não é comum, pois a produção desse combustível é um processo lento e, por isso é comum que o biogás seja armazenado em um balão de armazenamento de gás ou em cilindros, a fim de, posteriormente ser usado durante algumas horas, normalmente, nas horas de pico.

Entretanto, simula-se uma variação abrupta de biogás, apenas para analisar o funcionamento do grupo motogerador sob condições drásticas. O cenário de variação está

exposto na Figura 33. A carga requerida pelo GS é mantida constante em 85 % em todo esse segundo cenário de simulação.

Figura 33 – Cenário de variação da composição do biogás no VAR-BIO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

4.5.3 Cenário de Variação de Carga e da Composição do Biogás: VAR-CARGA-BIO

Entretanto, segundo a literatura, a produção do biogás de uma mesma matéria orgânica não varia abruptamente, mesmo que haja uma mudança brusca de temperatura, pH, ou outro fator. Em outras palavras, uma mudança no processo produtivo pode causar apenas uma variação lenta na composição do biogás (ALIBARDI; COSSU, 2015).

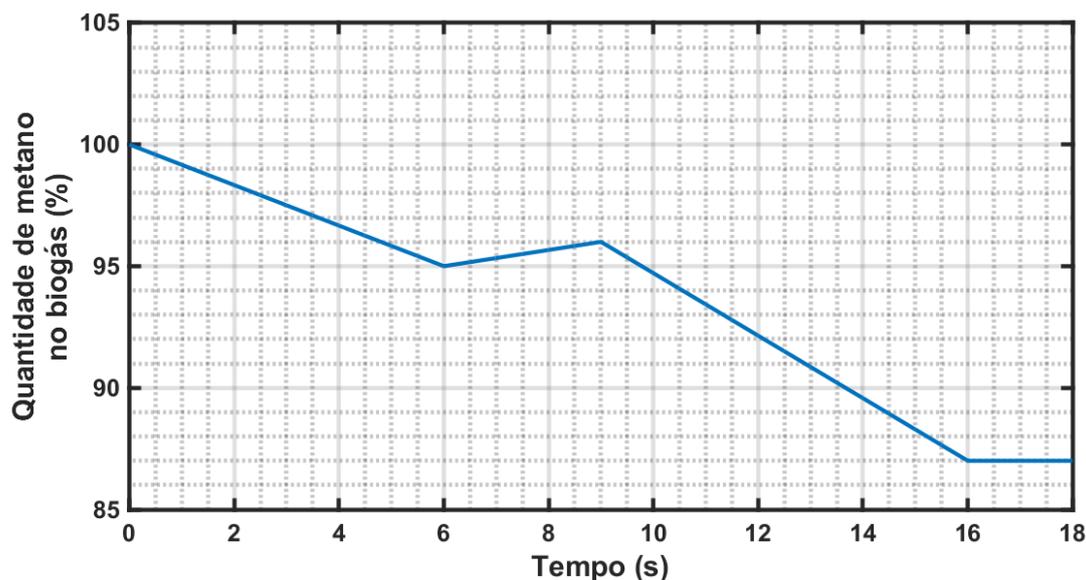
Além disso, normalmente, utiliza-se um gasômetro para armazenar o biogás antes dele ser utilizado em outro processo, como a queima em grupos motogeradores para produção de energia. Esse armazenamento no gasômetro favorece a homogeneização da composição do biogás.

Ou seja, é improvável que a composição desse combustível varie abruptamente durante a operação do grupo motogerador. Desse modo o cenário VAR-BIO (Seção 4.5.2) é irreal, servindo apenas para estudar os limites de operação do grupo motogerador.

Desse modo, testou-se um cenário mais realista e que ajudasse na análise dos limites de operação do equipamento. Nesse cenário é simulada a variação de carga e da composição do

biogás ao mesmo tempo. A mudança na carga é a mesma daquela simulada no VAR-CARGA (Figura 32), enquanto a alteração da proporção de metano nesse cenário (Figura 34) é mais suave do que aquela proposta no VAR-BIO (Figura 33).

Figura 34 – Cenário de variação da composição do biogás no VAR-CARGA-BIO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

4.6 Estudo de Caso

A faixa de rotação de um MCI varia de 0 a 7000 rpm, mas, de acordo com a aplicação do motor, há pontos ótimos de operação. No caso de um grupo motogerador, o MCI deve funcionar no ponto de torque máximo, o qual também fornece o menor consumo específico (conforme mostrado na Figura 5).

Nesse trabalho, é simulado o comportamento de um grupo motogerador constituído de dois componentes:

- Motor VW AP 2.0 com injeção eletrônica e potência de 90 kW;
- GS trifásico Kohlbach de 80 kVA.

No caso desse MCI, o torque máximo é de 191 Nm e é fornecido na faixa de 2800 a 3700 rpm. Já o GS deve ser acionado com uma velocidade angular de 1800 rpm para que a frequência da energia elétrica produzida esteja em 60 Hz, obedecendo as normas da ANEEL. Desse modo, uma caixa de engrenagens com redução de 2:1 foi acoplada entre o MCI e GS, de modo que aquele opere em 3600 rpm, enquanto este seja acionado em 1800 rpm.

Como já mencionado, o VW AP 2.0 tem uma potência máxima de 90 kW, mas conforme pode ser visto na Figura 5, no ponto de torque máximo, a potência do MCI não é a máxima. No caso desse motor na faixa de 2800 a 3700 rpm, a potência fornecida fica entre 55 a 70 kW, logo esse sistema de energia pode ser classificado como microgeração distribuída segundo as normas da ANEEL (ANEEL, 2012).

Nesse trabalho, é modelado o funcionamento dinâmico de um grupo motogerador a biogás (Seção 4.1), sendo a modelagem dependente de alguns parâmetros de acordo com o Motor de Combustão Interna (MCI) e o Gerador Síncrono (GS) utilizados. Alguns desses parâmetros foram obtidos com base em trabalhos experimentais e outros por meio das especificações do fabricante, conforme mostrados na Tabela 6. Tal tabela também mostra outros valores utilizados nessa dissertação os quais foram determinados pelo autor, por exemplo aqueles referentes a Otimização por Enxame de Partículas (PSO).

Conforme já explicado, o sistema é avaliado por meio do modelo mostrado na Figura 24 na Seção 4.2. Essa modelagem é implementada no ambiente Simulink do MATLAB para simular o desempenho dos controladores em diferentes cenários, como exposto na Figura 35.

Na Figura 35 é mostrado que o modelo contruído no MATLAB / Simulink é constituído de blocos do Simulink intitulados de *MATLAB Function*, o quais têm as equações provenientes da modelagem desenvolvida na Seção 4.1. Dentro desses blocos já estão definidas as constantes utilizadas no modelo, que estão expostas na Tabela 6. Também são utilizados blocos intitulados *Signal Builder* para simular a variação de carga e do Poder Calorífico Inferior (PCI) e a razão Ar-Combustível do biogás.

4.7 Variáveis de Resposta

A avaliação dos controladores é realizada analisando dois parâmetros de resposta do grupo motogerador: frequência e tensão de saída. Esses indicadores devem ficar dentro dos limites especificados pela ANEEL a fim de que o equipamento permaneça conectado à rede. No caso da frequência, a faixa de operação normal é de 59,9 a 60,1 Hz, enquanto que, para a tensão, o intervalo é de 350 a 399 V (ANEEL, 2007). Esses limites são determinados considerando que a operação do grupo motogerador será 60 Hz e 380 V.

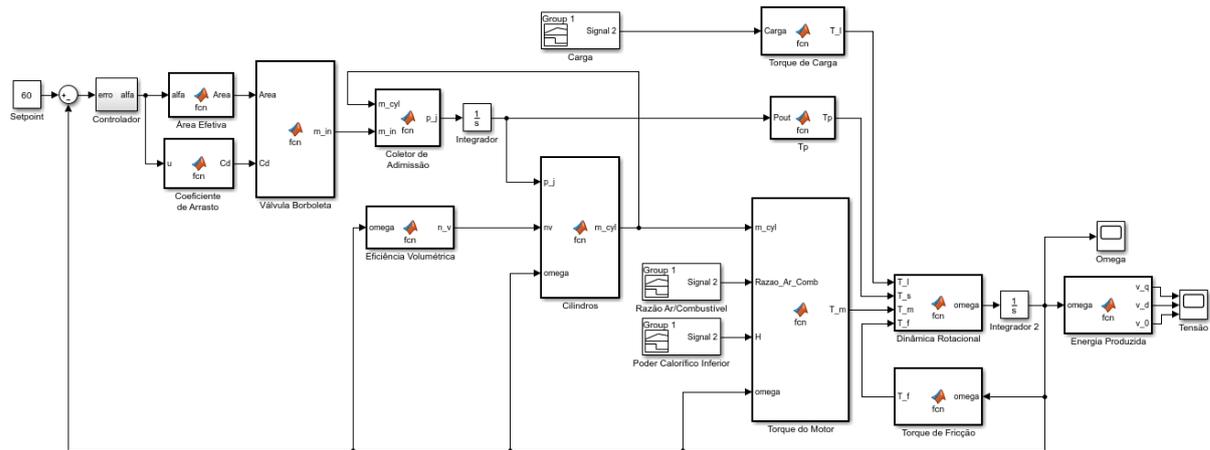
Tabela 6 – Especificações técnicas e parâmetros de operação

Variável	Valor	Unidade	Fonte
B	0,021	$N s$	Pereira (2003)
c_1	2	–	Autor
c_2	2	–	Autor
D	0,0825	m	Especificação do MCI
J	0,5	$kg m^2$	Pereira (2003)
L_{ls}	$3,0894 \cdot 10^{-4}$	H	Especificação do GS
L_{lfd}	$3,0712 \cdot 10^{-4}$	H	Especificação do GS
L_{lkd}	$4,9076 \cdot 10^{-4}$	H	Especificação do GS
L_{lkq}	$1,0365 \cdot 10^{-3}$	H	Especificação do GS
L_{md}	$3,2164 \cdot 10^{-3}$	H	Especificação do GS
L_{mq}	$9,7153 \cdot 10^{-4}$	H	Especificação do GS
m	3	–	Autor
n	10	–	Autor
N	2	–	Especificação do MCI
p_{amb}	101300	N/m^2	Autor
P_e	60	kW	Especificação do MCI
R	287,05	$J/kg K$	Autor
r_c	10	–	Especificação do MCI
R_{fd}	$5,9013 \cdot 10^{-4}$	ohm	Especificação do GS
R_{kd}	$1,19 \cdot 10^{-2}$	ohm	Especificação do GS
R_{kq}	$2,0081 \cdot 10^{-2}$	ohm	Especificação do GS
R_s	$2,9069 \cdot 10^{-2}$	ohm	Especificação do GS
θ_m	300	K	Autor
θ_j	300	K	Autor
V	0,0015	m^3	Especificação do MCI
V_d	0,001984	m^3	Especificação do MCI
W	0,7	–	Autor
β_1	0,2578	rad^{-1}	Mahmoudi (2015)
β_2	0,1313	rad^{-2}	Mahmoudi (2015)
β_3	0,0376	rad^{-3}	Mahmoudi (2015)
γ	1,4	–	Autor
δ_0	0,45	–	Eriksson e Nielsen (2014)
δ_1	$3,42 \cdot 10^{-3}$	s	Eriksson e Nielsen (2014)
δ_2	$-7,7 \cdot 10^{-6}$	s^2	Eriksson e Nielsen (2014)
η_e	0,88	–	Autor
η_{ign}	0,9	–	Autor

