



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

LUCAS RIBEIRO DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE HÍBRIDO FUZZY-PID PARA
MOTOGERADORES A BIOGÁS**

FORTALEZA
2020

LUCAS RIBEIRO DA COSTA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE HÍBRIDO FUZZY-PID PARA
MOTOGERADORES A BIOGÁS

Dissertação apresentada ao Programa 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. José Marques Soares.

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)

C873d Costa, Lucas Ribeiro da.
Desenvolvimento de sistema de controle híbrido Fuzzy-PID para motogeradores a biogás / Lucas Ribeiro da Costa. – 2020.
94 f. : il. color.

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

Orientação: Prof. Dr. José Marques Soares.

Coorientação: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso.

1. Biogás. 2. Geração Distribuída. 3. Lógica Fuzzy. 4. Motogerador. I. Título.

CDD 621.38

LUCAS RIBEIRO DA COSTA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CONTROLE HÍBRIDO FUZZY-PID PARA
MOTOGERADORES A BIOGÁS

Dissertação apresentada ao Programa 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: 06/05/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Marques Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Profa. Dra. Ruth Pastôra Saraiva Leão Externo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado. Ao meu avô, que sempre foi uma referência pessoal.

AGRADECIMENTOS

Aos professores da Universidade Federal do Ceará, pelos ensinamentos que vão além da sala de aula.

Aos professores participantes da banca examinadora, em especial os professores Giovanni Barroso e José Marques pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da universidade, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Aos demais professores do curso de pós-graduação em Engenharia de Teleinformática da UFC que foram agentes fundamentais em meu desenvolvimento profissional e pessoal.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap).

RESUMO

O uso de biogás como fonte renovável de energia já é uma realidade, sendo aplicado tanto em produção de calor como em plantas de geração e cogeração de energia elétrica. Neste sentido, este trabalho apresenta-se como uma contribuição para o fortalecimento do uso desta fonte de energia renovável, propondo um sistema de controle capaz de assegurar a qualidade da energia gerada e níveis de eficiência satisfatórios. De forma mais específica, foi proposto um sistema de controle que assegure que a frequência elétrica na saída do gerador permanecesse dentro dos padrões exigidos pela norma brasileira, mesmo sob condições adversas de variação de carga e composição do combustível durante a operação do grupo gerador. Para tal, um modelo matemático foi desenvolvido de forma a representar os efeitos mecânicos da composição do combustível e variações de carga, bem como representar os fenômenos elétricos envolvidos na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Em seguida, o modelo foi implementado computacionalmente e testado com um sistema de controle composto por um controlador híbrido formado por um Sistema Fuzzy que otimiza os ganhos de controladores PID. Por fim, foram realizadas simulações do sistema proposto contemplando cenários variados de operação, desde operação padrão em regime permanente até a simulação de defeitos, falhas graves, variações súbitas de carga e de composição do combustível. Observou-se que o sistema sem o controlador híbrido apresenta comportamento instável quando submetidos às variações das entradas (carga e composição do combustível). Com a introdução do controle Fuzzy-PID, observou-se que o sistema apresentou uma resposta satisfatoriamente rápida (tempo de subida 0,0094 s e tempo de acomodação de 0,0764 s), além de assegurar que as oscilações se mantivessem dentro do limite estabelecido por norma, frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz e tensão entre 90% e 110% do valor nominal da rede elétrica.

Palavras-chave: Biogás, Geração Distribuída, Lógica Fuzzy, Motogerador.

ABSTRACT

The use of biogas as a renewable source of energy is already a reality, being applied both in heat production and in power generation and cogeneration plants. In this sense, this work presents itself as a contribution to the strengthening of the use of this renewable energy source, proposing a control system capable of ensuring the quality of the energy generated and satisfactory levels of efficiency. More specifically, a control system was proposed to ensure that the electrical frequency at the generator output remained within the standards required by the Brazilian standard, even under adverse conditions of load variation and fuel composition during the operation of the generator set. For this, a mathematical model was developed in order to represent the mechanical effects of the fuel composition and load variations, as well as to represent the electrical phenomena involved in the conversion of mechanical energy into electrical energy. Then, the model was implemented computationally and tested with a control system composed of a hybrid controller formed by a Fuzzy System that optimizes the gains of PID controllers. Finally, simulations of the proposed system were carried out, contemplating varied operating scenarios, from standard operation in permanent regime to the simulation of defects, serious failures, sudden variations in load and fuel. It was observed that the system without the hybrid controller presents an unstable behavior when submitted to variations of the inputs. With the introduction of the Fuzzy-PID control, it was observed that the system presents a satisfactorily fast response (rise time 0.0094 s and accommodation time 0.0764 s) in addition to ensuring that the oscillations remained within the limit established by norm , with frequency between 59.9 Hz and 60.1 Hz and voltage between 90% and 110% of the nominal value of the electrical network.

Keywords: Biogas, Distributed Generation, Fuzzy Logic, Generator Set.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quatro tempos de um motor tipo Otto	18
Figura 2 - Principais elementos de um MCI.....	20
Figura 3 - Corte transversal de um gerador síncrono simplificado	21
Figura 4 - Rotor com polos não-aparentes (a) e de polos aparentes (b)	21
Figura 5 - Diagrama de Sanquei para perdas no gerador	22
Figura 6 - Diagrama de Blocos de um controlador PID	27
Figura 7 - Representação gráfica da ação proporcional sob a variável de controle	28
Figura 8 - Fluxograma de um Controlador Fuzzy básico	34
Figura 9 - Representação gráfica do Método do Centro de Gravidade	36
Figura 10 - Representação gráfica do modelo Mamdani.....	37
Figura 11 - Fluxograma dos trabalhos correlatos	39
Figura 12 - Circuito equivalente do GS no eixo d:.....	47
Figura 13 - Circuito equivalente do GS no eixo q:.....	47
Figura 14 - Diagrama da bancada de testes	49
Figura 15 - Motogerador a biogás	49
Figura 16 - Diagrama de blocos do modelo de motogerador a biogás:.....	52
Figura 17 - Diagrama de blocos do sistema controlado	56
Figura 18 - Fluxograma do projeto do sistema de controle híbrido.	57
Figura 19 - Procedimento para escolha dos ganhos do PID	60
Figura 20 - Funções de Pertinência da variável Carga	62
Figura 21 - Funções de Pertinência da variável Composição do Combustível	62
Figura 22 - Funções de Pertinência da variável de saída K_p	63
Figura 23 - Funções de Pertinência da variável de saída K_i	64
Figura 24 - Funções de Pertinência da variável de saída K_d	64
Figura 25 - Relação entre as variáveis de entrada e saída do Controlador Fuzzy	65
Figura 26 - Resposta do sistema linearizado ao degrau em malha aberta	70
Figura 27 - Polos da Função de Transferência em malha aberta.....	70
Figura 28 - Diagrama de Bode em malha aberta	71
Figura 29 - Resposta do sistema controlado ao degrau	74
Figura 30 - Diagrama do Lugar das Raízes para o sistema controlado	75
Figura 31 - Diagrama de Bode do sistema controlado.	76
Figura 32 - Relação entre entradas e ganho proporcional no Controlador Fuzzy	78
Figura 33 - Relação entre entradas e ganho integral no Controlador Fuzzy	78

Figura 34 - Relação entre entradas e ganho derivativo no Controlador Fuzzy	79
Figura 35 - Frequência de saída com carga constante e composição variável	81
Figura 36 - Tensão de Fase RMS com carga constante e composição variável	82
Figura 37 - Tensão de linha com carga constante e composição variável	82
Figura 38 - Frequência de saída com composição constante e carga variável	83
Figura 39 - Tensão de Fase RMS com composição constante e carga variável	83
Figura 40 - Tensão de linha com composição constante e carga variável	84
Figura 41 - Frequência de saída com composição e carga variáveis.....	85
Figura 42 - Tensão de Fase RMS com composição e carga variáveis.....	87
Figura 43 - Tensão de Linha com composição e carga variáveis	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeitos de cada ação do controlador PID em sistema de malha fechada	31
Tabela 2 - Especificações do motogerador a biogás	48
Tabela 3 - Parâmetros experimentais	50
Tabela 4 - Parâmetros de operação derivados dos testes de bancada	51
Tabela 5 – Variáveis que compõem a FT do sistema linearizado	54
Tabela 6 - Limites de sobretensão e subtensão em consumidores de Média Tensão	54
Tabela 7 - Limites de sobrefrequência e subfrequência (BT e MT)	55
Tabela 8 - Matriz de pontos de operação	58
Tabela 9 - Limites máximos e mínimos dos valores de ganho do PID	63
Tabela 10 - Valores assumidos pelo parâmetro k_1	67
Tabela 11 - Valores assumidos pelo parâmetro k_2	67
Tabela 12 - Valores assumidos pelo parâmetro k_3	68
Tabela 13 - Valores assumidos pelo ganho K_p	72
Tabela 14 - Valores assumidos pelo ganho K_i	72
Tabela 15 - Valores assumidos pelo ganho K_d	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLF	Controlador por Lógica Fuzzy
FT	Função de Transferência
GNV	Gás Natural Veicular
GS	Gerador Síncrono
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronical Engineering</i>
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
MCI	Motor de Combustão Interna
MVM	Modelo do Valor Médio
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PCI	Poder Calorífico Inferior
PID	Proporcional, Integrador e Derivador
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE VARIÁVEIS E SÍMBOLOS

AFR	Razão Ar-Combustível
C_d	Coefficiente de Descarga
D	Diâmetro da Válvula Borboleta
H	Poder Calorífico Inferior
J	Inércia do Motor
k	Razão entre calores específicos do ar
η_c	Eficiência da Combustão
η_e	Eficiência da geração de energia
η_{ign}	Eficiência do Sistema de Ignição
η_{vol}	Eficiência Volumétrica
ω	Rotação do Eixo do MCI
p_{amb}	Pressão Ambiente
P_e	Potência Elétrica
p_{im}	Pressão no Coletor de Admissão
p_{max}	Pressão Máxima no Cilindro
p_{cr}	Pressão crítica
q_{cyl}	Vazão de ar para o cilindro
q_{in}	Vazão de ar admitido
q_f	Vazão de combustível
R	Constante dos gases ideias
r_c	Razão de compressão do motor
θ_{amb}	Temperatura ambiente
θ_{im}	Temperatura do Coletor de Admissão
T_c	Torque gerado na combustão
T_f	Torque de atrito
T_L	Torque da carga
T_m	Torque do motor
T_p	Torque de bombeamento
u	Ângulo de abertura da válvula
V_D	Volume do cilindro
V_{im}	Volume do Coletor de Admissão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Justificativa	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Princípios de Funcionamento de Motores de Combustão Interna de Ciclo Otto .	17
2.2	Princípios de Funcionamento de Alternadores	20
2.3	O Biogás	23
2.4	Aspectos de Importância da Geração de Energia Distribuída	24
2.5	Fundamentos de controladores	25
2.5.1	<i>Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)</i>	26
2.5.1.1	<i>Ação Proporcional</i>	27
2.5.1.2	<i>Ação Integral</i>	28
2.5.1.3	<i>Ação Derivativa</i>	29
2.5.1.4	<i>Ação combinada Proporcional-Integral-Derivativa</i>	29
2.6	Controlador por Lógica Fuzzy	31
2.6.1	<i>Fundamentos de projeto de Controladores Fuzzy</i>	33
2.7	Trabalhos relacionados	37
3	METODOLOGIA	40
3.1	Modelagem do Sistema	40
3.1.1	<i>Modelagem do Motor de Combustão Interna</i>	41
3.1.1.1	<i>Modelagem da admissão de ar</i>	41
3.1.1.2	<i>Modelagem da dinâmica do Coletor de Admissão</i>	42
3.1.1.3	<i>Fluxo de Massa através do Motor</i>	42
3.1.1.4	<i>Torque do Motor</i>	43
3.1.1.5	<i>Inércia do Sistema</i>	44
3.1.1.6	<i>Equação geral do sistema mecânico</i>	44
3.1.2	<i>Modelagem do Alternador Síncrono</i>	45
3.2	Parâmetros Experimentais	47
3.3	Linearização do Sistema	51
3.4	Projeto do Controlador	54
3.4.1	Definição dos pontos de operação estudados	57
3.4.2	<i>Projeto dos controladores PID para cada ponto de operação</i>	59
3.4.3	<i>Projeto do Controlador Fuzzy</i>	60

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	Modelo Linearizado.....	66
4.2	Simulações dos Pontos de Operação com controlador PID.....	72
4.3	Implementação do Controlador Fuzzy	78
4.4	Simulação do Sistema Utilizando Controlador Híbrido Fuzzy-PID.....	80
5	CONCLUSÃO.....	89
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – MODELAGEM DO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA .	95
	APÊNDICE B – MODELAGEM DO ALTERNADOR SÍNCRONO	96

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energia elétrica aumenta ano a ano, fato que se agravou com os avanços tecnológicos observados desde o início do século XXI assim, a produção sustentável, segura e eficiente é um dos maiores desafios deste século para a humanidade. Associada a esta questão, existe o debate das mudanças climáticas e Aquecimento Global impondo restrições cada vez maiores aos impactos ambientais provenientes da geração de energia elétrica. Este cenário torna bastante propício a necessidade de fontes de energia renováveis distribuídas, que são para gerar energia com impactos reduzidos, maior eficiência de distribuição, visto que estão próximas da carga, e maior diversificação da matriz de geração (ZHANG e JIANG, 2008).

O uso industrial de biogás como uma alternativa energética aos combustíveis derivados do petróleo na produção de energia elétrica é uma realidade em diversos países, como é o caso da Alemanha que discute o uso do biogás desde o final do século XX (PROBIOGÁS, 2010). Desta forma, percebe-se a necessidade de investimentos econômicos e de pesquisa nesta área, visto que as propriedades físicas e químicas desta fonte de energia são altamente variáveis. Além disto, pode-se produzir o combustível a partir de diferentes tipos de biomassa, muitos deles encontrados em abundância nos grandes centros urbanos ou atividades agrícolas e agroindústrias, como é o caso da biomassa vinda de rejeitos alimentícios, esgoto sanitário e biomassa vegetal em geral (OLSSON E FALLDE, 2015).

Diferente do Gás Natural que apresenta uma composição química relativamente regular, a composição do biogás é variável (SPEIGHT, 2008) e isto traz impactos diretos na operação de motores e máquinas térmicas que operem com este biocombustível, além de causar possíveis danos aos componentes mecânicos devido à presença de gases como sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) além dos siloxanos ($[-Si(CH_3)_2O-]_x$) (KAN et al., 2018).

Biogás proveniente de águas residuárias consiste tipicamente de CH_4 (60 – 65 mols %), CO_2 (35 – 40 mols %), H_2S (0.1 – 0.5 mol %) e traços de outros gases. Este fato acarreta uma variação no Poder Calorífico Inferior (PCI) de $1,86 \times 10^4 - 2,42 \times 10^4$ kJ/m³ contra um poder calorífico de $3,57 \times 10^4$ kJ/m³ do metano puro CH_4 (STERN et al., 1998). Essa variabilidade da composição do biogás é um desafio quando se tem por objetivo a geração de energia elétrica usando motogeradores.

De fato, há no país várias instalações industriais em aterros sanitários dedicadas à geração de energia com grupos geradores constituídos de motores de combustão interna de ciclo Otto a biogás (ANEEL, 2020). Entretanto, um problema recorrente nesse tipo de instalação

reside no fato de que a qualidade da energia gerada é fortemente impactada pela qualidade do combustível utilizado e pela robustez do sistema de controle empregado na planta. De fato, sabe-se que esses gases componentes do biogás podem resultar em variações na estabilidade e flutuações da energia produzida, além da possibilidade de *blackout* do sistema de geração, que está sendo previsto para operar na condição de *standby*. Sobretudo no que tange à estabilidade da frequência e tensão na saída do gerador, devido ao fato de tais grandezas estarem fortemente ligadas às condições de estabilidade da rotação e do torque gerados no Motor de Combustão Interna (MCI).