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Essas grandezas podem sair da faixa de operação normal caso haja alguma perturbação no sistema, entretanto deve retornar ao intervalo ótimo em um tempo máximo, caso contrário, o sistema de geração de energia deverá ser desconectado a fim de evitar danos à rede

Figura 35 – Modelo implementado no ambiente Simulink do MATLAB



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

de distribuição (ENEL, 2016). As faixas de operação com seus respectivos tempos de tolerância estão mostrados a seguir, tanto para a frequência (Tabela 7), quanto para a tensão (Tabela 8). No caso da tensão, a norma utiliza duas siglas que são: Tensão de Leitura (TL) e Tensão de Referência (TR).

Observa-se pela Tabela 7 que os limites inferior e superior para a frequência são, respectivamente, 56,5 e 66 Hz, os quais equivalem a um *undershoot* (US) de -5,83 % e *overshoot* (OS) igual a 10 %. Ou seja, se a frequência do grupo motogerador ultrapassar o valor de -5,83 % de US ou de 10 % de OS, o equipamento deve ser desconectado instantaneamente da rede.

Do mesmo modo, analisando a Tabela 8, constata-se que os limites inferior e superior para a tensão são, respectivamente, 330 e 403 V, que correspondem a -13 % de US e 6 % de OS. Assim, se a tensão for maior que 403 V ou menor que 330 V, o grupo motogerador deve ser imediatamente desconectado da rede de distribuição.

No Capítulo 5, é observado o desempenho dos quatro controladores em manter esses dois parâmetros dentro das especificações da ANEEL. Por exemplo, quando ocorrer um aumento da carga injetada na rede, será requisitado uma maior potência do MCI, logo, a válvula

borboleta abrirá mais a fim de que a vazão de ar e de combustível cresça e seja mantida a qualidade da energia produzida. Do mesmo modo quando ocorrer uma mudança na composição do biogás, por exemplo uma redução na proporção de metano nesse combustível acarretará uma diminuição do PCI e, então, a válvula borboleta abrirá mais a fim de que o MCI forneça a mesma potência ao GS.

Tabela 7 – Limites de variação da frequência

Faixa de frequência (Hz)	Tempo de desconexão (s)
$f \leq 56,5$	Instântaneo
$56,5 \leq f \leq 57,5$	5
$57,5 \leq f \leq 58,5$	10
$58,5 \leq f \leq 59,9$	30
$59,9 \leq f \leq 60,1$	Operação Normal
$60,1 \leq f \leq 62$	30
$62 \leq f \leq 63,5$	10
$63,5 \leq f \leq 66$	5
$f \geq 66$	Instântaneo

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Tabela 8 – Limites de variação da tensão

Faixa de tensão (% TR)	Tempo de desconexão (s)
$TL \leq 0,87$	Instântaneo
$TL \leq 0,87$	10
$0,92 \leq TL \leq 1,05$	Operação Normal
$1,05 \leq TL \leq 1,06$	10
$TL \geq 1,06$	Instântaneo

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

5 RESULTADOS

Nesse Capítulo são apresentados os resultados do trabalho. Na Seção 5.1 são mostrados os ganhos do controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) provenientes das duas técnicas de ajuste: utilizando o *tune* do MATLAB/Simulink e o método de Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Os limites das regiões lineares nos três controladores baseados em Lógica Fuzzy (LF) são apresentados na Seção 5.2. Uma análise utilizando os diagramas de Bode e de Nyquist para o sistema com e sem controle é apresentada na Seção 5.3. Os comportamentos da tensão e da frequência para os três cenários de simulação são apresentados nas Seções 5.4, 5.5 e 5.6. Por fim, na Seção 5.7 são apresentados os limites operacionais dos quatro controladores estudados nessa dissertação.

5.1 Valores dos Ganhos do Controlador Proporcional, Integral e Derivativo

O controlador PID é ajustado por dois métodos diferentes. Primeiramente, utilizou-se o *tune* do Simulink com as configurações padrões de sintonia do controlador e, alternativamente, empregou-se o PSO com a função objetivo Integral do Erro Absoluto Multiplicado pelo Tempo ou *Integral Time Absolute Error* (ITAE). Esse primeiro controlador PID foi utilizado nos quatro esquemas de controle estudados.

Em segundo, foram usados os mesmos dois métodos para ajuste de outro controlador PID. No *tune* do Simulink alterou-se as configurações padrões para que a resposta possua um comportamento transitório mais agressivo e tempo de resposta mais rápido. Já com o PSO utilizou-se a função objetivo Integral do Erro Quadrático ou *Integral Square Error* (ISE).

Na Tabela 9 são mostrados os valores dos ganhos para os quatro diferentes controladores PID. O controlador 1 é o que utilizou ITAE e as configurações padrões do *tune* do Simulink. Enquanto o controlador 2 empregou o ISE como função objetivo do PSO e utilizou o *tune* com as configurações alteradas para um comportamento transitório mais agressivo.

5.2 Regiões Lineares do Controlador Baseado em Lógica Fuzzy

Como já explicado, foram utilizados três controladores baseados em LF diferentes. No PID-FUZZY-PARALELO o controlador fuzzy tem duas entradas, erro e carga, e uma saída,

Tabela 9 – Valores dos ganhos do controlador PID

	Simulink		PSO	
	Controlador 1	Controlador 2	Controlador 3	Controlador 4
K_P	0,0079071	0,0071101	0,9122495	0,4074731
K_I	0,0137698	0,0119945	0,5107440	0,1804166
K_D	0,0010180	0,0008875	0,0029296	0,2432952

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

α . As regiões lineares para essas três variáveis são definidas na Tabela 10. As regiões são do tipo triangular, começando com pertinência zero, aumentando linearmente até a pertinência um, depois diminuindo linearmente até a pertinência zero novamente.

Tabela 10 – Regiões lineares do controlador baseado em LF
utilizado no PID-FUZZY-PARALELO

		Começo	Pico	Fim
Erro (Hz)	Very fast	-60	-60	-30
	Fast	-60	-30	0
	Right	-5	0	5
	Slow	0	30	60
	Very slow	30	60	60
Carga (%)	0 %	0	0	10
	10 %	0	10	20
	20 %	10	20	30
	30 %	20	30	40
	40 %	30	40	50
	50 %	40	50	60
	60 %	50	60	70
	70 %	60	70	80
	80 %	70	80	90
	90 %	80	90	100
α (rad)	Down	0	0	0,05401
	0 %	0,04712	0,05401	0,0609
	10 %	0,05401	0,0609	0,07447
	20 %	0,0609	0,07447	0,08617
	30 %	0,07447	0,08617	0,09654
	40 %	0,08617	0,09654	0,1066
	50 %	0,09654	0,1066	0,1147
	60 %	0,1066	0,1147	0,1228
	70 %	0,1147	0,1228	0,1304
	80 %	0,1228	0,1304	0,1377
	90 %	0,1304	0,1377	0,1446
Up	0,1446	0,16	0,16	

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

O controlador baseado em LF utilizado no PID-FUZZY-CASCATA possui uma entrada, carga, e três saídas, os três ganhos do controlador PID. As regiões lineares para essas quatro variáveis são definidas na Tabela 11.

Por fim, o controlador baseado em LF utilizado no DOIS-PIDS possui duas entradas, erro e carga, e uma saída, valor que define qual controlador utilizar, abaixo de 0,5 o controlador PID 1, caso contrário o controlador 2. As regiões lineares para essas três variáveis são definidas na Tabela 12.

5.3 Diagramas de Bode e de Nyquist

As estabilidades do sistema com e sem controle foram analisadas por meio dos diagramas de Nyquist e de Bode. Para tais análises foi necessário utilizar um sistema linearizado, desse modo, utilizou-se a linearização pela expansão de Taylor (Seção 4.2).

Pelo diagrama de Bode (Figuras 36 e 37) pode-se constatar a diferença de estabilidade do sistema com e sem controle. Quando o sistema sem controle possui magnitude unitária, a fase está bem próxima de -180° e, no momento que a fase é -180° , a magnitude é aproximadamente nula. Indicando, assim, que o sistema sem controle está no limite da instabilidade.

Já pelo diagrama de Nyquist do sistema sem controlador (Figura 38), observa-se que o ponto $(-1,0)$ não está envolvido pela curva, mas ela está bem próxima do ponto e de, conseqüentemente, envolvê-lo. Ou seja, o sistema sem controlador está no limite da instabilidade, conforme já constatado pelo diagrama de Bode.

Na figura 39 é mostrado o diagrama de Nyquist do sistema com o controlador PID sintonizado pelos dois métodos explicitados na Seção 4.3. Observa-se que ambas as curvas estão distantes do ponto crítico, assim, o sistema com controlador é estável.

Os valores das MG e MF para o sistema sem controle e com o PID sintonizado pelos dois métodos diferentes são apresentados na Tabela 13. Como esperado, o sistema sem controle possui ganhos próximos a zero e, por isso, está no limite da instabilidade. Já os ganhos do PID sintonizado pelos dois métodos são bastante estáveis, visto que possuem valores positivos e distantes do zero

Tabela 11 – Regiões lineares do controlador baseado em LF PID-FUZZY-CASCATA

		Começo	Pico	Fim
Carga (%)	0 %	0	0	10
	10 %	0	10	20
	20 %	10	20	30
	30 %	20	30	40
	40 %	30	40	50
	50 %	40	50	60
	60 %	50	60	70
	70 %	60	70	80
	80 %	70	80	90
	90 %	80	90	100
	100 %	90	100	100
K_p	0 %	0,03593	0,05581	0,00732
	10 %	0,05581	0,00732	0,00906
	20 %	0,00732	0,00906	0,01306
	30 %	0,00906	0,01306	0,01513
	40 %	0,01306	0,01513	0,01696
	50 %	0,01513	0,01696	0,01861
	60 %	0,01696	0,01861	0,02012
	70 %	0,01861	0,02012	0,02153
	80 %	0,02012	0,02153	0,02284
	90 %	0,02153	0,02284	0,02409
	100 %	0,02284	0,02409	0,02615
K_I	0 %	0,01325	0,01548	0,02165
	10 %	0,01548	0,02165	0,03316
	20 %	0,02165	0,03316	0,07075
	30 %	0,03316	0,07075	0,09791
	40 %	0,07075	0,09791	0,12522
	50 %	0,09791	0,12522	0,15253
	60 %	0,12522	0,15253	0,17977
	70 %	0,15253	0,17977	0,20691
	80 %	0,17977	0,20691	0,23393
	90 %	0,20691	0,23393	0,26079
	100 %	0,23393	0,26079	0,27879
K_D	0 %	0,0003551	0,0003593	0,0003773
	10 %	0,0003593	0,0003773	0,0003908
	20 %	0,0003773	0,0003908	0,0004002
	30 %	0,0003908	0,0004002	0,0004033
	40 %	0,0004002	0,0004033	0,0004058
	50 %	0,0004033	0,0004058	0,0004089
	60 %	0,0004058	0,0004089	0,0004112
	70 %	0,0004089	0,0004112	0,0004166
	80 %	0,0004112	0,0004166	0,0004203
	90 %	0,0004166	0,0004203	0,0004278
	100 %	0,0004203	0,0004278	0,0004306

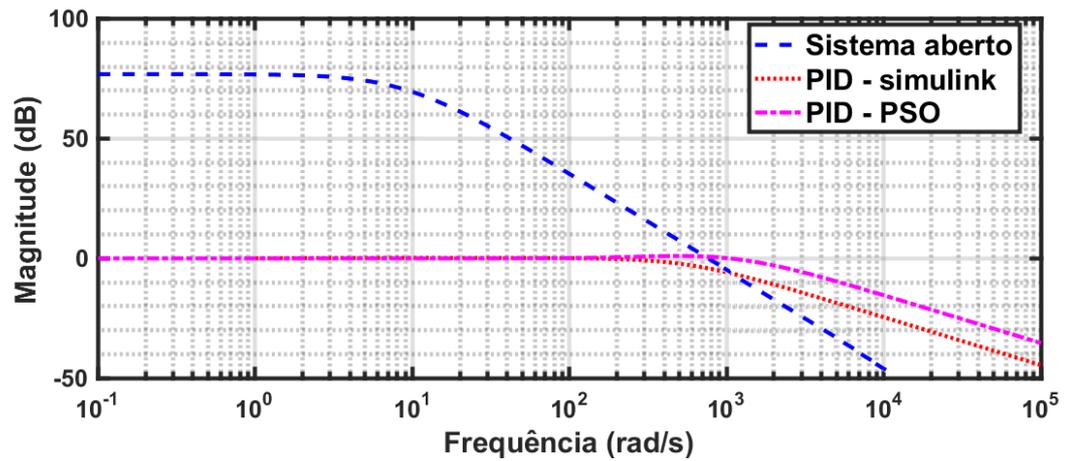
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Tabela 12 – Regiões lineares do controlador baseado em LF utilizado no DOIS-PIDS

		Começo	Pico	Fim
Erro (Hz)	Very fast	-60	-60	-30
	Fast	-60	-30	0
	Right	-5	0	5
	Slow	0	30	60
	Very slow	30	60	60
Carga (%)	0 %	0	0	10
	10 %	0	10	20
	20 %	10	20	30
	30 %	20	30	40
	40 %	30	40	50
	50 %	40	50	60
	60 %	50	60	70
	70 %	60	70	80
	80 %	70	80	90
	90 %	80	90	100
Sinal	Região 1	0	0,2	0,4
	Região 2	0	1	1

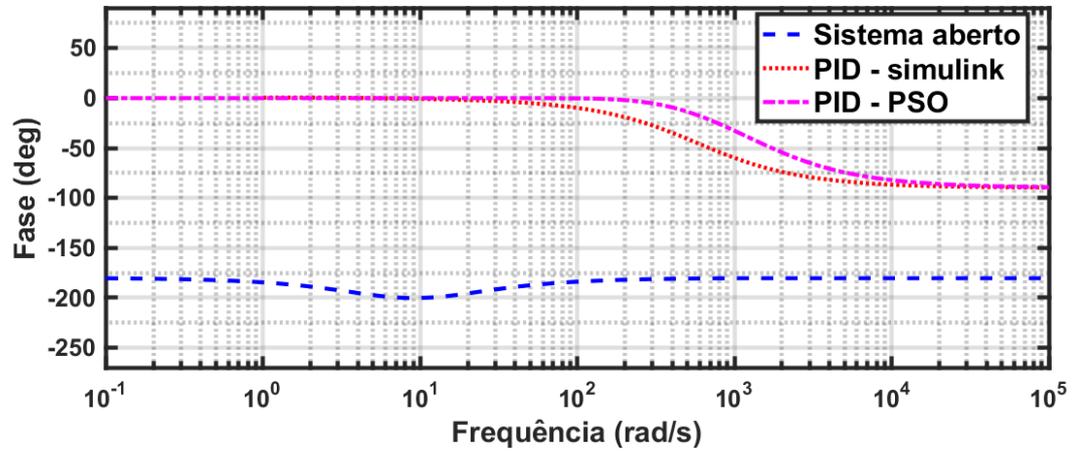
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 36 – Margem de Ganho do Diagrama de Bode



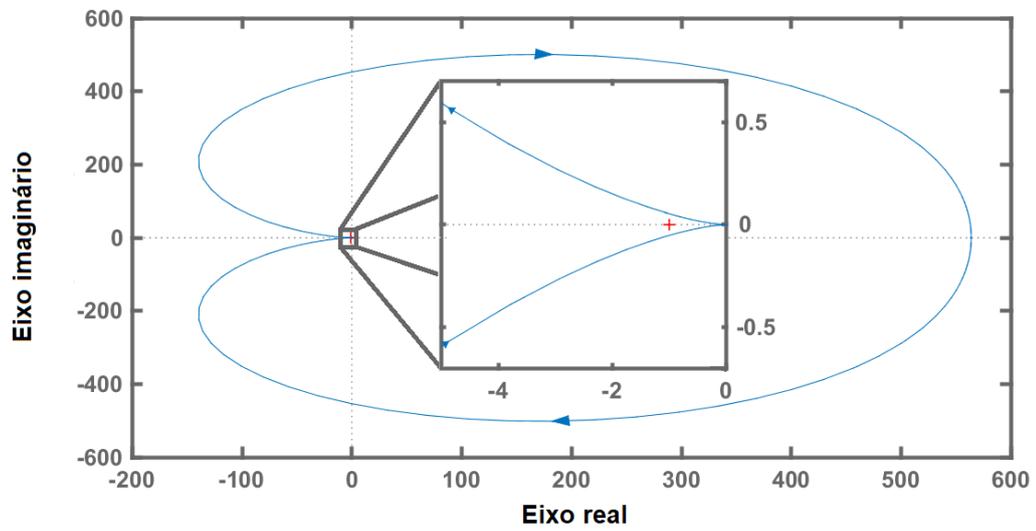
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 37 – Margem de Fase do Diagrama de Bode



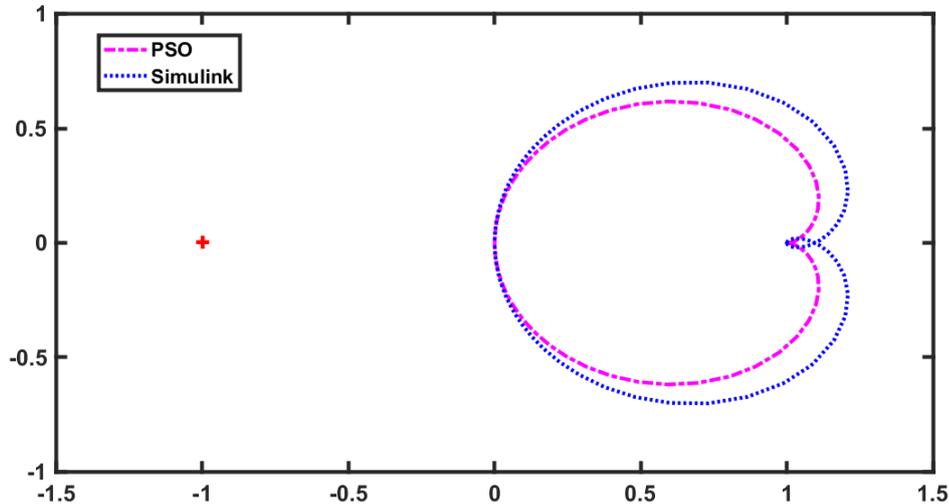
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 38 – Diagrama de Nyquist para o sistema sem controle



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 39 – Diagrama de Nyquist para o sistema controlado pelo PID



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 13 – Margens de Ganho e de Fase

	MG (dB)	MF (°)
Sistema aberto	0,00014331	-0,5064
PID ajustado pelo Simulink	∞	167,3012
PID ajustado pelo PSO	∞	145,9847

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

5.4 Cenário de Variação da Carga: VAR-CARGA

Conforme já mencionado na Seção 4.7, analisou-se nesse trabalho dois parâmetros de resposta do grupo motogerador: frequência e tensão da energia produzida. Essas variáveis serão analisadas segundo os critérios já definidos na Seção 2.3.1. No caso do tempo de acomodação o intervalo considerado nesse trabalho é a faixa de operação normal estabelecida pela ANEEL, a qual, para cada parâmetro, está definida nas Tabelas 7 e 8.

Como anteriormente especificado, o cenário VAR-CARGA considera a carga variando de maneira abrupta (variação degrau) e a composição do biogás constante e igual a 85 % de CH_4 e 15 % de CO_2 (Subseção 4.5.1).

Os resultados resumidos para o VAR-CARGA estão expostos na Tabela 14. Em cada controlador, ao confrontar os dois métodos de ajuste dos parâmetros do PID, constata-se

que eles têm performances parecidas. A maior diferença de desempenho pode ser observada no PID-FUZZY-PARALELO, em que a sintonia utilizando a ferramenta *tune* do Simulink é levemente mais eficaz que o PSO.