Maioria dos grupos geradores comerciais possui controladores PID para regular a rotação do eixo do MCI de acordo com a carga solicitada na saída do gerador. Em outras palavras, com o aumento da carga, o gerador solicita mais potência mecânica do MCI, então, a válvula borboleta, que regula a entrada de ar/combustível no motor, abre-se mais liberando um fluxo maior de combustível. Em adição às características variáveis do combustível utilizado, o processo de geração de energia usando grupo gerador a biogás também apresenta uma vasta gama de pontos de operação diferentes, carga altamente variável, não-linearidades no processo de combustão e incertezas associadas aos parâmetros de operação. Todos esses obstáculos fazem com que seja bastante desafiador propor um sistema de controle adequado para esta aplicação (XU et al., 2018).

Dessa forma, nessa dissertação é proposto o desenvolvimento de um modelo matemático para representar a dinâmica de um MCI acoplado a um Gerador Síncrono. O modelo proposto é não-linear e por isso se faz necessário uma etapa de linearização do mesmo, em seguida é feita uma análise deste sistema no domínio da frequência através da aplicação da Transformação de Laplace. Um controlador adequado a esta aplicação é desenvolvido e testado de forma a assegurar o atendimento das especificações de projeto impostas pela regulamentação do setor energético brasileiro.

Essa iniciativa vai ao encontro da política de utilização do biogás para produção de energia elétrica, enquadrado no sistema de microgeração distribuída, regulamentado no Brasil (ANEEL, 2015). Este tipo de solução se mostra como uma alternativa às grandes centrais hidrelétricas e termoeletricas, no sentido de implementar o desenvolvimento autossustentável, gerando energia elétrica a baixo custo para populações em regiões isoladas do país.

1.1 Objetivos

Nessa dissertação o objetivo principal é modelar um grupo gerador a biogás e projetar um sistema de controle híbrido capaz de atender às especificações das normas brasileiras.

Quanto aos objetivos específicos, destacam-se:

- Propor modelagem matemática para representar o comportamento de um Motor de Combustão Interna acoplado a um Gerador Síncrono;
- Implementar a modelagem proposta na ferramenta computacional Matlab para realização de simulações e testes;
- Propor metodologia de controle adequada às características do sistema, sobretudo o tempo de resposta e estabilidade;
- Simular o comportamento do sistema sob variações de carga e composição de combustível;

1.2 Justificativa

A proposta desta pesquisa surgiu a partir da necessidade real do desenvolvimento de um sistema de geração aplicável às Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) do estado do Ceará. O projeto de pesquisa que deu origem a este trabalho propõe gerar energia limpa a partir do biogás, fonte renovável e abundante em nosso território. Tendo em vista as dificuldades para se usar o biogás, sobretudo por conta de sua composição variável, viu-se a necessidade de desenvolver uma área de pesquisa dedicada a estes sistemas de geração.

Assim, este trabalho mostra-se importante por se tratar de uma iniciativa que liga academia, empresas privadas e poder público no sentido de expandir a matriz energética do estado Ceará. Inicialmente, pensou-se em desenvolver um sistema de geração para operar em paralelo com a rede elétrica de distribuição, operando em regime contínuo utilizando o biogás como fonte energética. A partir daí, viu-se a necessidade de desenvolver um sistema de controle para garantir estabilidade e qualidade na geração de energia. Com isso, iniciou-se esta pesquisa por meio do estudo de geradores isolados da rede, controlados a partir de sistemas híbridos para que, uma vez dominada a tecnologia, fosse iniciado o desenvolvimento de um sistema mais robusto, para manter o paralelismo com a rede. Desta forma, este trabalho se mostra como uma iniciativa de desenvolvimento desta tecnologia, abrindo o caminho para o desenvolvimento dos sistemas de geração com tecnologia local.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípios de Funcionamento de Motores de Combustão Interna de Ciclo Otto

O propósito dos motores de combustão interna (MCI) é de transformar a energia química contida no combustível em energia mecânica que pode ser transmitida na forma de potência. Para tal, o motor conta com uma estrutura que foi otimizada ao longo dos anos de forma que o máximo da energia química do combustível seja aproveitada. Mesmo que os MCI sejam máquinas do século XIX, eles continuam sendo usados e estudados atualmente devido à sua ampla aplicabilidade (BRUNETTI, 2012).

De forma geral, os MCI podem ser divididos em dois grandes grupos segundo seu mecanismo de combustão: motores a combustão por centelhamento, também conhecidos como motores Otto, e os motores a combustão por compressão, também conhecidos como motores Diesel. Enquanto o primeiro necessita de uma fonte de calor para dar início ao processo de combustão (energia cedida pela vela de ignição), o segundo inicia seu processo de queima do combustível por meio da alta pressão no interior da câmara de combustão (HEYWOOD, 1988).

Neste trabalho o foco especial são os motores do tipo Otto, por sua aplicação em motogeradores de pequeno porte e pela sua facilidade em ser adaptado para operação com outros combustíveis, além daquele designado pelo fabricante, tais como Gás Natural Veicular (GNV) e o Biogás.

Além da classificação de acordo com o mecanismo de combustão, os motores ainda podem ser classificados de acordo com o ciclo termomecânico que é empregado para a geração de potência. Os motores ditos de quatro tempos realizam um ciclo teórico dividido em quatro processos específicos que se repetem durante seu período de funcionamento (HEYWOOD, 1988):

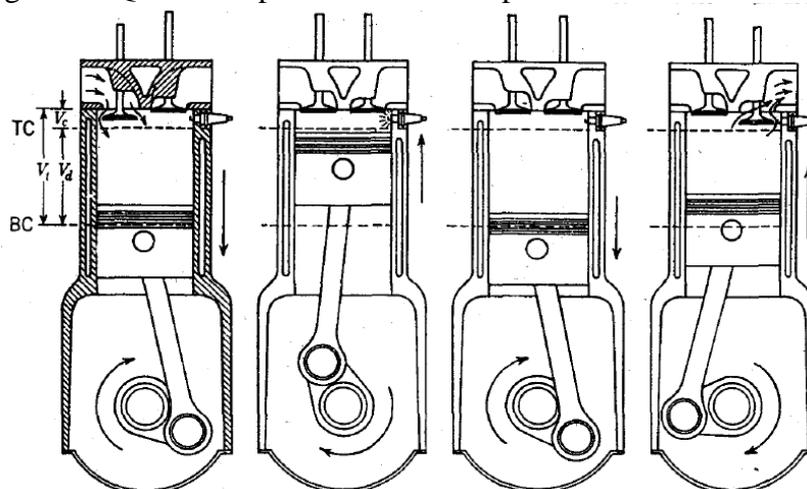
- a) O primeiro tempo é o de admissão onde a mistura ar-combustível é admitida pela câmara de combustão. Durante este processo, a válvula de admissão é aberta e o pistão do motor (parte móvel ligada ao eixo de manivelas) realiza movimento descendente em direção à parte inferior da câmara de combustão, o que causa uma força de sucção no interior da câmara, permitindo que a mistura ar-combustível preencha todo o espaço dentro do cilindro.
- b) Após a admissão, vem o tempo de compressão onde todas as válvulas se mantêm fechadas e o pistão começa um movimento ascendente em direção ao topo da câmara de combustão. Esse movimento comprime a mistura ar-combustível num volume extremamente limitado aumentando consideravelmente a pressão dos gases. Nesse momento, a vela de ignição lança

uma centelha elétrica no interior da câmara e dá início à combustão.

- c) Com a combustão, uma grande quantidade de energia é liberada no interior da câmara empurrando o pistão mais uma vez em direção descendente. Este “tempo” (período de deslocamento) é também chamado de “tempo motor”, pois é nele que a energia química do combustível se transforma em energia mecânica pelo aumento de pressão na câmara movendo o pistão para produzir trabalho útil, o qual por sua vez a transfere ao eixo de manivela do motor sob a forma de torque.
- d) Por fim, o pistão começa um movimento de subida comprimindo os gases resultantes do processo de combustão. Neste momento, a válvula de escapamento se abre deixando que os gases de exaustão sejam expulsos da câmara de combustão para que o ciclo tenha início novamente.

Os motores convencionais são constituídos de vários cilindros, de forma que, em cada período de 180° de giro do eixo de manivela, pelo menos um dos cilindros estará no seu tempo motor dentro de um ciclo, sendo que o balanço energético do motor é sempre positivo, pois caso contrário o motor cessaria seu movimento. De maneira geral, pode-se encontrar motores com três, quatro, seis ou oito cilindros e, em aplicações mais robustas, quantidades ainda maiores. Na Figura 1 são apresentados os quatro tempos de um motor tipo Otto. Vale ressaltar que o funcionamento de um motor tipo Diesel quatro tempos é bastante semelhante, com pequenas modificações no mecanismo da combustão, especialmente quanto à substituição da vela por um bico injetor.

Figura 1 - Quatro tempos de um motor tipo Otto



Fonte: Heywood (1988).

Além dos motores de quatro tempos, existem ainda aqueles que operam em apenas

dois tempos. Nesses casos, a compressão e combustão ocorrendo no primeiro momento e depois a exaustão e admissão ocorrendo simultaneamente na câmara de combustão. Esses motores apresentam diversas limitações de rendimento e níveis mais elevados de poluição e por este motivo são menos difundidos do que os motores de quatro tempos (BRUNETTI, 2012).

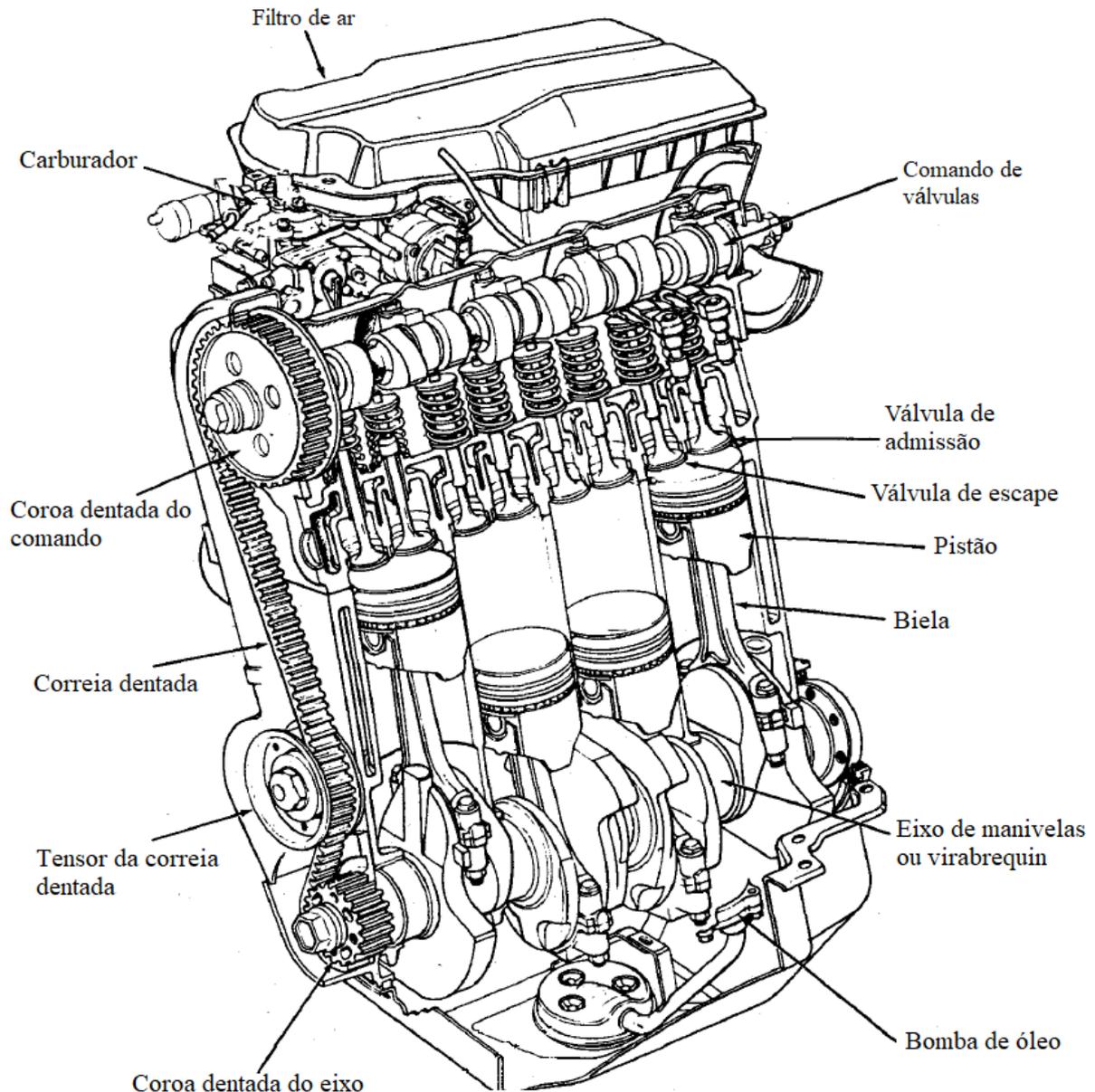
Como dito anteriormente, apenas durante a expansão que ocorre uma transferência de energia química do combustível para o pistão na forma de energia cinética. O pistão por sua vez, é ligado a uma biela que se liga ao eixo de manivelas. Este eixo apresenta geometria particular e está ligado a todos os outros pistões do motor. O eixo é o responsável por receber a energia cinética dos pistões e transformá-la em potência mecânica útil. Essa potência pode ser usada, por exemplo, para gerar energia elétrica através da movimentação do eixo de um alternador.

Além dos pistões, bielas e do eixo de manivelas, os MCI apresentam outros componentes mecânicos e elétricos indispensáveis para seu funcionamento. De maneira geral, pode-se dividir um MCI em bloco, cabeçote e cárter. O bloco do motor é onde estão situados os cilindros e onde ocorre grande parte da combustão. O cabeçote é responsável por abrigar os mecanismos de acionamento das válvulas de admissão e escape do motor, além de servirem para abrigar as velas de ignição nos motores Otto. O cárter é um reservatório de óleo lubrificante que fica situado na parte inferior do motor (HEYWOOD, 1988). As principais partes de um MCI estão ilustradas na Figura 2.

Nos motores mais modernos, o comando do sistema de injeção de combustível é feito via sistema de controle automático chamado de injeção eletrônica. Os sistemas de injeção eletrônica são controlados pelos módulos de injeção que são previamente programados pelos fabricantes, de forma a controlarem o funcionamento dos MCI de acordo com as indicações de diversos sensores instalados no motor. O módulo interpreta os sinais enviados pelos sensores e controla a injeção de combustível no motor (BRUNETTI, 2012).

Em modelos mais antigos, o controle de injeção de combustível era feito mecanicamente pelo carburador. Diferentemente do sistema de injeção eletrônica, os carburadores operavam baseados em princípios mecânicos, sem intervenção de quaisquer sistemas elétricos (BRUNETTI, 2012).