Comparando-se os quatro controladores entre si, nota-se que, para esse cenário de simulação, em cada critério de desempenho, os sistemas de controle possuem performances diferentes. Se considerarmos a oscilação (assinalada pelos valores de OS e US), o melhor controlador é o DOIS-PIDS, seguido pelo PID-CONVENCIONAL, PID-FUZZY-PARALELO e PID-FUZZY-CASCATA, nessa ordem. Entretanto, caso analisemos o tempo de subida, o PIDFUZZY-CASCATA é o mais rápido, acompanhado do PID-FUZZY-PARALELO, DOIS-PIDS e PID-CONVENCIONAL. E, se observarmos os tempos de acomodação, o melhor é o controlador PID-FUZZY-CASCATA. De maneiral geral, os critérios de desempenho mais críticos são o OS e o US a fim de garantir que a frequência não saia dos requisitos da ANEEL (Tabela 7), ou seja, o melhor sistema de controle para o cenário VAR-CARGA é o DOIS-PIDS.

Tabela 14 – Comportamento da frequência para o cenário VAR-CARGA

Controle	Intervalo de tempo	Simulink				PSO			
		OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)
PID- CONVEN CIONAL	0 a 5 s	-	-25,47	1,825	4,349	-	-24,93	1,822	4,521
	5 a 7,5 s	1,87	-9,93	-	-	4,62	-9,92	-	7,443
	7,5 a 12,5 s	4,72	-	-	9,467	4,97	-	-	9,391
	12,5 a 18 s	0,93	-9,31	-	14,859	1,33	-8,88	-	14,777
PID- FUZZY- PARALEL O	0 a 5 s	30,99	-1,43	0,4177	4,0265	30,59	-8,53	0,4179	2,7342
	5 a 7,5 s	1,63	-14,84	-	-	4,49	-14,82	-	-
	7,5 a 12,5 s	4,70	-	-	9,469	4,85	-1,47	-	11,2656
	12,5 a 18 s	0,21	-8,15	-	13,794	1,04	-8,11	-	15,277
PID- FUZZY- CASCAT A	0 a 5 s	49,39	-12,48	0,3220	3,4995	49,17	-12,94	0,3220	-
	5 a 7,5 s	1,07	-4,84	-	6,9988	0,89	-5,35	-	7,4944
	7,5 a 12,5 s	0,56	-0,89	-	8,5776	0,67	-0,67	-	8,9906
	12,5 a 18 s	0,72	-6,67	-	14,719	0,70	-0,70	-	14,811
DOIS- PIDS	0 a 5 s	-	-16,85	0,5026	-	-	-15,81	0,5648	-
	5 a 7,5 s	-	-5,71	-	5,4998	-	-5,66	-	5,4770
	7,5 a 12,5 s	0,69	-0,03	-	7,6346	0,71	-0,02	-	7,6381
	12,5 a 18 s	1,23	-6,63	-	16,114	1,23	-6,63	-	16,114

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Já o comportamento da tensão para os quatro sistemas de controle e os dois métodos de sintonia são similares entre si. Na Tabela 15 são apresentados os critérios de desempenho médios para a tensão. Para o cenário VAR-CARGA, todos os controladores conseguem regular a tensão dentro dos requisitos da ANEEL (Tabela 8).

Tabela 15 – Comportamento da tensão para o cenário VAR-CARGA

Intervalo de tempo	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)
0 a 5 s	0,33	-0,03	0,3231	0,3115
5 a 7,5 s	0,03	-0,01	-	5
7,5 a 12,5 s	0,02	-	-	7,5
12,5 a 18 s	0,02	-0,02	-	12,5

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

5.5 Cenário de Variação da Composição do Biogás: VAR-BIO

Para o cenário VAR-BIO, foram obtidos os resultados expressos na Tabela 16. Os sistemas de controle os quais ajustaram os parâmetros do PID utilizando o *tune* do Simulink, quando comparados com os controladores com PSO, possuem menor OS, todavia, apresentam maiores tempos de subida. Já US e tempo de acomodação variam caso a caso.

Já comparando os sistemas de controles entre si, observa-se que o controlador PIDFUZZY-CASCATA apresenta menor tempo de subida, seguido pelo PID-FUZZY-PARALELO, DOIS-PIDS e PID-CONVENCIONAL. Já os menores valores de OS e US são observados no sistema de controle DOIS-PIDS, acompanhado do PID-CONVENCIONAL, PID-FUZZYPARALELO e PID-FUZZY-CASCATA. Seguindo o raciocínio de que os valores de OS e US são os mais críticos, para o cenário VAR-BIO, o melhor controlador também é o DOIS-PIDS.

Analisando a tensão desses controladores, observa-se que aqueles cujos parâmetros do PID são ajustados pela ferramenta *tune* do Simulink possuem comportamento mais oscilatório que aqueles sintonizados com o uso de PSO. Na Tabela 17 são apresentados os critérios de desempenho médio para a tensão para cada um dos dois métodos de sintonia utilizados. Observase que os dados referentes ao Simulink possuem maior OS e US (maior natureza oscilatória conforme já mencionado), assim, o ajuste do PID por meio do PSO mostra-se mais eficiente no controle da tensão para o cenário VAR-BIO.

Tabela 16 – Comportamento da frequência para o cenário VAR-BIO

Controle	Intervalo de tempo	Simulink				PSO			
		OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)
PID- CONVEN- CIONAL	0 a 5 s	-	-23,29	0,7210	-	14,29	-8,73	0,1052	-
	5 a 7,5 s	-	-10,22	-	7,1080	0,96	-4,59	-	5,3205
	7,5 a 12,5 s	4,67	-0,86	-	-	0,73	-2,28	-	7,7766
	12,5 a 18 s	-	-10,14	-	16,7791	0,73	-6,80	-	12,7016
PID- FUZZY- PARALEL O	0 a 5 s	32,42	-1,84	0,5267	1,3510	49,55	-11,66	0,2527	-
	5 a 7,5 s	3,58	-23,42	-	-	9,83	-22,16	-	-
	7,5 a 12,5 s	3,11	-3,03	-	11,7727	7,1797	-9,14	-	11,5932
	12,5 a 18 s	0,99	-9,07	-	13,7458	0,83	-8,82	-	13,9461
PID- FUZZY- CASCAT A	0 a 5 s	64,31	-7,75	0,3774	3,2786	75,67	-8,24	0,2232	5,1382
	5 a 7,5 s	1,97	-3,86	-	7,1639	1,99	-3,79	-	7,8964
	7,5 a 12,5 s	1,26	-0,85	-	8,8619	0,87	-0,86	-	9,0268
	12,5 a 18 s	0,94	-6,44	-	15,2418	1,13	-4,43	-	15,1416
DOIS- PIDS	0 a 5 s	13,54	-2,47	0,5659	5,1615	29,73	-2,04	0,2920	-
	5 a 7,5 s	-	-3,12	-	7,5687	0,11	-3,16	-	5,2884
	7,5 a 12,5 s	0,72	-	-	8,9753	0,78	-0,02	-	7,6556
	12,5 a 18 s	3,32	-10,53	-	13,2845	0,94	-5,87	-	15,5808

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Tabela 17 – Comportamento da tensão para o cenário VAR-BIO

Intervalo de tempo	Simulink				PSO			
	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)
0 a 5 s	9,02	-0,01	0,3114	0,3033	0,23	-0,13	0,3231	0,2609
5 a 7,5 s	0,03	-0,01	-	5	-	-0,11	-	5
7,5 a 12,5 s	0,82	-22,17	-	7,5	-	-0,08	-	7,5
12,5 a 18 s	0,55	-27,21	-	12,683	-	-0,10	-	12,5

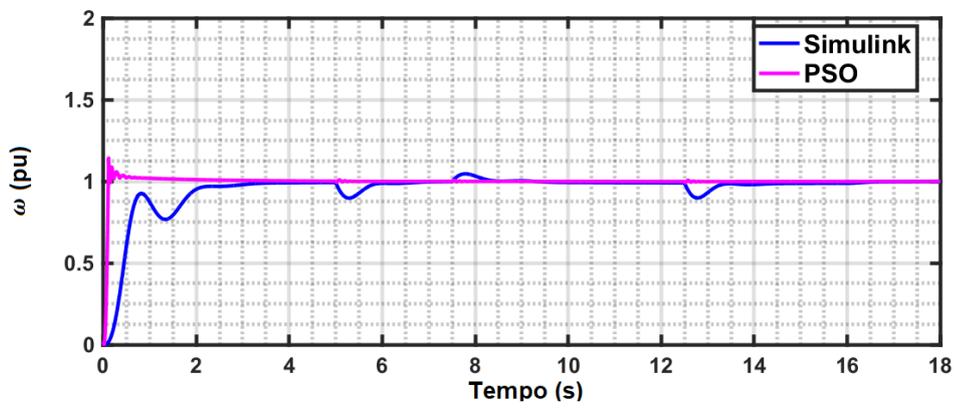
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

5.6 Cenário de Variação da Carga e da Composição do Biogás ao Mesmo Tempo: VAR-CARGA-BIO

Para o cenário VAR-CARGA-BIO, o PID-CONVENCIONAL consegue regular adequadamente a frequência do grupo motogerador utilizando o PSO como método de sintonia dos parâmetros do PID, enquanto que, ao utilizar o *tune* do Simulink, há um US de -10,02 % (ultrapassando o limite de -5,83 %) por volta do tempo de 5 s (Figura 40). De maneira geral, o comportamento da resposta do sistema com o PID-PSO é melhor em todos os quatro critérios de desempenho analisados nesse trabalho.

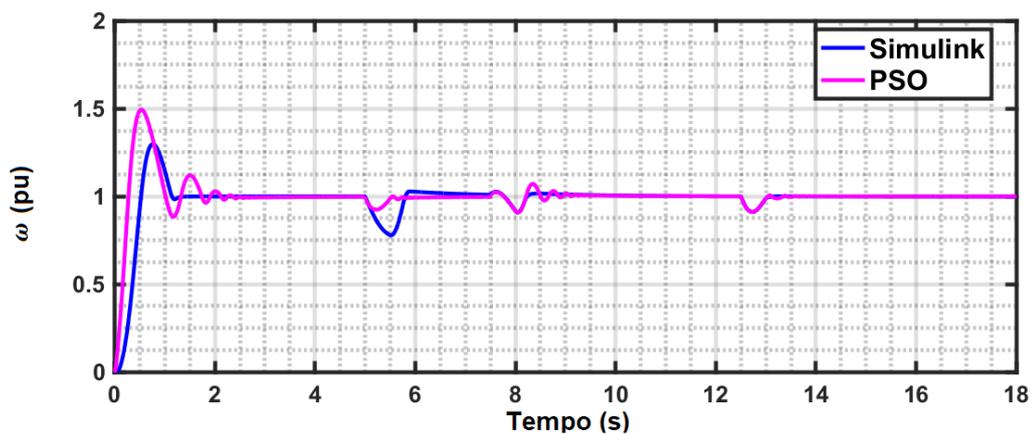
O ajuste da frequência proporcionado pelo FUZZY-PID-PARALELO mostra que o PSO obteve melhor tempo de subida que o *tune* do Simulink, como pode ser visto na Figura 41. Entretanto, a resposta do FUZZY-PID-PARALELO apresenta pontos de desconexão com a rede para os dois métodos de ajuste do PID.