Figura 2 - Principais elementos de um MCI



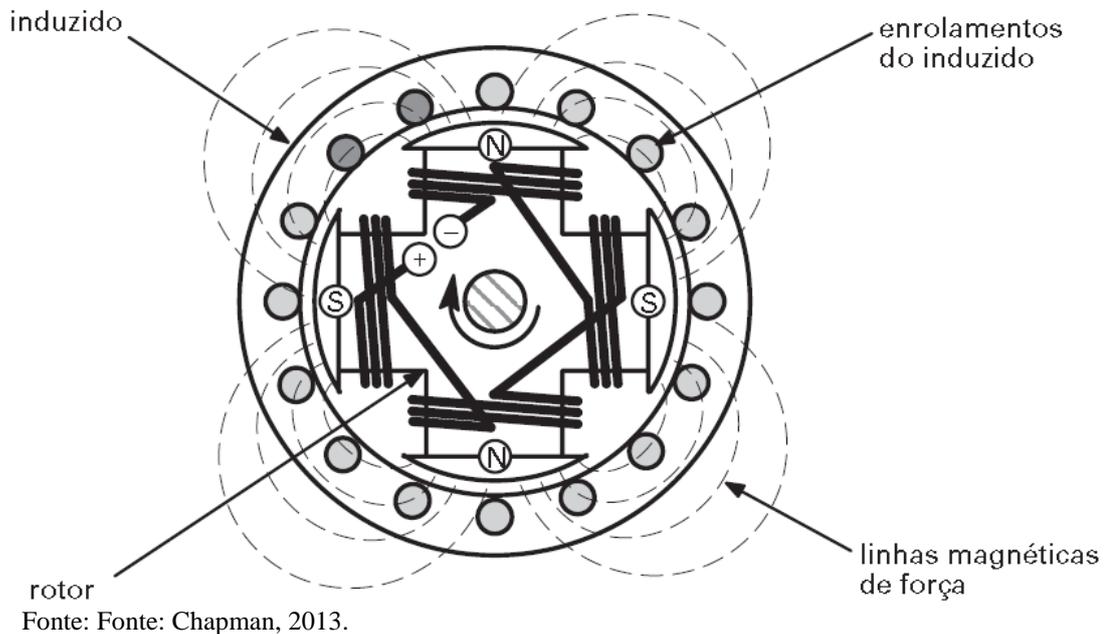
Fonte: Heywood (1988). Adaptado pelo autor.

2.2 Princípios de Funcionamento de Alternadores

Os alternadores (ou Geradores Síncronos) são geradores que convertem energia mecânica em energia elétrica de Corrente Alternada (CA) (CHAPMAN, 2013). No caso específico de motogeradores, a potência mecânica obtida no MCI através da combustão, é transferida (em parte, devido às perdas inerentes aos sistemas físicos) ao alternador que a transforma em potência elétrica. Uma máquina elétrica é dita síncrona quando sua corrente alternada é gerada a partir de um campo magnético produzido por um rotor. Quando o rotor é acionado por uma máquina motriz primária, neste caso um MCI, um campo magnético girante é produzido no alternador, o qual é responsável por induzir tensões trifásicas nos enrolamentos do estator do gerador (CHAPMAN, 2013).

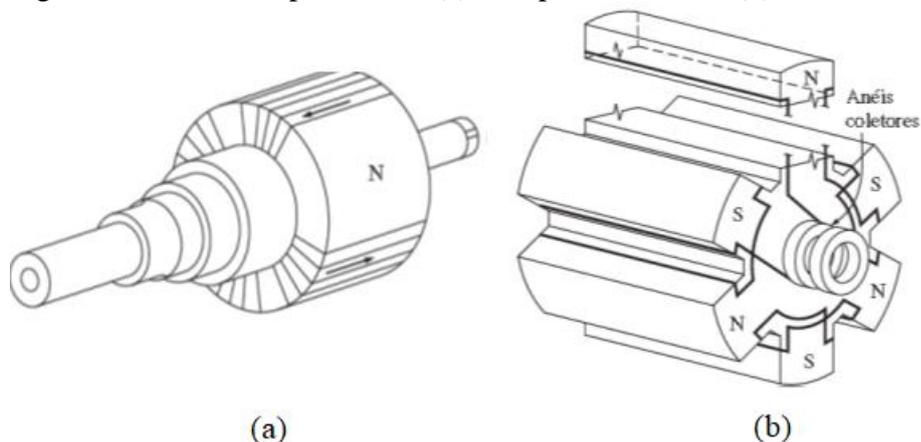
Um alternador consiste essencialmente de um rotor e de um induzido (estator). O campo magnético gerado pelo rotor é alimentado por uma fonte de Corrente Contínua (CC) chamada de excitatriz. Os geradores são projetados de forma que as linhas de força do campo magnético cortam os enrolamentos do induzido quando o motor gira o rotor de forma a induzir a tensão elétrica alternada. Na Figura 3 são apresentados uma seção em corte simplificada de um gerador síncrono.

Figura 3 - Corte transversal de um gerador síncrono simplificado



Como dito anteriormente, o rotor é um eletroímã que gera um campo magnético no interior do alternador. Os polos magnéticos do rotor podem ser construídos de forma aparente sobressaindo-se radialmente da superfície do rotor ou de forma não-aparente ficando nivelados a superfície do rotor. Na Figura 4 são apresentados esses dois aspectos construtivos diferentes.

Figura 4 - Rotor com polos lisos (a) e de polos salientes (b)



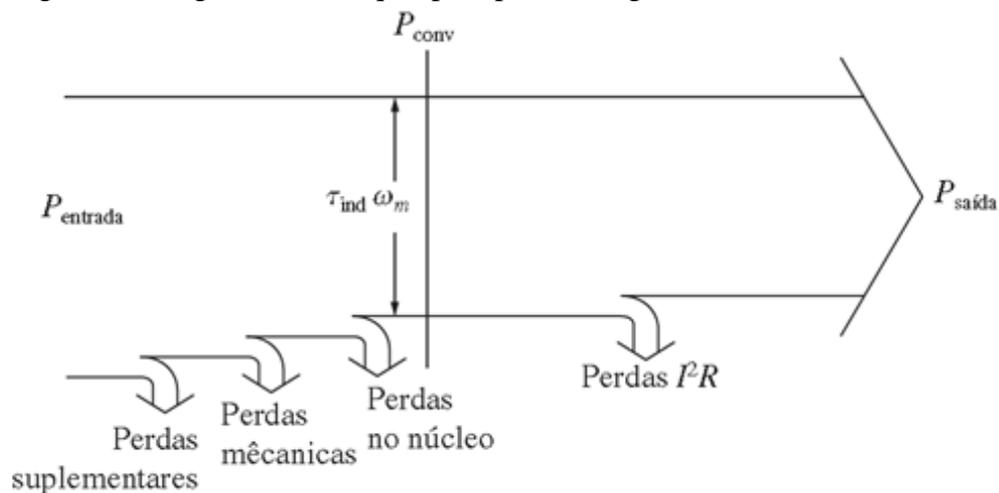
Fonte: Chapman, 2013.

Assim como qualquer outro mecanismo físico real, existem perdas associadas à conversão de potência mecânica em potência elétrica por parte dos geradores, ou seja, nem toda a energia que é fornecida ao gerador pelo motor é transformada em eletricidade. De fato, as perdas em máquinas CA podem ser agrupadas em quatro grandes conjuntos: as perdas elétricas (ou perdas no cobre) relacionadas ao efeito Joule; perdas no núcleo ferromagnético; perdas mecânicas; perdas suplementares (CHAPMAN, 2013).

- a) As perdas por efeito Joule são inerentes a toda condução de eletricidade por conta do efeito resistivo dos cabos utilizados. A energia é dissipada principalmente na forma de calor.
- b) As perdas no núcleo (ou perdas no ferro) ocorrem principalmente pelo efeito de histerese e por correntes parasitas que estão presentes nas partes metálicas do motor.
- c) As perdas mecânicas decorrem principalmente do atrito entre as partes móveis do gerador e também entre o rotor e o ar que o cerca.
- d) As perdas suplementares ou variadas são basicamente as perdas que não se incluem em nenhuma das classificações anteriores.

Na Figura 5 é apresentado um diagrama de Sanquei que caracteriza todas as perdas relacionadas ao funcionamento de um gerador. As perdas indicadas foram discutidas no item anterior.

Figura 5 - Diagrama de Sanquei para perdas no gerador



Fonte: Chapman, 2013.

2.3 O Biogás

O biogás é uma fonte de energia proveniente da digestão anaeróbica (com ausência de ar) de biomassa, em geral, como dejetos de animais, resíduos vegetais, esgoto sanitário e etc. A composição do biogás é majoritariamente Metano (CH_4) e Dióxido de Carbono (CO_2), além de traços de outros gases em composições que variam de acordo com diversos fatores, desde o substrato usado para a digestão anaeróbia até a temperatura e o pH do reator biológico (GASPAR, 2003).

O Metano, principal componente do biogás, é um gás incolor, inodoro e altamente combustível. Sua combustão apresenta uma chama azul-lilás, não produzindo particulado a partir de sua queima. O seu índice de poluição é relativamente baixo, quando comparado a outros gases combustíveis como o butano, presente no gás de cozinha convencional (GASPAR, 2003).

A produção deste gás é feita a partir do processo de digestão da matéria orgânica presente no meio, na ausência de ar, por bactérias anaeróbias. Esses microrganismos liberam enzimas que são para quebrar as moléculas orgânicas mais complexas em moléculas simples, que por sua vez podem ser absorvidas por essas bactérias e servirem de alimento para as mesmas. Durante as etapas do processo de digestão, vale dar atenção à acidulação, etapa que consiste na degradação de proteínas, gorduras e carboidratos, resultando em ácidos orgânicos e produzindo o Gás Carbônico como subproduto (MAGALHÃES, 1980).

As bactérias metanogênicas são altamente sensíveis às variações de temperatura e pH do meio, além da presença de substâncias tóxicas junto à matéria orgânica. Outros fatores também influenciam na produção do biogás, tais como: tempo de retenção da matéria orgânica no biodigestor, nutrientes dissolvidos na matéria digerida, concentração de sólidos, mistura interna no digestor e o volume total. De acordo com Magalhães (1980), são indicativos de uma boa digestão os seguintes parâmetros físico-químicos: pH maior que 7,2; metano com teor acima de 60%; CO_2 com teor máximo de 30%; temperatura entre 28 °C e 35 °C.

A utilização do biogás como recurso energético se deve à presença de Metano, que quando puro, em condições normais de pressão e temperatura, tem um poder calorífico inferior de aproximadamente 50,028 MJ/kg. Com isso, o teor de Metano no biogás é diretamente relacionado com a capacidade de extração de energia deste combustível e assim, da eficiência do sistema de geração.

2.4 Aspectos de Importância da Geração de Energia Distribuída

A geração de energia distribuída foi regulamentada no Brasil em 17 de abril de 2012 pela REN N°482/2012 - Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica, sendo posteriormente revisada em 2015 pela Resolução Normativa N°687/2015 (ANEEL, 2015). Esta Resolução veio após países como França, Alemanha e EUA já possuírem uma legislação em vigor sobre o assunto.

A REN N°687 classifica microgeração distribuída como sendo uma central geradora elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize fontes com base em energias hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada conectada à rede de distribuição de energia. Já a minigeração distribuída é considerada quando a central geradora excede os 75 kW de potência instalada, mas não ultrapassa 5 MW.

Tendo em vista os limites de potência impostos pela norma, observa-se que a geração de energia elétrica através do uso de grupos geradores de pequeno porte (potência menor que 75 kW) à base de biogás se encaixa na região denominada microgeração distribuída. Segundo dados da ANEEL (2015), cerca de 31% de todos os sistemas de geração de energia elétrica conectados à rede são de microgeração. Já os sistemas de minigeração representam 69% do total deste tipo de sistema. Isso mostra que ainda existe um potencial de mercado a ser explorado para as pequenas potências (menores que 75 kW) o que explica a iniciativa de um laboratório que certifique motogeradores a biogás nesta faixa de pequeno porte.

A Resolução No. 687 da ANEEL traz ainda o sistema de compensação de energia que visa viabilizar economicamente os projetos de geração distribuída. O funcionamento deste mecanismo é simples: o titular de uma unidade consumidora de energia elétrica, devidamente registrado junto à distribuidora local, pode fazer um projeto de geração de energia distribuída que obedeça às regras impostas pela ANEEL e pedir a conexão desta central geradora à rede elétrica local. Uma vez o projeto avaliado e aceito pela distribuidora, o excedente da energia gerada pelo cliente será injetado na rede através de um sistema de medição bidirecional que mede a quantidade de energia usada e injetada na rede elétrica. Ao final do ciclo de faturamento, o cliente recebe uma fatura de energia representando apenas o saldo energético entre produção e consumo. Esse abatimento na conta de energia é usado nos cálculos de “*payback*” deste tipo de sistema, visto que a legislação brasileira ainda proíbe a venda direta de energia elétrica por parte dos pequenos produtores.

Com a nova legislação brasileira, a produção de energia a partir de fontes renováveis vem crescendo consideravelmente, sobretudo as energias de fonte solar e eólica.

Aplicações de cogeração qualificada de energia ou geração a partir da biomassa ainda são minoritárias no quadro nacional (ANEEL, 2020).

Esse quadro pode ser revertido através da inserção de uma solução simples e pouco onerosa no mercado brasileiro como, por exemplo, grupos geradores que podem operar com diversos tipos de combustível e que apresentem rendimento apreciável. Segundo dados da ANEEL (2020), os sistemas de geração distribuída de energia já são mais de 200 mil em todo o Brasil, já em 2024 estima-se mais de 880 mil conexões de sistemas de geração de energia elétrica de pequeno porte conectados à rede elétrica. Esses dados chamam atenção para o crescente mercado envolvendo a geração distribuída e seu potencial econômico no Brasil.

2.5 Fundamentos de controladores

Em um sistema complexo, o controlador atua de forma a garantir que a saída do sistema (variável de interesse) apresente um comportamento estável, apresentando uma resposta suficientemente rápida (a depender das necessidades da aplicação) e precisa, obedecendo sempre as especificações feitas durante a fase de projeto. Uma parte fundamental do sistema de controle é a realimentação do sistema, onde o sinal de saída é reintroduzido como parte da entrada de forma que o controlador tente minimizar o distanciamento entre a saída obtida e a entrada imposta (caso de sistema com realimentação negativa) (MAYA e LEONARDI, 2010). A diferença entre o valor da entrada desejada e a saída do sistema é chamado de erro atuante, este erro é inserido no sistema de controle, que por sua vez irá produzir o sinal de controle que será passado ao sistema principal.

Um controlador é projetado com objetivos específicos em um sistema, tendo assim, características únicas para cada tipo de aplicação prevista. De forma geral, os controladores são utilizados para estabilizar sistemas que por si só seriam instáveis, além de melhorar o desempenho de um sistema durante seu regime transitório (como o tempo de resposta, por exemplo) e a precisão durante o regime permanente. Note que, dependendo do objetivo principal a ser buscado, o controlador pode variar grandemente de forma a privilegiar um dentre os três principais pontos de melhoria mencionados anteriormente. Vale ressaltar ainda que, como a grande maioria das aplicações práticas, existe um compromisso entre os resultados alcançados com um controlador em relação ao objetivo principal do sistema. Em outras palavras, um mesmo controlador pode ser especificado para garantir maior estabilidade a um sistema ao custo de uma menor performance durante o regime transiente ou depreciação da precisão em seu regime estacionário. Desta forma, uma análise detalhada do comportamento do sistema e o entendimento de suas funções práticas, são essenciais para o correto

dimensionamento do sistema de controle (MAYA e LEONARDI, 2010).

De forma geral, o sucesso dos sistemas de controle atuais, nas mais diversas áreas, deve-se principalmente a uma especificação clara e concisa. Como discutido anteriormente, as funções principais de um sistema de controle estão, normalmente, atreladas a características de qualidade e segurança dos processos, além de garantir a eficiência dos mesmos. Desta forma, é preciso que se defina de forma clara, objetiva e concisa as características de um sistema de controle para que este possa desempenhar seu papel de forma satisfatória, sob a pena de muitas vezes gerar influências catastróficas sob um processo, se mal especificado e dimensionado (FACCIN, 2004).

Nesta dissertação, observa-se que o sistema em estudo (grupo gerador a biogás) precisa atender certos requisitos da rede elétrica a fim de permanecer gerando energia e injetando essa energia gerada na rede. De forma geral, é preciso garantir que a variável de controle do sistema (frequência elétrica) esteja dentro dos parâmetros impostos por norma. Desta forma, observa-se imediatamente que o principal objetivo do sistema de controle proposto para tal sistema seria a estabilidade do mesmo. Ainda que um rápido tempo de resposta seja interessante para que o gerador possa iniciar sua operação no menor intervalo de tempo possível, essa característica fica em segundo plano quando comparada à necessidade de uma estabilidade precisa por conta do sistema de geração, sob a pena de desconexão do mesmo imediatamente (dependendo do nível da oscilação da frequência) e até danos ao sistema elétrico envolvido.

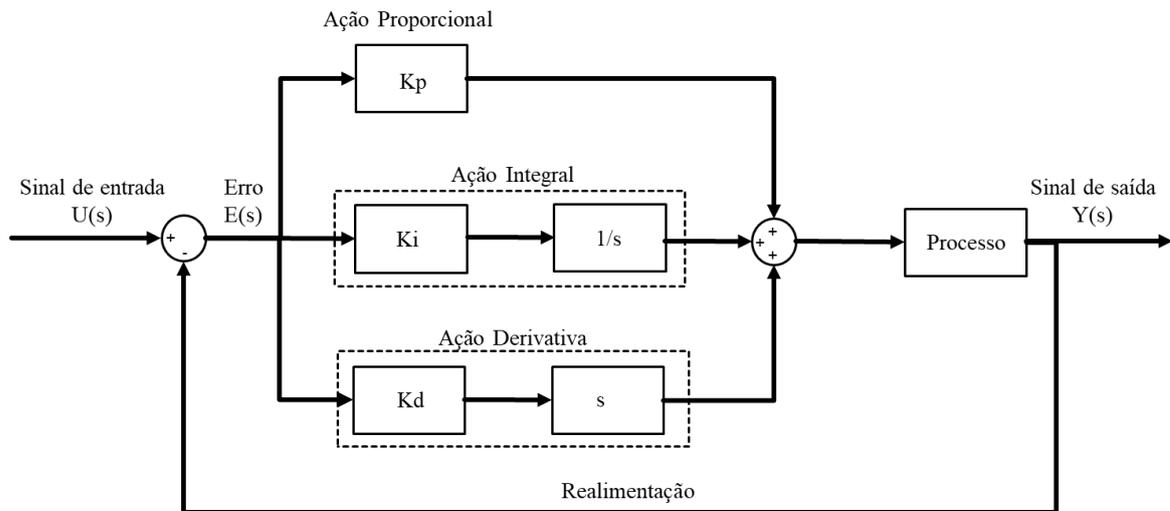
2.5.1 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Dentre as diversas formas de controle presentes na literatura e em aplicações industriais, o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o mais amplamente utilizado em aplicações industriais. Isso se deve principalmente à simplicidade, robustez e ao baixo custo de implementação, quando comparado a outras soluções disponíveis no mercado. Em muitos casos, observa-se a existência de PIDs digitais discretos, que são implementados em um computador sendo apenas mais um *software* na memória do mesmo (BRITO, 2015).

Nestes casos, o sinal contínuo de erro na entrada do controlador é amostrado de forma que possa ser convertido em um sinal digital, que é lido e processado pelo controlador. Em seguida, o sinal digital de saída do PID é convertido novamente em um sinal contínuo que pode ser interpretado pelos componentes do processo impondo ao sistema o comportamento desejado pelo controlador.

Na Figura 6 observa-se um diagrama de blocos de uma aplicação básica de controlador PID. Neste caso, utiliza-se a técnica de realimentação negativa, em que o sinal de entrada do controlador PID é o erro entre o sinal de saída e a entrada que deve ser minimizado pelo sistema de controle. Note que um controlador PID é composto pela soma de três ações distintas: proporcional, integral e derivativa. Nas seções a seguir estas três ações são tratadas individualmente em maiores detalhes.

Figura 6 - Diagrama de Blocos de um controlador PID

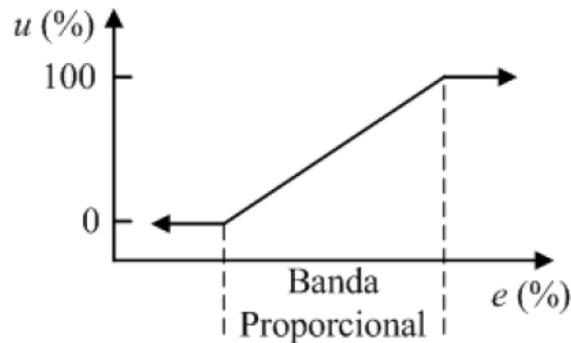


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.1.1 Ação Proporcional

A ação proporcional consiste, basicamente, na amplificação do sinal resultante da soma entre a entrada de referência e a realimentação negativa da saída, ou seja, o sinal do erro. Com isso, quanto maior o erro maior será a ação de controle aplicada ao sistema. Neste tipo de controle, ocorre apenas uma ampliação do sinal de acordo com o ganho do controlador (K_p), que pode ser ajustável para se adequar ao processo a ser controlado (LOURENÇO, 1997). Na Figura 7 é apresentada uma representação gráfica da ação de um controlador proporcional sobre a variável de entrada do sistema de controle.

Figura 7 - Representação gráfica da ação proporcional sob a variável de controle



Fonte: FACCIN, 2004.

Com isso, o controlador proporcional isoladamente tem uma ação rápida sobre a entrada, tornando mais ágil a dinâmica de todo o processo. O principal ponto negativo deste tipo de controle é que o mesmo apresenta um erro estático (erro no regime permanente). Este erro diminui à medida que o ganho proporcional K_p é aumentado, contudo, o aumento demasiado do ganho proporcional pode tornar o sistema cada vez mais oscilatório, chegando até à instabilidade do mesmo (FACCIN, 2004).

Logo, percebe-se que este tipo de controlador, por si só, é recomendado para os casos onde o ganho proporcional pode assumir valores suficientemente elevados de forma a reduzir o erro estacionário para níveis aceitáveis ou então para quando não são previstas alterações muito acentuadas nas variáveis de controle ao longo da duração do processo.

2.5.1.2 Ação Integral

Um controlador integrador gera uma ação de controle proporcional à integral do sinal de controle ao longo do tempo. A principal vantagem desta ação integral é que ele elimina o erro em regime permanente (erro estático) independente do sistema controlado (MOORE, 1999).

Por um lado, a ação integral elimina o erro estático do sistema, por outro, aumenta o tempo de acomodação do sinal de saída além de deteriorar a estabilidade relativa do sistema, efeito esse que é pouco desejado nas malhas de controle (LOURENÇO, 1997).

No caso de aplicações desse tipo a ação realizada pelo controlador depende do histórico do erro, desde o início do processo (em $t = 0$) até o instante atual da medição. Desta forma, pode-se dizer que o efeito integral atua como um mecanismo que atualiza automaticamente o valor base do controlador com ação proporcional (FACCIN, 2004).

Uma consequência direta da ação integral é a redução do ganho proporcional, quando estes forem combinados num mesmo sistema de controle. Controladores com estas características são comumente aplicados aos sistemas que possuem alterações de seus sinais de entrada com certa frequência, sempre que um controlador proporcional, por si só, não for capaz de conter o erro estático do sistema a níveis aceitáveis. Contudo, deve-se atentar para o fato de que a ação integradora em um sistema pode reforçar os efeitos de instabilidade e oscilação do mesmo (LOURENÇO, 1997).

2.5.1.3 Ação Derivativa

A ação do controle derivativo é diretamente proporcional à taxa de variação do sinal de erro, ou seja, à derivada do erro em relação ao tempo. Com isso, um efeito derivativo tem a capacidade de estimar a tendência de aumento ou diminuição do erro e atuar de forma antecipada gerando uma ação de controle de acordo com o resultado desejado (FACCIN, 2004).

Um fato que decorre do efeito derivativo e antecipatório deste tipo de controle, é que ele jamais pode ser usado por si só, sendo necessário estar acompanhado de outros efeitos de controle, tal como o proporcional. Isso vem do fato de que o sinal de controle é proporcional à variação do erro e assim ele atua apenas em regimes transientes (LOURENÇO, 1997).

Outro ponto importante a ser ressaltado é que quando se acopla o efeito derivativo a um controlador proporcional, obtém-se um controlador altamente sensível às variações do sinal de erro, uma vez que o efeito derivativo antevê as oscilações do erro e atua antes que estas possam ocorrer no sistema. O efeito derivativo não afeta diretamente o erro estacionário, que se produz quando o sistema já está em seu regime permanente, porém, atua com um amortecimento no sistema (melhorando assim a estabilidade do mesmo), permitindo que se possa aumentar o ganho proporcional K_p sem que o sistema sofra efeitos negativos e assim diminuindo o erro estático (LOURENÇO, 1997).

Contudo, os controladores derivativos apresentam sensibilidade especial ao ruído de altas frequências, que englobam desde os ruídos inerentes ao próprio processo controlado, mas também às variações das variáveis de controle ao longo do tempo.

2.5.1.4 Ação combinada Proporcional-Integral-Derivativa

O controlador obtido da união das ações Proporcional, Integral e Derivativa associa todo o conjunto de vantagens e desvantagens destes efeitos isolados, combinando assim características que são de grande utilidade no controle de processos e sistemas.

De acordo com Rhinehart (1999), um controlador PID pode ser formado a partir de diversas formas de associação das três ações distintas dentro do mesmo sistema de controle. Dentre tantas variações deste sistema de controle, duas merecem destaque por sua ampla aplicabilidade e comprovada eficácia que são a forma em série (também conhecida como interativa) e a forma em paralelo. A forma de associação dos controladores individuais em paralelo é apresentada graficamente na Figura 6. Pode-se perceber que nessa associação os efeitos Proporcional, Integral e Derivativo são aplicados ao mesmo sinal de erro e tem seus respectivos efeitos de controle somados ao final, sendo enviados então ao sistema a ser controlado. Já na forma em série do controlador PID, o efeito Integral é aplicado após a passagem do sinal de erro pelo controlador Derivativo dando o caráter interativo a este tipo de ligação. No caso do sistema desenvolvido neste estudo, decidiu-se optar pela forma em paralelo do controlador PID, visto que este formato apresentou resultados mais satisfatórios em comparação com o método em série.

De maneira geral, um PID em série apresentaria a característica intrínseca da ação proporcional de eliminar o erro estático do sistema que é causado normalmente por grandes variações nos parâmetros do sistema controlado (como é o caso do processo objeto deste estudo). O controlador Derivativo, com seu efeito de amortecimento das oscilações no regime transiente, permite que se possa aumentar o ganho do controlador Proporcional, aumentando assim a velocidade do sistema de controle sem comprometer de maneira geral a estabilidade do mesmo (LOURENÇO, 1997).

Em contrapartida, os efeitos combinados deste controlador não são sempre apresentados da forma descrita anteriormente, dependendo muito das características específicas do sistema a ser controlado e de como este sistema irá responder aos impulsos de controle. Por exemplo, aumentos excessivos do ganho proporcional levam a um aumento da instabilidade geral do sistema, principalmente quando associado ao efeito Integral que também degrada a estabilidade do sistema em seu regime transiente. Já no caso do efeito Derivativo, observa-se uma diminuição na velocidade de resposta do sistema quando este efeito se torna muito acentuado (FACCIN, 2004).

Os efeitos individuais de cada ação do controlador PID em cadeia fechada (sistema realimentado negativamente) são resumidos na Tabela 1 a seguir. É importante ressaltar que tais correlações não são exatas, uma vez que se um dos parâmetros do controlador for alterado, pode-se estar alterando o efeito de outras ações por consequência.

Tabela 1 – Efeitos de cada ação do controlador PID em sistema de malha fechada

Resposta em Malha Fechada	Tempo de Subida	Sobressinal	Tempo de Acomodação	Erro estático
Proporcional	Diminui	Aumenta	Não altera	Diminui
Integral	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Derivativo	Não altera	Diminui	Diminui	Não altera

Fonte: Adaptado pelo autor de LOURENÇO, 1997

2.6 Controlador por Lógica Fuzzy

Segundo a teoria clássica dos conjuntos, um determinado elemento x só pode assumir duas condições distintas e exclusivas: de pertencimento total ou não a um determinado conjunto. Em outras palavras, ou o elemento pertence ao conjunto ou ele não pertence. Assim, obtém-se uma caracterização binária (lógica booleana) dos elementos de um conjunto, o que pode ser representado matematicamente da forma como segue (BRITO, 2015):

$$f_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$$

$$f_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \notin A \\ 1, & \text{se } x \in A \end{cases}$$

em que a função de pertinência $f(x)$ pode assumir apenas dois valores distintos 0, se x não pertence ao conjunto e 1 se x pertence ao conjunto A . Percebe-se que essa representação é incapaz de descrever diversas situações reais em que é necessário existir uma escala de pertinência gradual de um determinado elemento a um conjunto específico (BRITO, 2015).

Por conta disso, Zadeh (1965) propôs uma lógica mais ampla, atuando de forma mais qualitativa do que quantitativa de forma similar ao raciocínio humano, para a classificação de elementos baseado em informações mais vagas e aceitando um certo grau de imprecisão sem pôr em risco a qualidade dos resultados obtidos. Assim, a Função de Pertinência foi generalizada deixando de assumir apenas os valores 0 e 1 e passando a existir em todo o intervalo contínuo $[0,1]$, assumindo um valor infinito de possibilidades dentro deste intervalo.

Para um conjunto Fuzzy, a Função de Pertinência pode ser descrita da seguinte forma:

- $F_A(x) = 1$: então o elemento x é totalmente pertinente com o conjunto A ;
- $F_A(x) = 0$: então o elemento x é totalmente não pertinente com o conjunto A ;
- $0 < F_A(x) < 1$: então o elemento x é parcialmente pertinente com o conjunto A , com grau de pertinência definido pelo valor de $F_A(x)$.

No caso dos conjuntos Fuzzy, a função de pertinência representa o quanto

determinado elemento pertence a diversos conjuntos de forma simultânea, podendo este elemento ser mais compatível com um conjunto do que outro, mas sem deixar de pertencer, em certo grau, a ambos. Assim, num conjunto Fuzzy a interpretação dada não é se um elemento pertence ao conjunto e sim o quanto ele pertence ao conjunto (FILHO, 2013).

Ainda segundo Zadeh (1965), um sistema de controle baseado em Lógica Fuzzy é mais recomendado em duas situações específicas: primeiramente, quando o processo não oferecer informações precisas que possam ser quantificadas e utilizadas pelo controlador e, segundo, quando o processo suportar, até certo grau, imprecisão em seu modelo.

Na teoria dos conjuntos Fuzzy é possível representar conhecimentos imprecisos e difusos de forma que se possa fazer inferências sobre os mesmos e gerar decisões a partir de regras definidas. Conforme já mencionado, a teoria Fuzzy baseia-se fortemente na representação dos conhecimentos humanos, dessa forma essa teoria se faz valer de termos linguísticos para a descrições de tais conhecimentos (regras). Estes conhecimentos são descritos com o uso de comandos condicionais e utilizando operadores lógicos clássicos (como por exemplo se, e, ou, então) (FILHO, 2013).