Figura 40 – Frequência elétrica para o controlador PID-CONVENCIONAL sob o cenário VARCARGA-BIO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 41 – Frequência elétrica para o controlador PID-FUZZY-PARALELO sob o cenário VAR-CARGA-BIO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

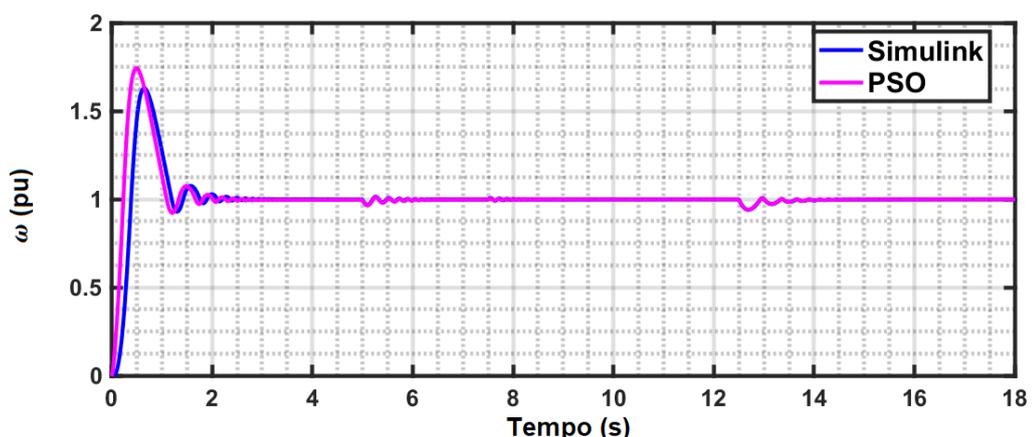
O controlador PID-FUZZY-CASCATA, assim como o PID-FUZZY-PARALELO possui pontos de desconexão com a rede para os dois métodos de ajuste dos parâmetros do PID,

como pode ser visto na Figura 42). As respostas do sistema de controle utilizando o *tune* do Simulink e o PSO possuem comportamentos bastante semelhantes.

Por fim, o DOIS-PIDS apresenta o melhor desempenho dentre os sistemas de controle estudados nesse trabalho, pois apresenta menores oscilações e menor tempo de subida, como pode ser visto na Figura 43. O controlador DOIS-PIDS com o *tune* do Simulink possui um US de -10,02 % (ultrapassando o limite de -5,83 %) no tempo de 5s aproximadamente. Já o ajuste com o PSO proporciona um controlador capaz de regular a frequência adequadamente segundo os padrões da ANEEL.

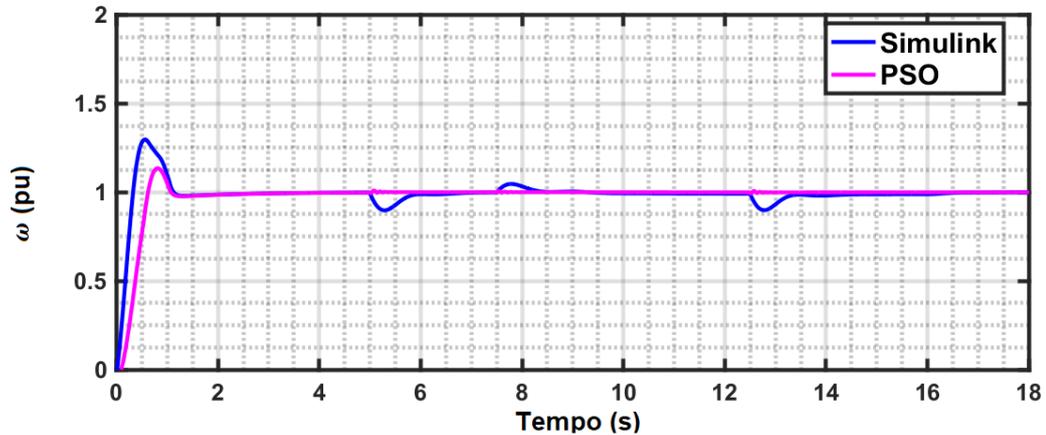
Na Tabela 18 é apresentado o resumo do desempenho dos quatro sistemas de controle utilizando os dois métodos de ajuste dos parâmetros do PID para o cenário VAR-CARGA-BIO. Os melhores controladores utilizando o Simulink em ordem crescente de desempenho são: PID-FUZZY-CASCATA, PID-CONVENCIONAL, PID-FUZZY-PARALELO e DOIS-PIDS. Já para os sistemas de controle que utilizam o PSO a ordem crescente de desempenho é: PIDFUZZY-CASCATA, PID-FUZZY-PARALELO, PID-CONVENCIONAL e DOIS-PIDS. Sendo o controlador DOIS-PIDS com PSO a melhor configuração possível para o VAR-CARGA-BIO.

Figura 42 – Frequência elétrica para o controlador PID-FUZZY-CASCATA sob o cenário VARCARGA-BIO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 43 – Frequência elétrica para o controlador DOIS-PIDS sob o cenário de variação VARCARGA-BIO



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Assim como observado no cenário de simulação VAR-BIO, na média, os controladores com o PID sintonizados pelo *tune* do Simulink apresentam comportamento mais oscilatório que aqueles ajustados pelo PSO, como pode ser visto na Figura 44. Na Tabela 19 são apresentados os critérios de desempenho para as respostas exibidas na Figura 44. Consta-se que o controle o qual utiliza o *tune* do Simulink responde com maior *overshoot* (OS) e *undershoot* (US). Essa oscilação é levemente menor que a observada no cenário VAR-BIO, mas é grande o suficiente para que a tensão da energia produzida pelo motogerador não atenda os requisitos da ANEEL, como pode ser visto na Tabela 8. Desse modo, conclui-se que a sintonia do PID é melhor utilizando o PSO, principalmente, pelo comportamento da tensão nos cenários VAR-BIO e VAR-CARGA-BIO.

5.7 Limites Operacionais dos Sistemas de Controle

Conforme observado nos três cenários de simulação, a tensão da energia produzida fica dentro dos padrões da ANEEL para todos os controladores que utilizam PSO, enquanto que os sistemas de controle usando o *tune* do Simulink ficam com a tensão dentro das especificações exigidas apenas no cenário VAR-CARGA. A frequência da energia produzida atende as exigências da ANEEL em alguns casos, destacando-se o controle DOIS-PIDS com ajuste feito pelo PSO.

Tabela 18 – Comportamento da frequência para o cenário VAR-CARGA-BIO

		Simulink				PSO			
Controle	Intervalo de tempo	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)
PID- CONVEN CIONAL	0 a 5 s	-	-23,34	0,7245	-	14,21	-0,50	0,1051	4,4989
	5 a 7,5 s	-	-10,02	-	7,1299	0,92	-0,58	-	5,3204
	7,5 a 12,5 s	4,62	-0,87	-	-	0,71	-0,28	-	7,7661
	12,5 a 18 s	-	-0,99	-	17,3158	0,73	-0,81	-	12,8609
PID- FUZZY- PARALEL O	0 a 5 s	29,87	-1,66	0,4905	1,3510	67,02	-11,15	0,2516	-
	5 a 7,5 s	2,90	-22,17	-	-	-	-7,53	-	-
	7,5 a 12,5 s	2,71	-2,37	-	11,6895	14,18	-7,79	-	11,9017
	12,5 a 18 s	-	-8,81	-	13,0818	0,62	-7,22	-	13,8265
PID- FUZZY- CASCAT A	0 a 5 s	63,07	-7,02	0,3688	3,2738	74,51	-7,70	0,2154	4,8853
	5 a 7,5 s	1,53	-3,11	-	6,6783	1,30	-3,45	-	7,4754
	7,5 a 12,5 s	0,77	-0,71	-	8,4348	0,49	-0,65	-	8,6115
	12,5 a 18 s	0,75	-5,89	-	14,8049	0,73	-5,91	-	14,8215
DOIS- PIDS	0 a 5 s	29,76	-2,32	0,2920	4,5821	12,53	-	0,5659	4,2795
	5 a 7,5 s	0,41	-10,02	-	7,5529	0,87	-0,61	-	5,4716
	7,5 a 12,5 s	4,13	-0,79	-	-	0,66	-0,27	-	7,5581
	12,5 a 18 s	-	-1,05	-	16,9243	0,79	-0,88	-	12,8203

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Tabela 19 – Comportamento da tensão para o cenário VAR-CARGA-BIO

		Simulink				PSO			
Intervalo de tempo		OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)	OS (%)	US (%)	t_r (s)	t_s (s)
0 a 5 s		7,97	-	0,3114	0,3033	0,15	-0,14	0,3157	0,2559
5 a 7,5 s		0,03	-	-	5	-	-0,12	-	5
7,5 a 12,5 s		0,04	-19,87	-	7,5	-	-0,08	-	7,5
12,5 a 18 s		0,03	-25,32	-	12,683	-	-0,09	-	12,5

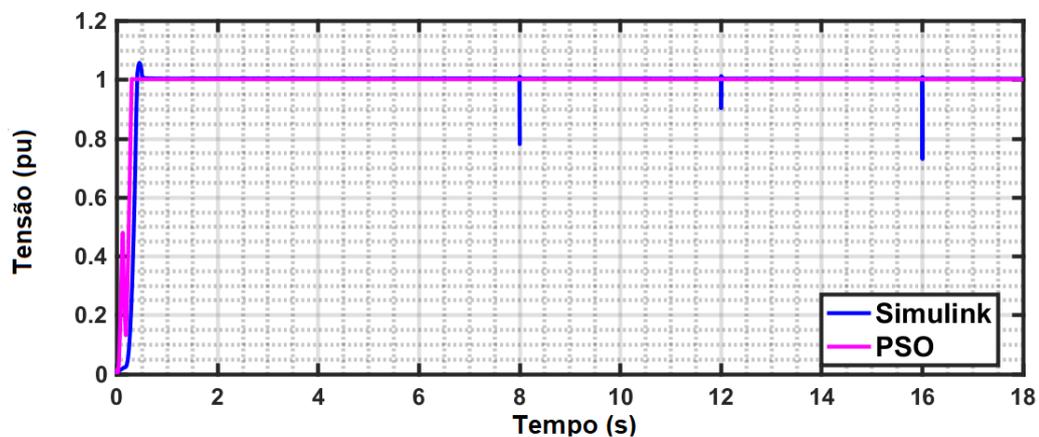
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Diante disso, o PSO mostrou-se melhor que o tune do Simulink, principalmente, devido ao comportamento da tensão produzida. Assim, analisou-se o limite operacional dos quatro controladores estudados nesse trabalho sendo ajustados pelo PSO. Como os sistemas de controle com o PSO já se mostraram adequados para manter a tensão dentro dos parâmetros da ANEEL, analisou-se apenas o limite operacional que diz respeito a frequência da energia elétrica produzida, ou seja, determinou-se o quanto a carga ou a composição do biogás podia variar abruptamente (variação degrau) sem que a frequência saísse do intervalo exigido pela ANEEL.

Primeiramente, estudou-se o comportamento dos quatro controladores para condições de variação de carga abrupta (variação degrau), para tal, simulou-se o grupo

motogerador operando em regime permanente com biogás com 85 % de metano e com 85 % da carga nominal do motor, pois, conforme já mencionado, os sistemas de controle foram ajustados considerando essa condição de operação. Então, foi simulado a redução abrupta da carga elétrica e analisado o comportamento da frequência da energia produzida em três parâmetros: tempo de acomodação, OS e US.

Figura 44 – Tensão elétrica sob o cenário VAR-CARGA-BIO

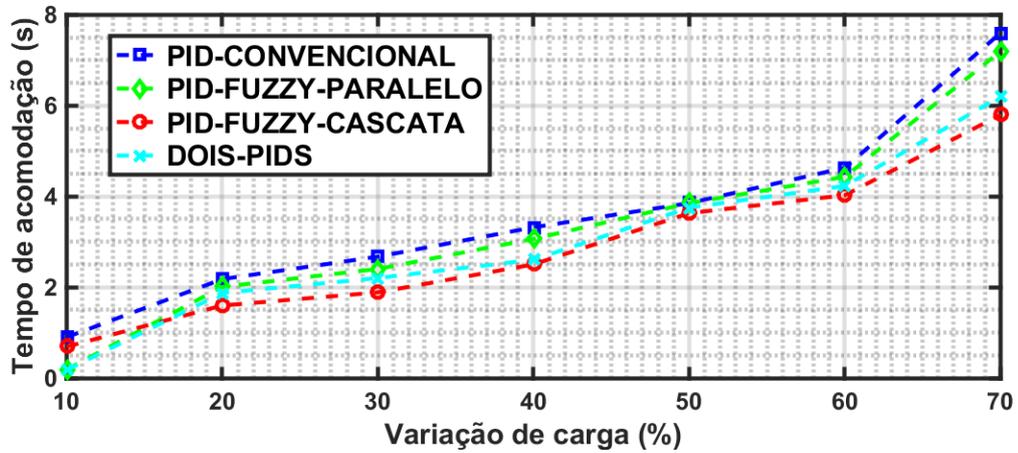


Fonte: elaborado pelo autor (2019)

O tempo de acomodação para os quatro controladores para diferentes variações de carga está exposto na Figura 45. O sistema de controle PID-FUZZY-CASCATA apresenta o menor tempo de acomodação em quase todos os cenários de variação de carga, seguido pelo DOIS-PIDS, PID-FUZZY-PARALELO e PID-CONVENCIONAL. Apenas com essa figura não é possível determinar até que variação de carga os controles conseguem atender os requisitos da ANEEL, para tal, é preciso também analisar o OS e US.

Analisando o OS e US (Figuras 46 e 47), constata-se que para uma redução abrupta de 20 % de carga, a frequência da energia regulada pelo PID-CONVENCIONAL tem um OS de um pouco menos que 10 %, o qual é o limite superior da exigência da ANEEL (Tabela 7). Enquanto que para os outros três sistemas de controle, esse limite só é alcançado com 30 % de variação de carga. Para uma redução abrupta de 40 % da carga, o US referente aos controladores PID-FUZZY-PARALELO e PID-FUZZY-CASCATA é cerca de 5 %, sendo próximo ao limite inferior dos requisitos da ANEEL, como pode ser visto na Tabela 7 na Seção 4.7. Já para os controladores PID-CONVENCIONAL e DOIS-PIDS, esse limite só é atingido com 50 % de variação da carga.

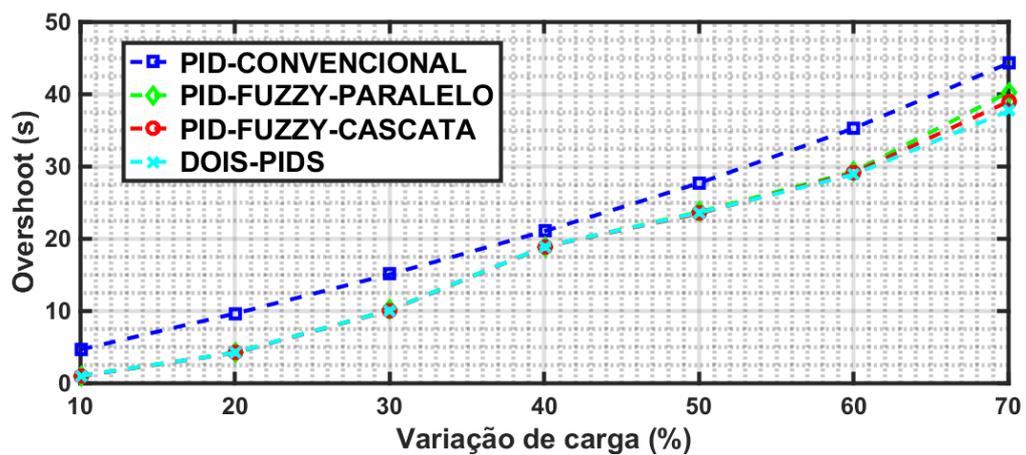
Figura 45 – Tempo de acomodação versus variação de carga



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

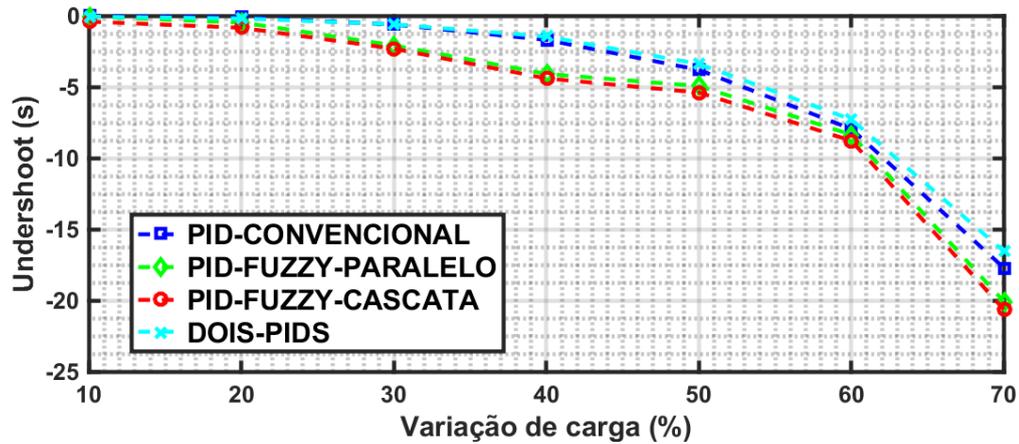
Desse modo, para o controlador PID-CONVENCIONAL, o máximo de variação abrupta da carga possível é de 20 %, nesse caso a frequência retorna ao intervalo de operação normal em aproximadamente 2s. Enquanto que os outros três controladores suportam uma redução máxima de 30 % de carga, retornando para o intervalo operacional adequado em cerca de 2,7 s.

Figura 46 – Overshoot versus variação de carga



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 47 – Undershoot versus variação de carga



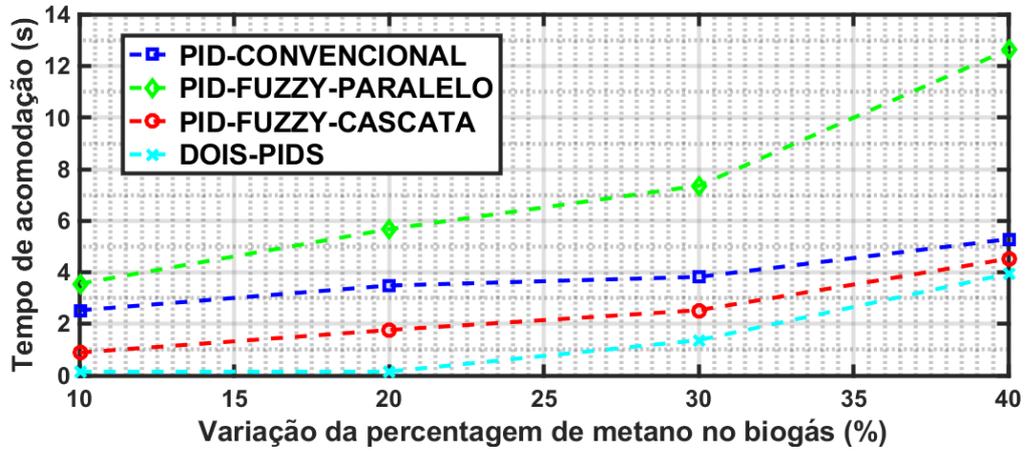
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Também foi estudado o desempenho dos quatro controladores para condições de variação abrupta (variação degrau) de composição do biogás, para tal, simulou-se o grupo motogerador operando em regime permanente com biogás com 85 % de metano e com 85 % da carga nominal do motor, pois, conforme já mencionado, os sistemas de controle foram ajustados considerando essa condição de operação. Então, foi simulado a redução abrupta da porcentagem de metano e analisado o comportamento da frequência da energia produzida nos mesmos três parâmetros: tempo de acomodação, OS e US.

Ao considerar uma variação abrupta de biogás, observa-se que o controlador DOIS-PIDS possui melhor tempo de acomodação, seguido pelo PID-FUZZY-CASCATA, PID-CONVENCIONAL e PID-FUZZY-PARALELO (Figura 48). Comparando com a condição de variação de carga (Figura 45), observa-se que os dois sistemas de controle com melhores tempos de acomodação são PID-FUZZY-CASCATA e DOIS-PIDS.