Uma regra Fuzzy é definida como um conjunto de proposições que representam um conceito Fuzzy. Na regra, constrói-se a relação de causa e consequência entre o antecedente (representado por uma condição) e um consequente (representado por uma ação). De forma geral, a estrutura de uma regra Fuzzy pode ser apresentada como (FILHO, 2013):

$$SE (u_1 \text{ é } \sigma_1) E (u_2 \text{ é } \sigma_2) E \dots E (u_n \text{ é } \sigma_n) ENTÃO (y \text{ é } \sigma)$$

em que u_i são as variáveis de entrada, σ é o conjunto Fuzzy e y é a variável de saída resultante das inferências feitas a partir das entradas e suas relações com o conjunto Fuzzy. Essa construção é bastante pertinente em casos em que o sistema possui parâmetros que variam ao longo do tempo, necessitando que o sistema de controle tenha um caráter adaptativo, de forma que sempre venha a buscar o valor ótimo de seus próprios parâmetros à medida que o sistema muda ao longo do tempo.

Neste trabalho, a Lógica Fuzzy é utilizada como forma de assegurar que as alterações nos valores de composição do combustível e carga elétrica solicitada do sistema de geração (ambos parâmetros da modelagem matemática do sistema a ser apresentada na seção 3) não venham a desestabilizar o sistema de geração ao ponto de que as variáveis de saída (tensão e frequência elétrica) não ultrapassem limites especificados no projeto.

Os modelos de controle aplicados aos sistemas Fuzzy são normalmente compostos por diversas variáveis de entrada, que se relacionam através de numerosas condições e ainda

possuindo diferentes funções de associação entre si. Controladores Fuzzy tornam-se preferidos em relação às demais técnicas clássicas, sobretudo quando se está lidando com sistemas de complexos onde diversos fenômenos ocorrem de forma simultânea (e até aleatória), por questões de não linearidade dos modelos matemáticos destes sistemas e condições dinâmicas das variáveis ao longo do tempo (como é o caso da aplicação proposta neste trabalho). Esta preferência em relação aos Controladores Fuzzy vem, principalmente, do fato que estes apresentam facilidades quanto à adequação da estratégia de controle humano às regras de controle, a simplicidade das leis de controle e da flexibilidade inerente às regras linguísticas deste tipo de sistema (FILHO, 2013).

2.6.1 Fundamentos de projeto de Controladores Fuzzy

Para a concepção de um sistema de controle Fuzzy, a peça fundamental que fornece o conhecimento necessário para a elaboração da base de regras linguísticas do modelo é a experiência do operador humano do sistema a ser controlado. É baseado nessa experiência que se pode definir o conjunto de condições (SE – ENTÃO) que servirão para relacionar antecedentes e consequentes. Assim, as regras do Controlador Fuzzy expressam como a atuação deve ser feita no sistema baseado nas condições atuais do mesmo, de forma similar às estratégias humanas tomadas pelos operadores do processo.

Existem dois questionamentos básicos que o operador deve se fazer na hora de projetar o sistema de controle Fuzzy: primeiro, como o sistema deve se comportar em cada situação do processo quando uma das variáveis mudar; a segunda é como deve ser a resposta do sistema caso alguma perturbação externa venha a interferir no processo (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Segundo Ross (2010), as etapas do projeto de um Controlador Fuzzy podem ser descritas da seguinte forma:

- 1 – Identificar as variáveis (entradas, estados e saídas) do sistema;
- 2 – Dividir o universo de variáveis existentes e seus domínios de existência em conjuntos Fuzzy menores;
- 3 – Designar ou determinar uma Função de Pertinência para cada um desses subconjuntos Fuzzy;
- 4 – Designar as relações fuzzy entre os subconjuntos das entradas, ou dos estados, de um lado e os subconjuntos das saídas do outro, de forma a constituir as bases de regras;

5 – Determinar os fatores de escalonamento mais apropriados para as variáveis de entrada e de saída de forma que os valores destas estejam contidos nos intervalos $[0,1]$ ou $[-1,1]$ a depender da aplicação pretendida;

6 – Aplicar o processo de *fuzzificação* às entradas, ou seja, transformar as variáveis de entrada do sistema (que são grandezas físicas específicas) em elementos que possam ser tratados dentro da teoria dos conjuntos Fuzzy;

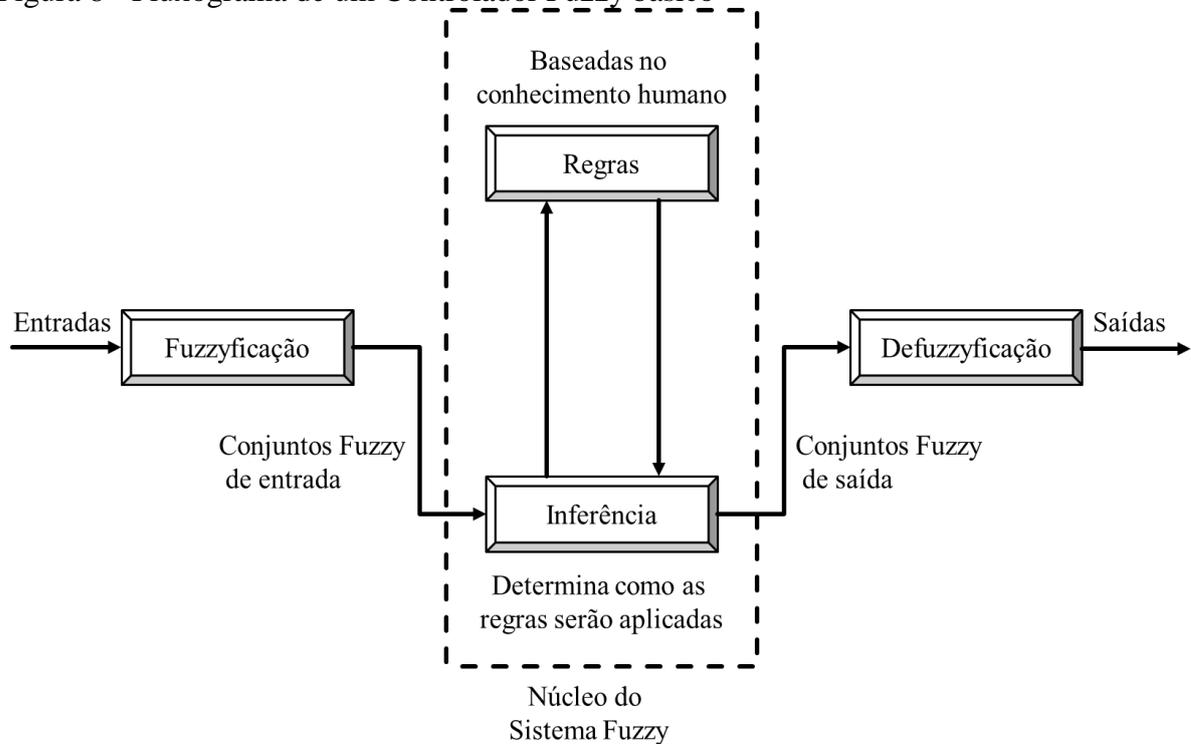
7 – Usar a aproximação do raciocínio fuzzy para inferir as contribuições dadas por cada entrada para a saída do sistema;

8 – Agregar as saídas fuzzy recomendadas por cada uma das regras linguísticas;

9 – Aplicar o processo de *defuzzificação* nas saídas para que as mesmas retomem sentido físico para o processo e possam ser aplicadas ao sistema;

Assim, na Figura 8 é apresentado um fluxograma da estrutura básica de funcionamento de um controlador Fuzzy, contemplando as etapas descritas no passo-a-passo anterior:

Figura 8 - Fluxograma de um Controlador Fuzzy básico



Fonte: Adaptado pelo autor de BRITO (2015).

O processo de *fuzzificação* é encarregado de transformar os sinais escalares dos sensores do processo, que representam o estado da variável de controle medida, realizando um

escalonamento de forma que esses sinais possam integrar o domínio das variáveis Fuzzy correspondentes, transformando tais sinais em conjuntos Fuzzy, possibilitando assim que estes sejam tratados pelas instâncias das variáveis linguísticas definidas no sistema.

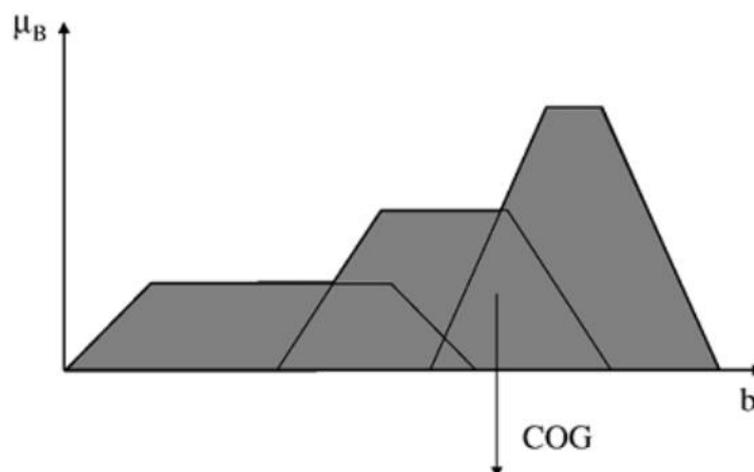
A inferência é um processo que recebe e trata os dados fuzzy de entrada, juntamente com as regras, de forma a inferir quais ações serão tomadas baseadas no conjunto de regras linguísticas previamente incorporadas ao sistema. As Funções de Pertinência são responsáveis pelas normalizações do universo de discurso e as formas dos espaços de entrada e saída. Desta forma, a apresentação fica mais próxima da lógica do raciocínio humano, tornando a etapa de aquisição de conhecimento para a elaboração das regras, uma tarefa mais fácil.

Finalmente, para que os resultados obtidos com as inferências possam ser utilizados diretamente pelo sistema de controle, é preciso transformar tais resultados em valores numéricos correspondentes aos sinais de controle compreendidos pelos componentes do sistema. Para isso, põe-se em prática o procedimento de *defuzzyficação*. Existem diversos estudos que se debruçam sobre esta etapa em específico, buscando desenvolver métodos mais adequados para determinados casos específicos ou comparando métodos já existentes. Alguns dos principais métodos empregados são (FILHO, 2013):

- Método do Critério Máximo: neste método, a ação de controle produzida deriva do valor no qual a Função de Pertinência atinge seu máximo no conjunto fuzzy de saídas;
- Método da Média dos Máximos: nesse método, a ação de controle produzida é obtida pelo valor médio de todas as ações de controle locais, em que a Função de Pertinência assume valores máximos;
- Método do Centro de Gravidade: dentre as estratégias de *defuzzyficação*, o Método do Centro de Gravidade é o mais utilizado. Para cada variável de controle é feito o cálculo da integral da Função de Pertinência no conjunto fuzzy de saída, tomando-se o ponto que divide esta integral ao meio, em outras palavras, equivale ao cálculo do centro de gravidade da função de associação.

Na Figura 9 é mostrada uma representação gráfica do método do Centro de Gravidade de *defuzzyficação*. É possível comparar este método à média aritmética para uma distribuição de dados, apenas com a diferença que os pesos nesse caso são representados pelo valor assumido pela Função de Pertinência, indicando o grau de compatibilidade entre um elemento e o conceito modelado pelo conjunto fuzzy de saída.

Figura 9 - Representação gráfica do Método do Centro de Gravidade



Fonte: SABOYA et al. (2006).

Em um controlador Fuzzy é importante que o número de regras existentes seja suficiente para mapear totalmente todas as combinações de termos das variáveis, isto é, que a base seja completa, de forma a assegurar que sempre, ao menos uma das regras será ativada quando determinada entrada for imposta ao sistema. De maneira geral, tais regras apresentam um formato de sistema MIMO (Múltiplas entradas/Múltiplas saídas) ou ainda podem ser formadas por associações de sistemas MISO (Múltiplas entradas/Uma saída) (BRITO, 2015).

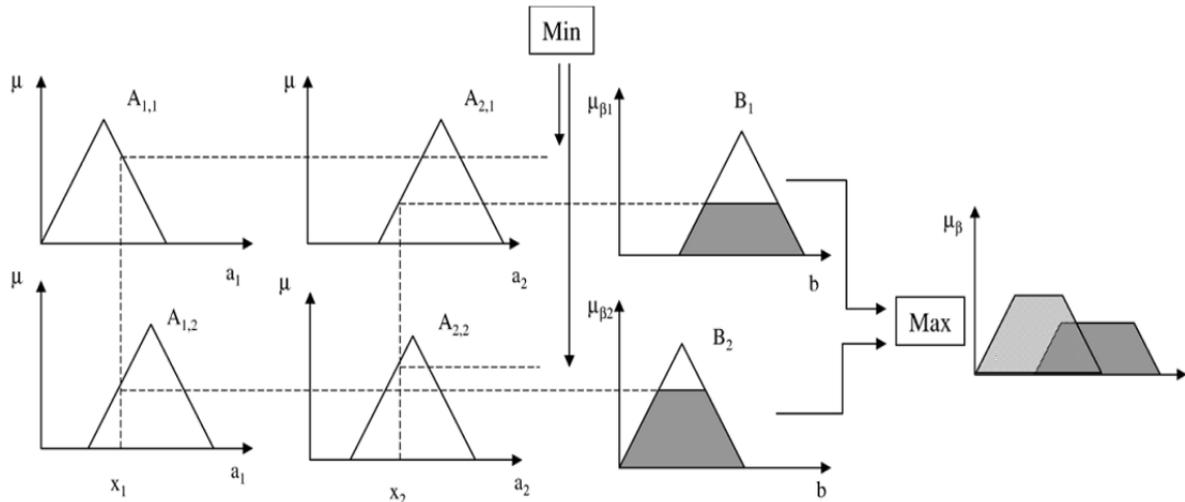
A qualidade do controlador Fuzzy está diretamente associada à qualidade das regras que o definem, de forma que tais regras sejam claras e consistentes. Transpor essas regras na forma de condicionais SE ... ENTÃO não é tarefa fácil, mesmo para aqueles que são especialistas no processo a ser controlado. Existem formas alternativas, para extrair estas regras a partir de conjuntos de dados numéricos, sendo bastante utilizadas em problemas de classificação e previsão de séries temporais (BRITO, 2015).

Existem diferentes tipos de Controladores Fuzzy referenciados na literatura especializada, dentre os quais pode-se destacar os modelos clássicos de Mamdani e o de Larsen, e os modelos de interpolação, abrangendo o modelo de Takai-Sugeno e o de Tsukamoto, por exemplo. As principais diferenças entre estes modelos vêm da forma de representação dos termos na premissa, quanto à representação das ações de controle e quanto aos operadores utilizados para a implementação do sistema (LEE, 1990).

No caso deste trabalho, o modelo usado foi proposto por Mamdani nos anos 1970. Este método foi adotado como padrão durante muitos anos para utilização dos conceitos da Lógica Fuzzy. As regras Fuzzy neste modelo possuem relações tanto em seus antecedentes quanto em seus consequentes, tendo a sua semântica como sendo tradicionalmente chamada de inferência máximo-mínimo. Na Figura 10 é apresentada uma representação gráfica da

inferência máximo-mínimo para um caso de apenas duas regras genéricas.

Figura 10 - Representação gráfica do modelo Mamdani



Fonte: SABOYA et al. (2006).