É possível perceber que uma variação abrupta de 30 % de metano no biogás provoca um OS levemente maior que 10 % para o controlador PID-FUZZY-PARALELO e menor que 10 % para os demais sistemas de controle. Enquanto que para uma variação de 10 % de metano no biogás ocasiona um US maior que o permitido pela ANEEL na frequência regulada pelos controladores PID-CONVENCIONAL e PID-FUZZY-PARALELO. Já os controladores PIDFUZZY-CASCATA e DOIS-PIDS podem operar com até 20 % de variação arupta de metano.

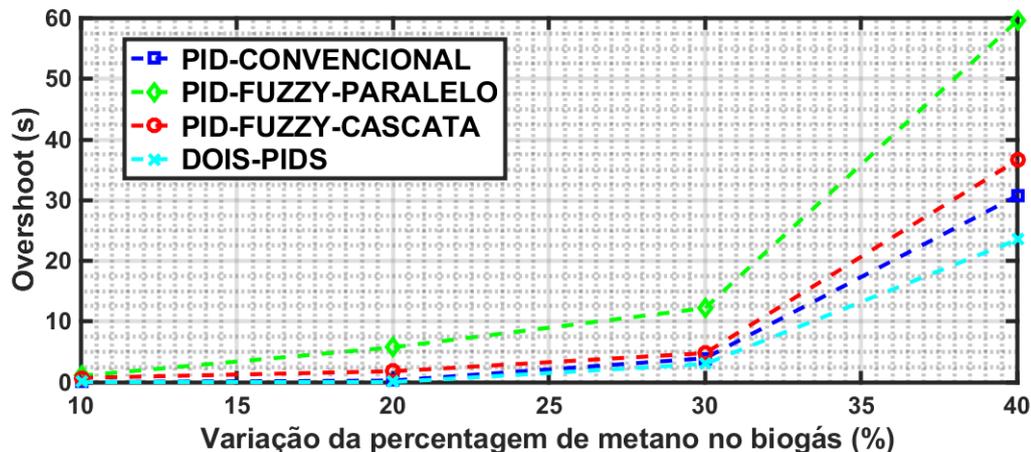
Figura 48 – Tempo de acomodação versus variação da composição de biogás



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Assim, os controladores PID-CONVENCIONAL e PID-FUZZY-PARALELO não podem operar em condições de variação do metano no biogás maiores que 10 %, conseguindo acomodar a frequência dentro da faixa de operação normal em aproximadamente 3,5 e 6 s respectivamente. Enquanto os controladores PID-FUZZY-CASCATA e DOIS-PIDS, conseguem suportar variações de metano de até 20 %, retornando para o intervalo operacional adequado em até 3 s.

Figura 49 – Overshoot versus variação da composição de biogás



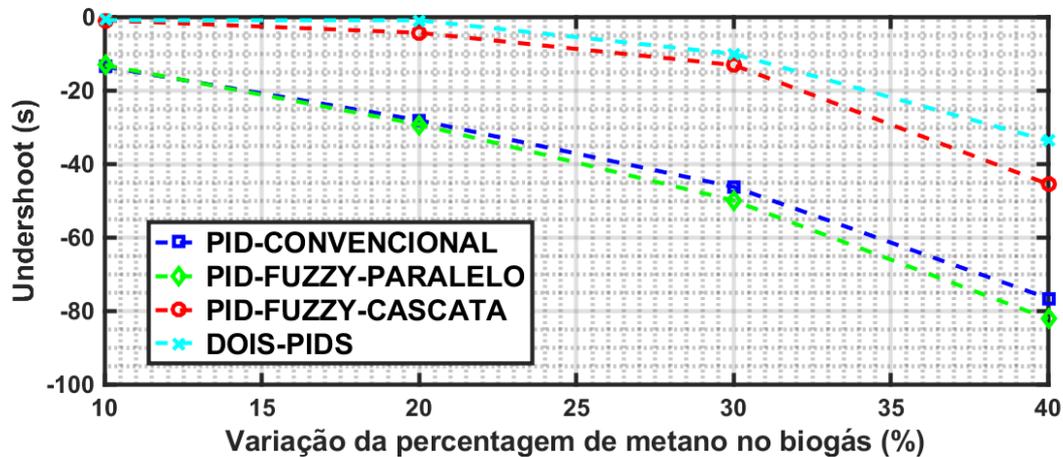
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Na Tabela 20, encontra-se um resumo dos limites operacionais dos quatro controladores. Ratifica-se que para determinar o limite operacional de cada controlador é

preciso analisar os três parâmetros (*overshoot*, *undershoot* e tempo de acomodação) em conjunto. Ou seja, a fim de determinar o limite operacional para uma variação abrupta de carga, deve-se analisar as Figuras 45, 46 e 47. Enquanto que, para uma variação abrupta de composição de biogás, deve-se analisar as Figuras 48, 49 e 50.

É possível constatar que o PID-FUZZY-CASCATA e o DOIS-PIDS são os que possuem maiores limites operacionais, ou seja, são os melhores. Ademais, ao comparar o tempo de acomodação de um com outro (Figuras 45 e 48), verifica-se que para uma variação abrupta de carga o PID-FUZZY-CASCATA é mais rápido, enquanto que para uma variação abrupta de composição de biogás o DOIS-PIDS possui tempo de acomodação menor. Resultados esses que estão em conformidade com os cenários de simulação VAR-CARGA e VAR-BIO. Entretanto, ratifica-se que o DOIS-PIDS é o melhor controlador para o cenário VAR-CARGA-BIO, o qual é o mais realista dos três cenários por considerar uma variação simultânea de carga e composição de biogás.

Figura 50 – Undershoot versus variação da composição de biogás



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 20 – Resumo dos limites operacionais dos sistemas de controle

Controle	Máxima variação abrupta de carga tolerável	Máxima variação abrupta de composição de biogás tolerável
PID-CONVENCIONAL	20 %	10 %
PID-FUZZY-PARALELO	30 %	10 %
PID-FUZZY-CASCATA	30 %	20 %
DOIS-PIDS	30 %	20 %

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, um modelo matemático foi desenvolvido para representar os fenômenos mecânicos e elétricos envolvidos em um grupo motogerador a biogás operando sob várias condições de carga elétrica e composição de combustível. Essa modelagem foi linearizada usando a expansão da série de Taylor para ajustar os parâmetros dos controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID) utilizados nos esquemas de controle propostos. O processo de ajuste utilizou duas abordagens: a ferramenta tune do ambiente Simulink do MATLAB e a técnica de Otimização por Enxame de Partículas (PSO).

Foram propostas arquiteturas de controle a fim de regular o motogerador a biogás. Cada sistema foi avaliado sob três cenários de simulação: variação de carga; variação de composição do biogás; variação de carga e de composição de biogás ao mesmo tempo. Os resultados mostram que alguns dos esquemas de controle propostos garantem que o grupo motogerador opere dentro dos limites de frequência exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Entretanto, a tensão elétrica dos esquemas de controle com PID ajustados pelo tune do Simulink não atende os requisitos de tensão da ANEEL para dois dos cenários simulados.

Dentre os quatro sistemas de controle avaliados nesse trabalho, o que apresentou melhor desempenho foi o DOIS-PIDS, o qual é constituído de dois PIDs operando em paralelo, sendo ambos comutados por um controlador baseado em Lógica Fuzzy (LF). Esse sistema de controle ajustado pelo PSO tem o melhor tempo de subida, além de manter o grupo motogerador operando dentro das exigências da ANEEL para os três cenários de simulação.

Pesquisas futuras devem ser realizadas a fim de validar o desempenho dos sistemas de controle por meio de resultados experimentais, pois essa pesquisa faz parte de um projeto de geração de energia a partir de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

REFERÊNCIAS

- ABDEL-MAGID, Y. L.; ABIDO, M. A. AGC tuning of interconnected reheat thermal systems with particle swarm optimization. In: 10th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, CIRCUITS AND SYSTEMS, 2003. ICECS 2003. **Proceedings...** Sharjah: IEEE, 2003. p. 376-379.
- ALIBARDI, L.; COSSU, R. Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production potentials. **Waste Management**, [s.l.], v. 36, p. 147–155, fev. 2015. Elsevier.
- ALOMOUSH, M. I. Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers. **Electrical Engineering**, [s.l.], v. 91, n. 7, p. 357–368, 1 jan. 2010. Springer.
- ANDRADE NETO, C. O. D. Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira. In: **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira**. [S.l.: s.n.], 1997. p. 301–301.
- ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional–prodlist**: Módulo 8-qualidade de energia elétrica. Revisão, v. 5, p. 76, 2007.
- ANEEL. Resolução normativa. **Resolução Normativa Nº 482**, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Biogás e Biometano no Brasil**. São Paulo: ABIOGÁS, 2016.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID controllers: theory, design, and tuning**. 2. ed. [S.l.]: Instrument society of America Research Triangle Park, NC, 1995.
- AYARZA, J. A. C. et al. A inserção do etanol e do gnv no setor de transportes substituindo à gasolina: O caso peruano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGETICO (CBPE), 6., 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: CBPE, 2008. p. 1-14.
- BASTIDA, H.; UGALDE-LOO, C. E.; ABEYSEKERA, M. Dynamic modelling and control of a reciprocating engine. **Energy Procedia**, [S.l.], v. 142, p. 1282–1287, dez. 2017. Elsevier.
- BEGA, E. A. et al. **Instrumentação industrial**. 3. ed. [S.l.]: Interciência, 2006.
- BEST, R. J. et al. Synchronous islanded operation of a diesel generator. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v. 22, n. 4, p. 2170–2176, nov. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- BIAZETO, A. R. **Controladores de movimento da articulação do joelho de paraplégico com PI, PID e fuzzy Takagi-Sugeno**. 2015. 188 f. Dissertação (Mestrado) — Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

BOLDEA, I. **Synchronous generators**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2015.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **Electric drives**. 3. ed. [S.l.]: CRC press, 2016.

BROGAN, W. L. et al. **Control systems**. 3. ed. [S.l.]: CRC press, 2016.

CAMPESTRINI, L. **Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico**. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado) — Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grando do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006.

CARLOS, A.; SMITH, C.; ARMANDO, B. **Principles and Practices of Automatic Process Control**. 3 ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5 ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.

CHEN, Q.-X.; WU, C.-F. Biogas engine start controller PID parameter setting. In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, MECHANICAL CONTROL AND COMPUTATIONAL ENGINEERING (AMCCE), 2017, Pequim. **Proceedings...** Pequim: Atlantis Press, 2017. p. 990-993.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. [S.l.]: PROSAB, 2001. 1 v.