2.7 Trabalhos relacionados

A operação de um motor de ignição por compressão é modelada por Graciano et al. (2016) utilizando misturas dos combustíveis diesel, biodiesel e biogás. O modelo foi escrito para operação dinâmica e de estado estacionário e combina princípios da termodinâmica clássica e transferência de calor, com o uso de correlações empíricas e teóricas. O modelo é ajustado e validado experimentalmente por comparação direta dos resultados obtidos com os dados experimentais publicados anteriormente e os valores nominais presentes nas curvas fornecidas por fabricantes de motores. Em seguida, a modelagem é usada para simular diferentes cenários de mistura de combustível. Os resultados da simulação mostram a redução da potência do motor para diferentes taxas de diminuição na quantidade de combustível fóssil.

Um modelo de motor de ignição por centelha é projetado por Bastida et al. (2017). O motor opera com gás natural em uma unidade combinada de calor e energia. O modelo não-linear obtido é linearizado para pontos de operação em diferentes condições de carga e, em seguida, é derivada uma representação da função de transferência, permitindo o projeto de sistema de controle linear no domínio da frequência. O controlador linear simples proposto obtém bons resultados. No entanto, a qualidade da energia gerada não é analisada neste trabalho.

Kumar et al. (2017) propõe um estudo de simulação de biogás alimentando um MCI capaz de produzir energia elétrica através do acoplamento a um gerador síncrono de ímã permanente. Os desempenhos de dois controladores são avaliados: PID e um controle baseado em Lógica Fuzzy. Os resultados da simulação mostram que o sistema baseado em Lógica Fuzzy

apresenta melhores resultados no controle do mecanismo, do que um controlador PID. No entanto, o desempenho dos controladores não é analisado em diferentes cenários de variação de carga.

No trabalho desenvolvido por Jain et al. (2018) é apresentado um controlador baseado em Lógica Fuzzy-PI que foi projetado para regular tensão e frequência de um gerador auto-excitado operando com velocidade constante, para alimentar cargas trifásicas a 4 fios. Com base nos resultados obtidos, é demonstrado que o desempenho transitório dos reguladores baseados em Fuzzy-PI foi considerado satisfatório como mecanismo de balanceamento de carga, nivelador de carga, eliminador de harmônicos e controlador de tensão e frequência.

Um esquema de controle de um motor de Corrente Contínua, composto para regulação de velocidade é proposto por Chen e Wu (2017). Um Controlador por Lógica Fuzzy (CLF) possui uma entrada, a derivada do erro de velocidade, e três saídas, as três constantes de ganho de um controlador PID. Portanto, o PID ajustado pelo CLF regula a velocidade do motor de acordo com o erro de velocidade angular. Assim, o desempenho do sistema de controle composto é melhor que o controlador PID por si só. No entanto, as respostas dos controladores para condições de variações de carga não são consideradas.

O desempenho de diferentes funções objetivas comumente usadas em Controle da Frequência e Controle de Geração Automática é avaliado por Jagatheesan et al. (2018). As funções objetivas comumente usadas em ambos os métodos são: Erro Quadrático Integral (ISE do termo em inglês), Erro Quadrático Integral de Tempo (ITSE do termo em inglês), Erro Absoluto Integral (IAE do termo em inglês) e Erro Integral Absoluto de Tempo (ITAE do termo em inglês). As funções objetivas são usadas para ajustar os ganhos do controlador PID usando Inteligência Artificial (AI) com base na Técnica de Otimização de Colônias de Formigas (ACO do termo em inglês). O desempenho dos sistemas de geração é medido considerando a análise das especificações no domínio do tempo, notadamente o tempo de acomodação, o tempo de subida e sobressinal. O sobressinal é menor usando as funções objetivas ITAE e IAE. Embora a resposta do controlador PID baseado em ITSE garanta um mínimo sobressinal, ela acaba levando mais tempo para acomodar-se completamente em comparação com outras respostas de funções objetivas.

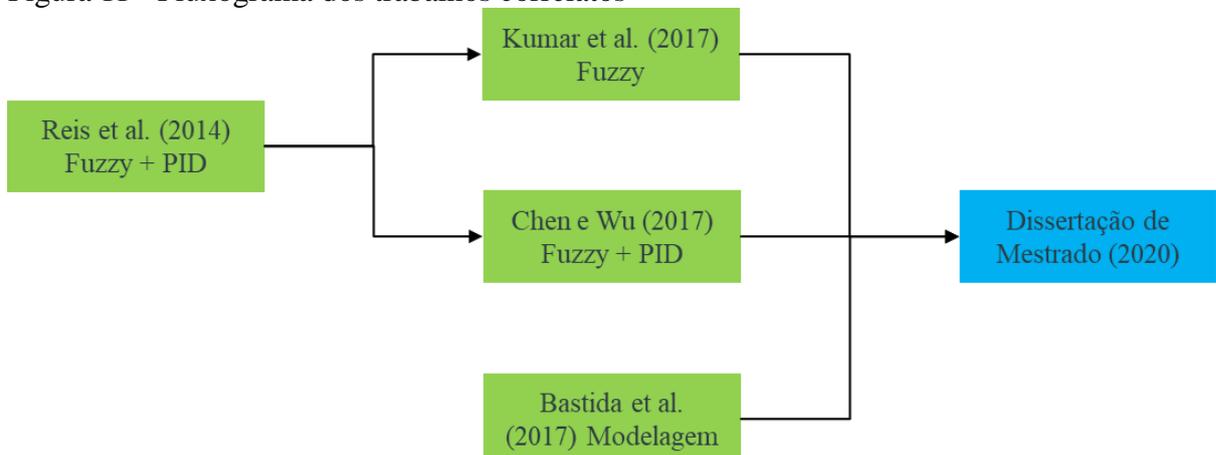
Uma estratégia de controle Fuzzy para ambas operações, autônoma e conectada à rede de um grupo gerador a diesel é proposta por Reis et al. (2014). A Lógica Fuzzy é combinada com um controlador PID resultando em um controlador Fuzzy PD + I. O sistema de controle foi projetado para reduzir as oscilações na tensão terminal e fornecer um fator de potência mais próximo da unidade. O controlador apresenta bons resultados e suas principais vantagens são a estratégia de controle flexível, o que permite ao grupo gerador operar de forma

independente ou em modo conectado à rede sem modificar o *loop* do sistema de controle, e a transição entre os dois modos ocorre sem causar grandes perturbações ao sistema.

Observa-se que o trabalho aqui proposto concentra diversos esforços já descritos na literatura, no sentido de desenvolver um sistema de controle híbrido Fuzzy-PID que seja capaz de assegurar a geração de energia elétrica a partir do biogás, levando em consideração as variações de carga e de composição do combustível. Outro diferencial proposto neste trabalho é o uso do Ciclo Otto como ciclo termodinâmico, em detrimento dos motores a ciclo Diesel, que são mais comumente encontrados nas soluções comerciais.

Na Figura 11 é mostrado um fluxograma com as principais contribuições de trabalhos relacionados que culminaram neste estudo e como estes trabalhos estão relacionados entre si. Em Reis et al. (2014) a estratégia de controle é proposta para um motor de ciclo Diesel, que difere consideravelmente do modelo empregado nessa Dissertação (ciclo Otto), além do fato de que o sistema de controle não está preparado para operar com combustíveis de composição variável. Já Kumar et al. (2017) trata de forma separada dois sistemas de controle distintos, um PID e um Controlador Fuzzy, sendo que neste caso não se é apresentada uma combinação dos efeitos destas duas técnicas. Em Chen e Wu (2017), o foco é na construção de um controlador híbrido Fuzzy+PID, trazendo uma arquitetura semelhante à aqui empregada (Controlador Fuzzy sintoniza os ganhos do PID de acordo com as entradas do sistema), porém com uma aplicação diferente da proposta de geração de energia elétrica em Corrente Alternada. Por fim, Bastida et al. (2017) traz elementos interessantes da modelagem de Motores de Combustão Interna, porém tratando exclusivamente de combustíveis com composições (e por consequência Poder Calorífico) constantes, sendo necessárias alterações e adições ao modelo para que o mesmo possa vir a contemplar a análise dos combustíveis como o biogás.

Figura 11 - Fluxograma dos trabalhos correlatos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste capítulo tratou-se dos aspectos teóricos envolvidos neste trabalho. Primeiramente foi apresentado o princípio de funcionamento dos Motores de Combustão Interna e dos Alternadores Síncronos que juntos formam o grupo gerador propriamente dito. Foram apresentados conceitos básicos relacionados à essas máquinas e como operam de forma a transformar energia química do combustível em energia mecânica e em seguida energia elétrica. Em seguida, discutiu-se sobre o biogás, como é produzido e seu papel relevante na matriz energética renovável. Discutiu-se ainda, aspectos normativos ligados à Geração Distribuída no Brasil, quais os mecanismos normativos se aplicam a este projeto e como o produto desenvolvido neste trabalho se encaixa no conceito de Geração Distribuída e no sistema de compensação de energia. Ademais, foram abordados os controladores, neste caso, o controlador PID e o Controlador Fuzzy. Discutiu-se como tais controladores atuam nos sistemas complexos e quais parâmetros são necessários para projetar tais controladores, além de como suas ações de controle impactam o funcionamento do sistema, quais as vantagens e desvantagens de cada um. Por fim, foi feito um levantamento bibliográfico de trabalhos científicos relacionados ao tema desta Dissertação para que se pudesse determinar quais contribuições seriam mais importantes e quais objetivos deveriam ser focados em detrimento de outros.

3 METODOLOGIA

3.1 Modelagem do Sistema

Tendo em vista a complexidade do sistema estudado, foram necessárias algumas simplificações e hipóteses para permitir o projeto do controlador adequado. Em primeiro lugar, foi considerado que o sistema seria do tipo Entrada Única – Saída Única (da sigla em inglês SISO) sendo a rotação angular (ou frequência) a variável principal do sistema. Em segundo lugar, foi proposta a abordagem do Modelo do Valor Médio (MVM). No modelo MVM todos os sinais, parâmetros e variáveis são considerados como médias em relação a múltiplos ciclos de operação. Nesse tipo de abordagem, o tempo é a variável independente das equações diferenciais que modelam o sistema (ERIKSSON e NIELSEN, 2014).

Para chegar a um modelo matemático para descrever o sistema como um todo, foi feita a divisão do mesmo em dois subsistemas distintos: um representando os fenômenos mecânicos associados ao funcionamento do Motor de Combustão Interna (MCI) e o outro para representar a operação do Alternador Síncrono (AS). A variável que une os dois subsistemas é a rotação angular do MCI que é responsável por induzir a geração de energia no alternador e a

saída é representada pela frequência elétrica.

3.1.1 Modelagem do Motor de Combustão Interna

De forma geral, um MCI admite o ar através da sucção feita durante o movimento do pistão no cilindro. Durante o preenchimento do cilindro com o ar atmosférico, combustível é injetado na câmara de combustão, ocorrendo a mistura de ambos, até que todas as válvulas se fecham e o cilindro começa a comprimir tal mistura. Quando o Ponto Morto Superior (PMS) é alcançado, a centelha fornece a energia necessária para a mistura entrar em combustão e liberar grande quantidade de energia. A energia gerada pela combustão é transformada em torque que é aplicado ao eixo principal do MCI, que por sua vez está acoplado ao alternador síncrono, transmitindo a rotação do eixo para o rotor, induzindo as tensões elétricas e por consequência gerando energia elétrica. Todo este encadeamento de fenômenos e processos foi subdividido de forma que cada um é tratado individualmente e ao final a cadeia completa é apresentada de forma matemática e gráfica.

3.1.1.1 Modelagem da admissão de ar

Segundo Bastida et al. (2017), o escoamento de um fluido compressível através de orifício segue a equação de Bernoulli da seguinte forma:

$$q_{in} = C_d [1 - \cos(u)] \frac{\pi}{4} D^2 \frac{p_{amb}}{\sqrt{R\theta_{amb}}} f(p_{amb}, p_{im}) \quad (1)$$

Em que: q_{in} é a vazão de ar admitido; C_d é o coeficiente de descarga da válvula borboleta; u é o ângulo de abertura da válvula borboleta; D é o diâmetro da válvula borboleta; p_{amb} representa a pressão ambiente; R denota a constante universal dos gases ideais; θ_{amb} é a temperatura do ambiente; p_{im} é a pressão no interior do coletor de admissão.

A partir da Equação (1) é possível observar que o fluxo de ar admitido pelo MCI é diretamente proporcional ao ângulo de abertura da válvula borboleta (u), que pode variar entre 0° e 90° . O fator f que é dado em função das pressões ambiente e no interior do coletor de admissão pode ser descrito a partir da relação a seguir (BASTIDA et al., 2017):

$$f = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{k \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad p_{im} \leq p_{cr} \\ \left[\frac{p_{im}}{p_{amb}} \right]^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_{im}}{p_{amb}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad p_{im} > p_{cr} \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$p_{cr} = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k}{k+1}} p_{im} \quad (3)$$

Em que: k é a razão entre os calores específicos (c_p e c_v) do ar de admissão; p_{cr} é a pressão crítica. Ressalta-se que caso $p_{im} \leq p_{cr}$ o escoamento será do tipo subsônico e linear, caso contrário, um escoamento supersônico se desenvolve e a modelagem do escoamento se torna não-linear (BASTIDA et al, 2017). Em todos os testes realizados neste trabalho (conforme Capítulo 3, Seção 3.2) o escoamento se manteve subsônico, ou seja, com comportamento linear.

3.1.1.2 Modelagem da dinâmica do Coletor de Admissão

O coletor de admissão é responsável por suprir o ar necessário para a combustão nos cilindros, através de um fluxo constante durante a operação do MCI, sendo proporcional à velocidade de rotação angular do eixo do motor (GUZZELLA e ONDER, 2009). Para este estudo, foi considerado que o Coletor de Admissão opera com fluxo de ar de forma adiabática, ou seja, não há trocas de energia entre o sistema e sua vizinhança. De acordo com Guzzella e Onder (2009), a dinâmica do Coletor de Admissão pode ser modelada a partir da Equação (4):

$$\dot{p}_{im} = \frac{R\theta_{im}}{V_{im}} [q_{in} - q_{cyl}] \quad (4)$$

Em que: θ_{im} é a temperatura no interior do Coletor de Admissão; V_{im} é o volume do Coletor; q_{cyl} é a vazão de ar que deixa o Coletor em direção aos Cilindros, onde ocorre a reação de combustão. A dedução desta equação provém da Equação da Continuidade e Conservação da Massa, porém foi omitida neste trabalho pois foge ao escopo da proposta de estudo. A dedução completa pode ser encontrada em Guzzella e Onder (2009).

3.1.1.3 Fluxo de Massa através do Motor

A combustão de reação típica possui como reagentes o Combustível e o Comburente (neste caso o Oxigênio contido no Ar). Para que esta reação ocorra de acordo com a estequiometria, o motor deve admitir a quantidade correta de ar que irá para os cilindros onde ocorrerá a combustão de fato. Uma forma de medir a qualidade da estequiometria da reação é dada pela AFR (Razão Ar Combustível, na sigla em inglês). Para a realização dos testes foi considerado que a AFR é constante e estequiométrica. Assumiu-se ainda que a temperatura na

entrada do Cilindro é a mesma temperatura do Coletor de Admissão. Assim, a Equação (5) descreve o fluxo de massa que deixa o Coletor de Admissão para o interior do Cilindro (ERIKSSON e NIELSEN, 2014):

$$q_{cyl} = \eta_{vol} \frac{V_D p_{im} \omega}{4\pi R \theta_{im}} \quad (5)$$

$$\eta_{vol} = \gamma_0 + \gamma_1 \omega + \gamma_2 \omega^2 \quad (6)$$

A Equação (6) apresenta uma relação empírica proposta por Eriksson e Nielsen (2014) para determinar a Eficiência Volumétrica do MCI. Na Equação (5) tem-se: η_{vol} eficiência volumétrica; V_D volume do Cilindro; ω velocidade de rotação do eixo do motor. Os parâmetros γ_i da Equação (6) são determinados experimentalmente, isto é, a eficiência volumétrica é um parâmetro que depende fortemente do ponto de operação considerado para a análise.

3.1.1.4 Torque do Motor

Com a reação de combustão se desenvolvendo em um volume confinado (câmara de combustão), ocorre um aumento brusco na pressão interna do cilindro, pressão essa que força um movimento descendente no pistão dando a energia necessária para que o Eixo do motor rotacione e, por consequência, gerando o torque necessário para o movimento do alternador. O torque líquido gerado pelo motor é uma composição de diversas contribuições distintas, as quais serão discutidas a seguir (ISERMANN, 2014).

Primeiramente, de forma geral, tem-se que a parcela de torque útil é gerada durante a combustão no cilindro. O Torque da Combustão (T_c) depende basicamente da qualidade da queima do combustível e na eficiência de transmitir a energia liberada até o eixo do motor. Em segundo lugar, tem-se as contribuições negativas do Torque de Fricção (T_f), gerado pelos atritos existentes entre as partes móveis do motor e o Torque de Bombeamento (T_p), que representa o torque necessário para bombear os gases da combustão para fora do cilindro.

As Equações (7), (8), (9), (10), (11) e (12) detalha cada uma dessas contribuições e como podem ser calculadas a partir de parâmetros do motor e de sua operação, conforme segue (BASTIDA et al., 2017; GUZZELLA e ONDER, 2009; ISERMANN, 2014; YUN et al., 2013):

$$T_m = T_c - T_f - T_p \quad (7)$$

$$T_c = \eta_c q_f H \quad (8)$$

$$\eta_c = 0,775 \left[1 - \frac{1}{r_c^{k-1}} \right] \eta_{ign} \quad (9)$$

$$q_f = \frac{q_{cyl}}{AFR} \quad (10)$$

$$T_f = (0,061 + 1,167 p_{max} + 4,9 * 10^{-6} \omega) \frac{V_D}{4\pi} \quad (11)$$

$$T_p = (p_{amb} - p_{im}) \frac{V_D}{4\pi} \quad (12)$$

Em que: η_c é a eficiência da combustão; q_f é a massa de combustível injetada; H representa o Poder Calorífico Inferior do combustível; r_c é a razão de compressão do motor; η_{ign} representa a eficiência do sistema de ignição por centelhamento; p_{max} é a máxima pressão atingida pelos gases durante a combustão.

3.1.1.5 Inércia do Sistema

Foi feita uma análise da inércia presente no sistema mecânico do gerador como um todo. É fato que o alternador síncrono também tem uma influência na inércia global do sistema, porém para simplificação do modelo foi considerado que a parcela de contribuição da inércia do gerador será calculada a partir da potência elétrica solicitada do mesmo pelas cargas elétricas associadas ao circuito da geração. Dessa forma, nas Equações (13) e (14) é apresentado o modelamento dos efeitos de inércia (GUZZELLA e ONDER, 2009):

$$T_L = \frac{P_e}{\omega \eta_e} \quad (13)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} [T_m - T_L] \quad (14)$$

Em que: T_L representa o torque solicitado pela carga; P_e é a potência elétrica extraída do alternador síncrono; η_e é a eficiência do sistema elétrico e geração.

3.1.1.6 Equação geral do sistema mecânico

Uma vez que todas as etapas do processo foram descritas matematicamente, do ar de admissão ao torque gerado e, conseqüentemente, da energia elétrica, é possível deduzir duas equações principais que representam todo o sistema:

$$\dot{p}_{im} = \varepsilon_1[1 - \cos(u)] - \varepsilon_2 p_{im} \omega \quad (15)$$

$$\dot{\omega} = \alpha_1 p_{im} - \alpha_2 \omega - \alpha_3 \quad (16)$$

Em que: \dot{p}_{im} representa a derivada primeira em relação ao tempo da pressão no interior do Coletor de Admissão; $\dot{\omega}$ representa a derivada primeira em relação ao tempo da velocidade de rotação do eixo do motor; as constantes ε_i e α_i em (15) e (16), respectivamente, são derivadas do desenvolvimento das equações (1) a (14) como uma combinação dos vários parâmetros do sistema apresentados ao longo da modelagem matemática. Cada ponto operacional proposto no presente estudo gera uma combinação diferente de constantes, o que leva a um comportamento diferente do sistema em cada ponto.

3.1.2 Modelagem do Alternador Síncrono

O Alternador Síncrono (AS) foi considerado como um sistema que possibilita a produção de eletricidade a partir da energia mecânica obtida do MCI. O modelo dinâmico do AS é derivado do referencial síncrono bifásico d-q, cujo eixo q encontra-se deslocado 90° à frente do eixo d em relação à direção de rotação (ROLAN et al, 2009).

O modelo matemático que descreve a armadura do gerador síncrono em relação ao referencial dq é dado pelas equações que seguem (BOLDEA, 2015; KRAUSE et al, 2002):

$$v_d = -R_s i_d - \Psi_q \omega + \frac{d\Psi_d}{dt} \quad (17)$$

$$v_q = -R_s i_q - \Psi_d \omega + \frac{d\Psi_q}{dt} \quad (18)$$

Em que: v_i representa a tensão terminal da armadura no eixo i ; R_s é a resistência de fase da armadura; i_i é a corrente terminal da armadura no eixo i ; Ψ_i representa o fluxo total na armadura no eixo i ;

Assim, o fluxo total através da armadura nos eixos d e q é, respectivamente (JADRIC et al, 2000):

$$\Psi_d = -(L_{ls} + L_{md})i_d + L_{md}(i_{fd} + i_{kd}) \quad (19)$$

$$\Psi_q = -(L_{ls} + L_{mq})i_q + L_{mq}i_{kq} \quad (20)$$

Em que: L_{ls} é a indutância de dispersão da armadura; L_{mi} é a indutância de acoplamento da armadura no eixo i ; L_{md} é a indutância de acoplamento no eixo d ; L_{mq} é a indutância de acoplamento no eixo q ; i_{fd} corrente terminal de campo no enrolamento; i_{ki} corrente do enrolamento de amortecimento no eixo i .

O campo eletromagnético do AS é calculado pela Equação (21) (JADRIC et al, 2000):

$$v_{fd} = R_{fd}i_{fd} - L_{md} \frac{di_d}{dt} + (L_{lfd} + L_{md}) \frac{di_{fd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (21)$$

Em que: v_{fd} é a tensão no enrolamento de campo; R_{fd} é a resistência do enrolamento de campo; L_{lfd} representa a indutância de dispersão do enrolamento de campo.

As equações (22) e (23) modelam o enrolamento amortecedor do AS (JADRIC et al, 2000):

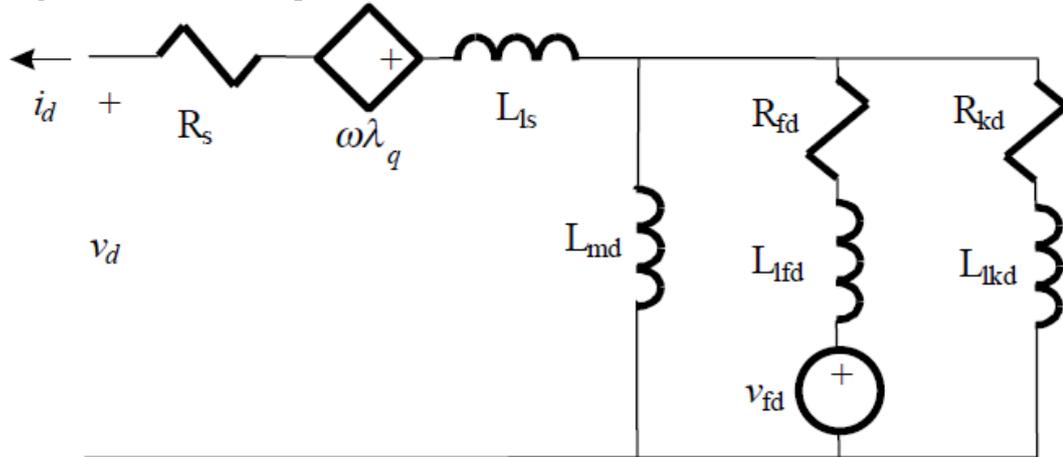
$$0 = R_{kd}i_{kd} - L_{md} \frac{di_d}{dt} + (L_{lkd} + L_{md}) \frac{di_{kd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} \quad (22)$$

$$0 = R_{kq}i_{kq} - L_{mq} \frac{di_q}{dt} + (L_{lkq} + L_{mq}) \frac{di_{kq}}{dt} \quad (23)$$

Em que: R_{ki} é a resistência do enrolamento de amortecimento no eixo i ; L_{lki} representa a indutância de dispersão do enrolamento de amortecimento no eixo i .

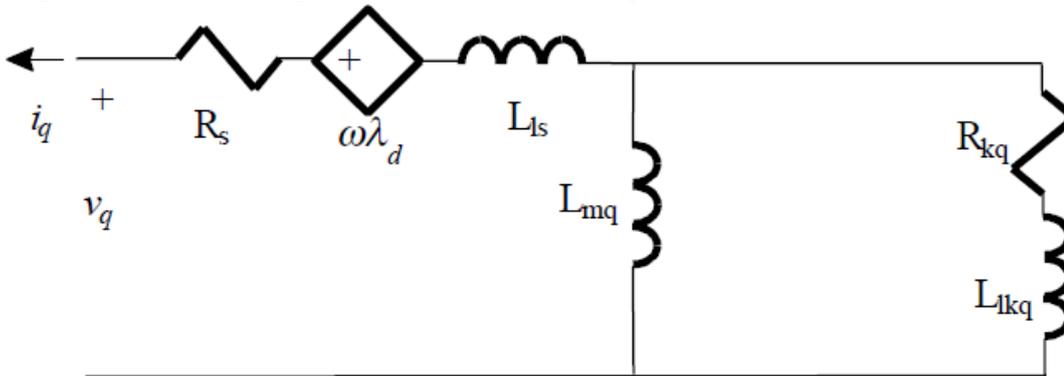
Nas Figuras 12 e 13 são mostrados o circuito equivalente do AS no sistema de coordenadas síncrono d-q:

Figura 12 - Circuito equivalente do AS no eixo d:



Fonte: Adaptado pelo autor de JADRIC et al, 2000.

Figura 13 - Circuito equivalente do AS no eixo q:



Fonte: Adaptado pelo autor de JADRIC et al, 2000.

3.2 Parâmetros Experimentais

Os parâmetros operacionais necessários para a modelagem do sistema de geração foram obtidos experimentalmente a partir de uma bancada de testes de motogeradores a biogás, equipado com um MCI de Ciclo Otto acoplado a um Alternador Síncrono trifásico. A instrumentação e o controle da bancada de testes são um sistema Compact RIO da National Instruments utilizando o Labview como linguagem principal do sistema. Na Tabela 2 são apresentadas as especificações técnicas do equipamento usado e outros parâmetros operacionais.

Para manter a frequência de saída em 60 Hz, um controlador PI foi integrado ao controle da válvula de borboleta do motor. Portanto, a velocidade de rotação do MCI foi mantida constante para todas as condições de carga testadas. O grupo gerador foi adaptado com um kit de conversão para Gás Natural Veicular (GNV) para permitir a alternância entre gasolina e o combustível gasoso. Este equipamento é composto por um regulador eletrônico de pressão, que mantém a pressão do gás de admissão em 1,6 bar. Após o regulador de pressão, os injetores

de combustível são responsáveis por enviar a quantidade certa de combustível para os cilindros; esses injetores são controlados por um sistema de injeção, o que permite uma configuração completa do sistema, especialmente o tempo de injeção e a frequência do bico injetor de combustível.

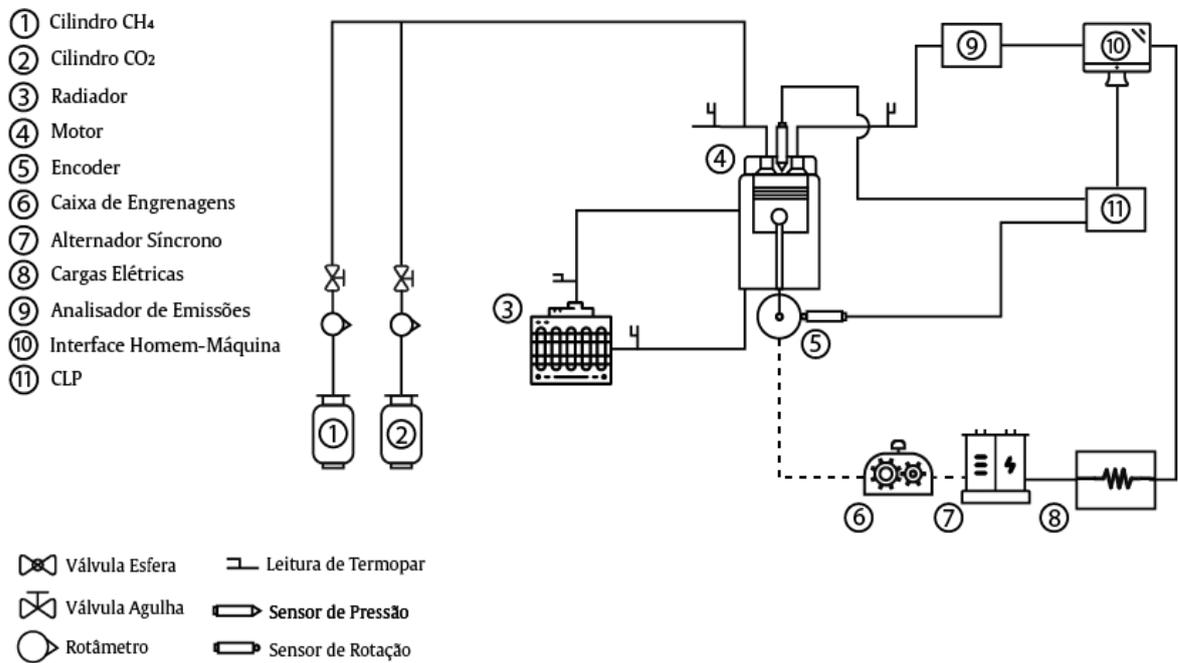
Tabela 2 - Especificações do motogerador a biogás

Modelo do Motor	AP 2000, Volkswagen
Tipo de Motor	4-tempos, 4 cilindros
Admissão de Ar	Naturalmente aspirado
Câmara de Combustão	Formato de semiesfera
Diâmetro x Curso do Pistão	82,5 x 92,8 mm
Cilindrada	1984 cm ³
Razão de Compressão	10:1
Tipo de Combustível	Gasolina (de fábrica) GNV/Biogás (convertido)
Potência Nominal	88 kW
Modelo do Alternador	Kohlbach – Síncrono e Brushless
Fases	Trifásico
Tipo de Ligação	Estrela com Neutro acessível
Número de Polos	4
Tipo de excitatriz	Rotativa alimentada por bobina auxiliar
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão de Trabalho	380 V
Potência Nominal	80 kVA

Fonte: Elaborado pelo autor.