CHERNICHARO, C. D. L. **Reatores anaeróbios: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. [S.l.]: PROSAB, 2007. 379 p. 5 v.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C. d. et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6, 2006, Campinas. **Proceedings ...** Campinas: SCIELO, 2006. p. 1-10.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora UNICAMP, 2008.

DUARTE FILHO, M. **Síntese de Controlador PID para Controle de pH em um Reator com Otimização via Algoritmos Genéticos**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, 2014.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: 2000 CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC00), 2000, La Jolla. **Proceedings ...** La Jolla: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2000. p. 84-88.

EBERHART, R. C.; SHI, Y.; KENNEDY, J. **Swarm intelligence**. [S.l.]: Elsevier, 2001.

- EKLUND, B. et al. Characterization of landfill gas composition at the fresh kills municipal solid-waste landfill. **Environmental Science & Technology**, [S.l.], v. 32 n. 15, p. 2233–2237, ago. 1998. American Chemical Society (ACS).
- ENEL. **NT-BR-010/2016 R-01 - Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema Elétrico da Ampla/Coelce**. [S.l.], 2016.
- ENGELBRECHT, A. P. **Computational intelligence: an introduction**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- ERIKSSON, L. Modeling and control of turbocharged SI and DI engines. **Oil & Gas Science and Technology-Revue de L'ifp**, [S.l.], v. 62, n. 4, p. 523–538, jul. 2007. EDP Sciences.
- ERIKSSON, L.; NIELSEN, L. **Modeling and control of engines and drivelines**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.
- FADALI, M. S.; VISIOLI, A. **Digital control engineering: analysis and design**. [S.l.]: Academic Press, 2012.
- FARIA, M. M. N. D. et al. Thermodynamic simulation model for predicting the performance of spark ignition engines using biogas as fuel. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 149, p. 1096–1108, out. 2017. Elsevier.
- FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. **Internal combustion engines: applied thermosciences**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- GIACAGLIA, G.; DIAS, S. S. **Parâmetros técnicos relativos à tecnologia de geração de biogás em biodigestores**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo—Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 1993.
- GRACIANO, V.; VARGAS, J. V. C.; ORDONEZ, J. C. Modeling and simulation of diesel, biodiesel and biogas mixtures driven compression ignition internal combustion engines. **International Journal of Energy Research**, [S.l.], v. 40, n. 1, p. 100–111, 26 jan. 2015. Wiley.
- GUIMARÃES, A. O. **Algoritmo genético aplicado no controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua com rejeição a distúrbios por ação feedforward**. Dissertação (Mestrado) — Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, 2013.
- GUZZELLA, L.; ONDER, C. **Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- HAANDEL, A. V.; LETTINGA, G.; HAANDEL, A. **Tratamento anaeróbico de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994. 210 p.
- HEYWOOD, J. B. *et al.* **Internal combustion engine fundamentals**. Nova York: Mcgraw-hill, 1988.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity Information 2019**: Overview. [S.l.], 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balances**: Overview. [S.l.], 2019.

ISERMANN, R. **Engine modeling and control**: modeling and electronic management of onternal combustion engines. Heidelberg: Springer, 2014.

JADRIC, I. **Modeling and control of a synchronous generator with electronic load**. 119 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Elétrica, Instituto Politécnico e Universidade Estadual da Virgínia, Blacksburg, 1998.

JADRIC, I.; BOROJEVIC, D.; JADRIC, M. Modeling and control of a synchronous generator with an active DC load. **IEEE transactions on Power Electronics**, [S.l.], v. 15, n. 2, p. 303–311, mar. 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

JADRIC, M.; FRANCIC, B. **Dinamika električnih strojeva**. Zagreb: Graphis, 1997.

JAGATHEESAN, K. et al. Performance evaluation of objective functions in automatic generation control of thermal power system using ant colony optimization technique-designed proportional–integral–derivative controller. **Electrical Engineering**, [S.l.], v. 100, n. 2, p. 895–911, 16 maio 2017. Springer.

JAIN, S. et al. Fuzzy-PI based SEIG for rural electrification. In: INTERNATIONAL STUDENTS' CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS AND COMPUTER SCIENCE (SCEECS), 2018, Bhopal, **Proceedings...** Bhopal: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2018. p. 1-6.

KAN, X. et al. An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine. **Applied energy**, [S.l.], v. 212, p. 210–222, fev. 2018. Elsevier.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (ICNN), 1995, Perth, **Proceedings...** Perth: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1995. p. 1942-1948.

KOVÁCS, P. K. **Transient phenomena in electrical machines**. Ann Arbor: Elsevier, 1983.

KRAUSE, P. C. et al. **Analysis of electric machinery and drive systems**. 3 ed. [S.l.]: Wiley, 2002.

KUMAR, M. K. et al. Fuzzy control based biogas IC engine generator system in a residential building. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS IN POWER AND ENERGY (TAP Energy), 2017, Kollam, **Proceedings...** Kollam: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017. p. 1-5.

LEONHARD, W. **Control of electrical drives**. 3 ed. [S.l.]: Springer, 2001.

LIN, Y.-T.; HUANG, Y.-M.; CHENG, S.-C. An automatic group composition system for composing collaborative learning groups using enhanced particle swarm optimization. **Computers & Education**, [S.l.], v. 55, n. 4, p. 1483–1493, dez. 2010. Elsevier.

LOBATO, L. C. da S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 184 f. Tese (Doutorado) – Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MAHMOUDI, A. NO_x, CO, CO₂ and UHC emission levels of gasoline engine of nissan maxima: the effects of turbocharging. In: 6th FUEL AND COMBUSTION CONFERENCE OF IRAN, 2015, Mashhad, **Proceedings...** Mashhad: FCCI, 2015, p. 1-12.

MAYA, P. A.; LEONARDI, F. **Controle Essencial**. [S.l.]: Pearson, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. [S.l.], 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2019**: Relatório síntese / ano base 2018. [S.l.], 2019.

MORAN, M. J. et al. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

NASCIMENTO JUNIOR, G. C. **Máquinas elétricas**: teoria e ensaios. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2006.

NATHAN, S. S.; MALLIKARJUNA, J.; RAMESH, A. An experimental study of the biogas–diesel hcci mode of engine operation. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 51, n. 7, p. 1347–1353, jul. 2010. Elsevier.

OGATA, K. **Modern control engineering**. 5 ed. Nova Jersey: Pearson, 2009.

OLSSON, L.; FALLDE, M. Waste (d) potential: a socio-technical analysis of biogas production and use in sweden. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 98, p. 107–115, jul. 2015. Elsevier.

PANDA, S.; SAHU, B. K.; MOHANTY, P. K. Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. **Journal of the Franklin Institute**, [S.l.], v. 349, n. 8, p. 2609–2625, out. 2012. Elsevier.

PEREIRA, V. M. **Estudo e modelagem dinamica de gerador de indução acionado por maquina de combustão interna com controle de tensão e de frequencia por meio de inversor PWM**. 139 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PIRES, A. V. **Controladores baseados em técnicas de inteligência computacional: Análise, projeto e aplicações**. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PIRES, V. P. Sintonia de um controlador pid em um sistema de controle de vazão. **Revista da Graduação**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 1-23, 2014. Pontificia Universidade Catolica Do Rio Grande Sul (PUC-RS).

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**, [S.l.], v. 32, n. 8, p. 1375–1380, ago. 2007. Elsevier.

RAZBANI, O.; MIRZAMOHAMMAD, N.; ASSADI, M. Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ENERGY, 2011, Perugia, **Proceedings...** Perugia: Science Direct, 2011, p. 1715–1724.

REIS, G. B. et al. A fuzzy control strategy for a diesel generating set under stand-alone and grid-connected operations. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, [S.l.], v. 25, n. 2, p.174–183, 24 dez. 2013. Springer.

ROLAN, A. et al. Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2009, Seoul, **Proceedings...** Seoul: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009, p. 734–739.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and bioenergy**, [S.l.], v. 35, n. 5, p. 1633–1645, maio 2011. Elsevier.

SAHU, R. K.; PANDA, S.; SEKHAR, G. C. A novel hybrid PSO-PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S.l.], v. 64, p. 880–893, jan. 2015. Elsevier.

SCHOMAKER, A. et al. **Anaerobic digestion of agro-industrial wastes: information networks - technical summary on gas treatment**. Nijmegen: 2000.

SEBORG, D. E. et al. **Process dynamics and control**. 3 ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 1998, Anchorage, **Proceedings...** Anchorage: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1998, p. 69–73.

SOLIHIN, M. I.; TACK, L. F.; KEAN, M. L. Tuning of PID controller using Particle Swarm Optimization (PSO). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED SCIENCE, ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY, 2011, Putrajaya, **Proceedings...** Putrajaya: International Scientific Conference (ISC), 2011, p. 458-461.

SOUZA, S. N. M. D. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2016.

SPEIGHT, J. **Synthetic fuels handbook: properties, process and performance**. Nova York: McGraw-Hill, 2008.

STERN, S. et al. Performance of a bench-scale membrane pilot plant for the upgrading of biogas in a wastewater treatment plant. **Journal of Membrane Science**, [S.l.], v. 151, n. 1, p. 63–74, dez. 1998. Elsevier.

SUGENO, M.; KANG, G. Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator. **Fuzzy sets and systems**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 329–345, abr. 1986. Elsevier.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, [S.l.], n. 1, p. 116–132, jan. 1985. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

TEIXEIRA, E. H. C. G. et al. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2 ed. [S.l.]: Editora Blucher, 2010.

UMANS, S.; FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C. **Electric machinery**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2013.

XU, G. et al. Coordination of wind turbines and synchronous generators for system frequency control. **Renewable energy**, [S.l.], v. 129, p. 225–236, dez. 2018. Elsevier.

YAR, A.; BHATTI, A. I.; AHMED, Q. First principle based control oriented model of a gasoline engine including multi-cylinder dynamics. **Control Engineering Practice**, [S.l.], v. 70, p. 63–76, jan. 2018. Elsevier.

YUN, K. T. et al. Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery. **Applied energy**, [S.l.], v. 102, p. 327–335, fev. 2013. Elsevier.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, [S.l.], v. 8, n. 3, p. 338–353, jun. 1965. Elsevier.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - II. **Information sciences**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 199–249, 1975.

ZHANG, Y.; JIANG, J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. **Annual reviews in control**, [S.l.], v. 32, n. 2, p. 229–252, dez. 2008. Elsevier.