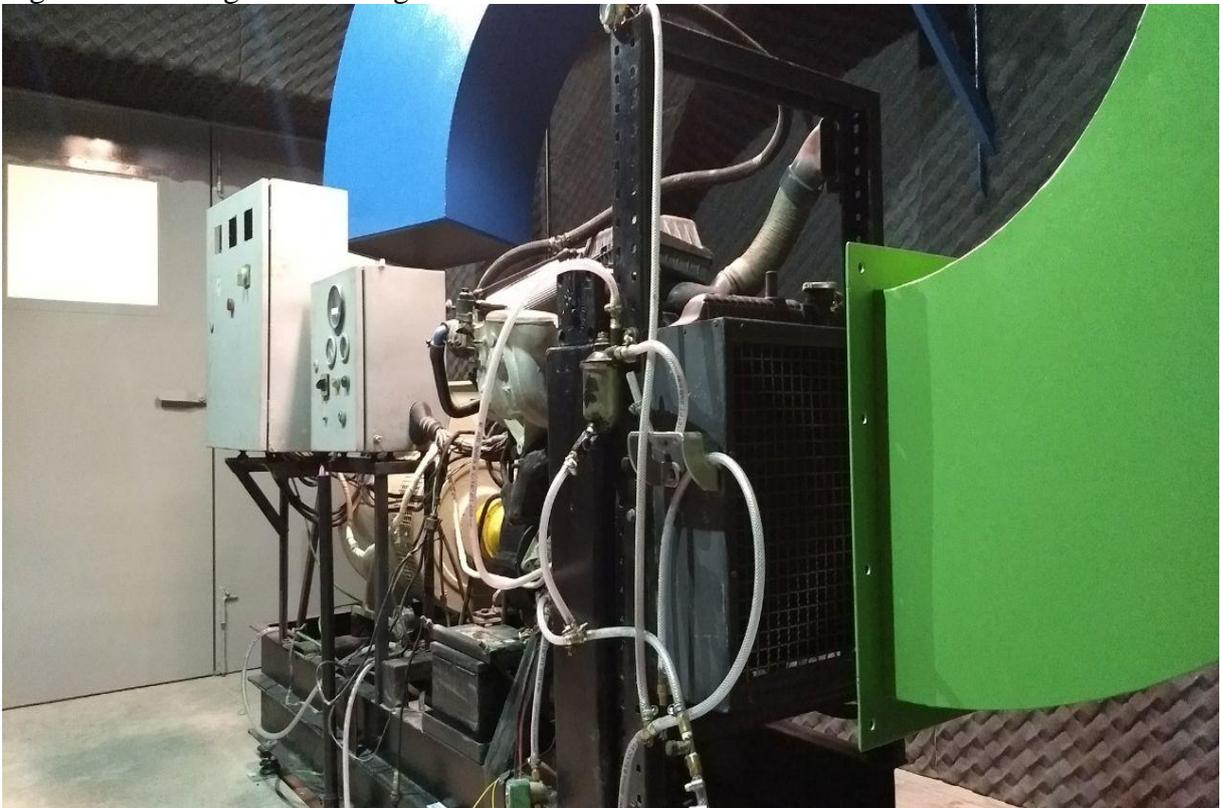
O gerador de energia é acoplado a um banco de carga de 30 kW, composto por uma associação de resistores elétricos, o que permite a variação da carga em diferentes valores, simulando condições severas de mudanças de carga. Além disso, para operar com biogás, a bancada de testes foi projetada com um misturador de combustível gasoso, que pode sintetizar o biogás a partir de uma mistura de metano e dióxido de carbono em diferentes composições. Com o sistema de mistura, é possível alterar a composição do biogás durante os testes sem desligar o motor, permitindo a simulação de mudanças severas no combustível. Esse arranjo permite levantar parâmetros experimentais do sistema em pontos de operação diferentes, enriquecendo a simulação e aproximando os resultados obtidos daqueles esperados na prática. Na Figura 14 é apresentado um diagrama da bancada de testes utilizada para a obtenção dos parâmetros experimentais e realização de testes presentes neste estudo. Na Figura 15 é mostrado um registro fotográfico do grupo gerador a biogás utilizado neste estudo, bem como alguns dos equipamentos da bancada de testes.

Figura 14 - Diagrama da bancada de testes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Motogerador a biogás



Fonte: Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER), UFC.

Além dos parâmetros operacionais do motogerador (que dependem do ponto de

operação considerado), é necessário identificar uma série de parâmetros experimentais (físicos, geométricos e etc.) que estão presentes ao longo do desenvolvimento das Equações (1) a (14) e que compõem as constantes ε_i e α_i em (15) e (16). Esses valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros experimentais

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Rotação do Motor	ω	3600	rpm
Volume do Cilindro	V_d	$0,49 \times 10^{-3}$	m^3
Razão de Compressão	r	10:1	-
Diâmetro da Válvula Borboleta	D	$58,71 \times 10^{-3}$	m
Volume do Coletor de Admissão	V_{im}	$5,87 \times 10^{-3}$	m^3
Coeficiente de Descarga da Válvula Borboleta	C_d	0,82	-
Razão Ar-Combustível	AFR	17,16	-
Constante dos Gases Ideais	R	286,93	J/kg K
Pressão Ambiente	p_{amb}	101.325,0	Pa
Temperatura Ambiente	θ_{amb}	298	K
Temperatura do Coletor de Admissão	θ_{im}	340,56	K
Razão entre calores específicos do Ar	k	1,40	-
Potência elétrica máxima	P_e	30,00	kW
Eficiência Elétrica	η_e	0,88	-
Poder Calorífico Inferior (Metano)	H	50,03	MJ/kg
Indutância de passagem da armadura	L_{ls}	$3,09 \times 10^{-4}$	H
Indutância de campo de passagem no enrolamento	L_{lfd}	$3,07 \times 10^{-4}$	H
Indutância de passagem de amortecimento do enrolamento no eixo d	L_{lkd}	$4,91 \times 10^{-4}$	H
Indutância de passagem de amortecimento do enrolamento no eixo q	L_{lkq}	$1,04 \times 10^{-3}$	H
Indutância de acoplamento da armadura no eixo d	L_{md}	$3,22 \times 10^{-3}$	H
Indutância de acoplamento da armadura no eixo q	L_{mq}	$3,22 \times 10^{-3}$	H
Resistência de amortecimento do enrolamento no eixo d	R_{kd}	$1,19 \times 10^{-2}$	Ohm
Resistência de amortecimento do enrolamento no eixo q	R_{kq}	$2,01 \times 10^{-2}$	Ohm
Resistência de fase da armadura	R_s	$2,91 \times 10^{-3}$	Ohm
Resistência de campo do enrolamento	R_{fd}	$5,90 \times 10^{-4}$	Ohm

Fonte: elaborado pelo autor.

De posse destas informações, foram realizados testes em bancada com condições controladas, a fim de determinar os parâmetros que dependem do ponto de operação do motogerador. Desta forma, foram identificados a partir de diversos conjuntos de ensaios, os dados experimentais apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de operação derivados dos testes de bancada

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Coefficiente independente para eficiência volumétrica	γ_0	0,45	-
Coefficiente linear para eficiência volumétrica	γ_1	$3,42 \times 10^{-3}$	s
Coefficiente quadrático para eficiência volumétrica	γ_2	$-7,71 \times 10^{-6}$	s^2
Eficiência do sistema de Ignição	η_{ign}	0,92	-
Pressão máxima da Câmara de Combustão	p_{max}	$2,85 \times 10^{11}$	Pa
Momento de inércia do sistema	J	0,19	Kg/m^2

Fonte: elaborado pelo autor.

Além da bancada de testes utilizada para a obtenção dos parâmetros experimentais do projeto, foi utilizado um computador dedicado para as simulações com as seguintes especificações: Memória RAM: 8GB 2600 MHz; Processador: Intel i5 de 7ª geração. Uma simulação completa do sistema, considerando variações de carga e composição do combustível durou um total de 2.673 segundos.

3.3 Linearização do Sistema

O principal objetivo do sistema de controle projetado neste trabalho é atenuar as oscilações de frequência geradas pela variação da composição do combustível injetado. Desta forma, o sistema de controle deve ser robusto e rápido o suficiente para atender o principal objetivo proposto.

Esse controle de frequência pode ser entendido como uma maneira de garantir que a rotação do motor permaneça constante dentro de uma certa faixa de operação (ISERMANN, 2014). O gerador de energia usado neste estudo deve manter uma rotação fixa em 3600 rpm, de modo que a frequência na saída do alternador seja mantida em 60 Hz (ENEL DISTRIBUIÇÃO, 2016), mantendo assim o paralelismo com a rede elétrica.

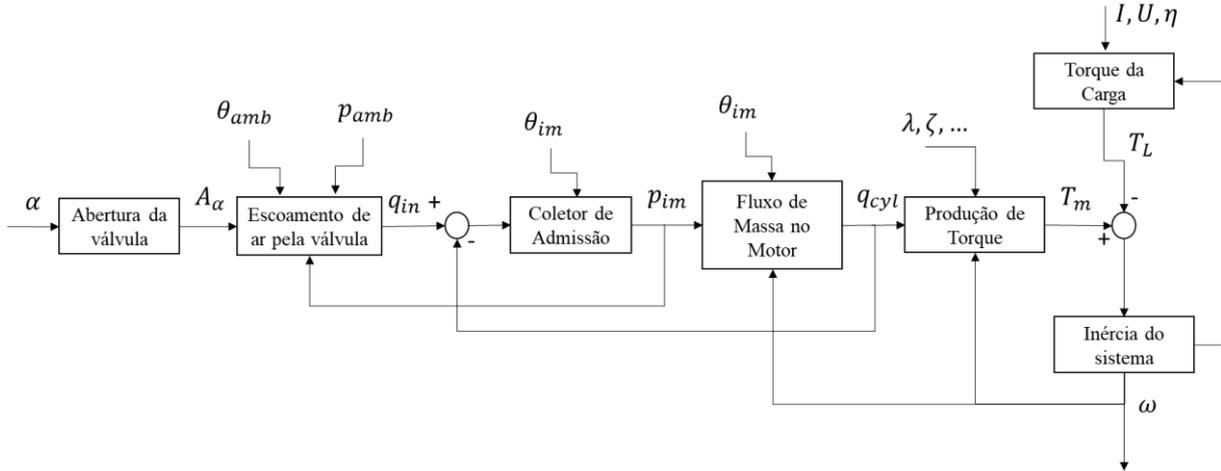
Inicialmente, é necessário verificar que o sistema proposto a partir da modelagem matemática apresentada na Seção 3.1 não é linear e, por razões de simplificação, deve ser linearizado adequadamente.

De acordo com Bastida et al. (2017), uma linearização por expansão da Série de Taylor é 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.

Somente a modelagem do MCI é linearizada porque os esquemas de controle propostos neste trabalho são apenas para regular a velocidade de rotação do eixo de acordo com

a carga necessária e a composição do biogás. Portanto, o sistema linearizado possui apenas uma entrada, α e uma saída, ω , como mostrado na Figura 16:

Figura 16 - Diagrama de blocos do modelo de motogerador a biogás:



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Equação (24) apresenta a linearização proposta para o MCI:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{p}_{im} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_{im}} & \frac{\partial f_1}{\partial \omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_{im}} & \frac{\partial f_2}{\partial \omega} \end{bmatrix}_{x_s, u} \begin{bmatrix} \Delta p_{im} \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix}_{x_s, u} [\Delta u] \quad (24)$$

$$= \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}_{x_s, u} \begin{bmatrix} \Delta p_{im} \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix}_{x_s, u} \quad (25)$$

As funções f_1 e f_2 representam as Eqs. (15) e (16), respectivamente. Além disso, a linearização considera os valores das variáveis p_{im} e ω em estado estacionário, ou seja, quando as variações em relação ao tempo são zero. As constantes a , b , c , d e e são provenientes de derivadas parciais das Equações (15) e (16) em relação a p_{im} e ω , além de agruparem todas as constantes relacionadas ao modelo matemático desenvolvido ao longo da Seção 3.1. A matriz de transição de estados é dada por:

$$\phi(s) = \left(sI - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_{im}} & \frac{\partial f_1}{\partial \omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_{im}} & \frac{\partial f_2}{\partial \omega} \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (26)$$

$$= \left(\begin{bmatrix} s - a & -b \\ c & s - d \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (27)$$

$$= \frac{1}{s^2 - (a + d)s + (ad - bc)} \begin{bmatrix} s - d & b \\ c & s - a \end{bmatrix} \quad (28)$$

Em (24) a linearização é feita em relação aos pontos de operação do gerador, sendo necessário observar que o sistema de controle proposto está limitado a esses pontos de operação. Portanto, a seleção desses pontos deve ser feita para que o equipamento possa atender às situações de trabalho mais recorrentes em aplicações em escala real.

A segunda etapa no projeto do sistema de controle do gerador é usar a linearização do sistema para criar uma Função de Transferência (FT) para representar o sistema de acordo com o ponto de operação escolhido. Nesse caso, observa-se que, após a aplicação da linearização proposta em (24) e (25) e na Transformação de Laplace, obtém-se um FT de segunda ordem. O desenvolvimento a partir de (25) para se chegar na FT do sistema é apresentado a seguir:

$$G(s) = [0 \ 1] \phi(s) \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$G(s) = [0 \ 1] \frac{1}{s^2 - (a + d)s + (ad - bc)} \begin{bmatrix} s - d & b \\ c & s - a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$G(s) = \frac{ec}{s^2 - (a + d)s + (ad - bc)} \quad (28)$$

$$G(s) = \frac{k_1}{s^2 - k_2s + k_3} \quad (29)$$

Em (29), as constantes k_i são derivadas do desenvolvimento do modelo a partir da combinação dos vários parâmetros apresentados na Seção 3.1. Assim, é evidente que em cada ponto de operação escolhido, especialmente com a variação da composição do biogás, uma nova combinação de constantes é gerada alterando a FT do sistema em cada ponto de operação avaliado. Na Tabela 5 são apresentadas as variáveis que compõem cada uma das constantes k_i .

Tabela 5 - Variáveis que compõem a FT do sistema linearizado

Parâmetro da FT	Variáveis do sistema
k_1	$f(\eta_v, \eta_c, H, AFR, \theta_{im}, \theta_{amb}, R, V_d, V_{im}, p_{amb}, D, J)$
k_2	$f(\eta_v, V_d, V_{im}, J)$
k_3	$f(\eta_v, V_d, V_{im}, p_{amb}, J, T_L)$

Fonte: elaborado pelo autor.

Esta FT obtida da linearização do sistema representa a modelagem de acordo com o ponto de operação escolhido. Em seguida, esta função de transferência será usada para ajustar o controlador PID para regular a frequência do grupo gerador a biogás.

3.4 Projeto do Controlador

Para projetar o sistema de controle adequado às especificações deste projeto, é necessário entender quais são as principais exigências de qualidade de energia do sistema elétrico brasileiro. Para tal, tomou-se como base a Especificação Técnica 122 v.2 (2018) da distribuidora de energia elétrica Enel responsável por atender, dentre outros, o estado do Ceará. A referida Especificação Técnica apresenta diversas exigências para a conexão de sistemas de Micro e Minigeração Distribuída à Rede Elétrica de Distribuição. Nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as exigências de variação na Tensão e Frequência elétrica da geração para que o sistema possa permanecer conectado em paralelo com a rede elétrica.

Tabela 6 - Limites de sobretensão e subtensão em consumidores de Baixa Tensão

Faixa de tensão no ponto de conexão (V)	Tempo de desconexão (s)
TL > 231	0,2
191 ≤ TL ≤ 231	Operação Normal
TL < 191	0,4

NOTA: TL –Tensão de Leitura.

Fonte: Enel Distribuição Especificação Técnica 122 v.2, 2018.

Tabela 7 - Limites de sobrefrequência e subfrequência (BT e MT)¹

Faixa de frequência no pondo de conexão (Hz)	Tempo de Desconexão (s)
$f \leq 56,5$	Instantâneo
$56,5 < f \leq 57,5$	5
$57,5 < f \leq 58,5$	10
$f < 59,5$	30
$59,9 \leq f \leq 60,1$	Operação Normal
$f > 60,5$	30
$63,5 \leq f < 66$	10
$f \geq 66$	Instantâneo

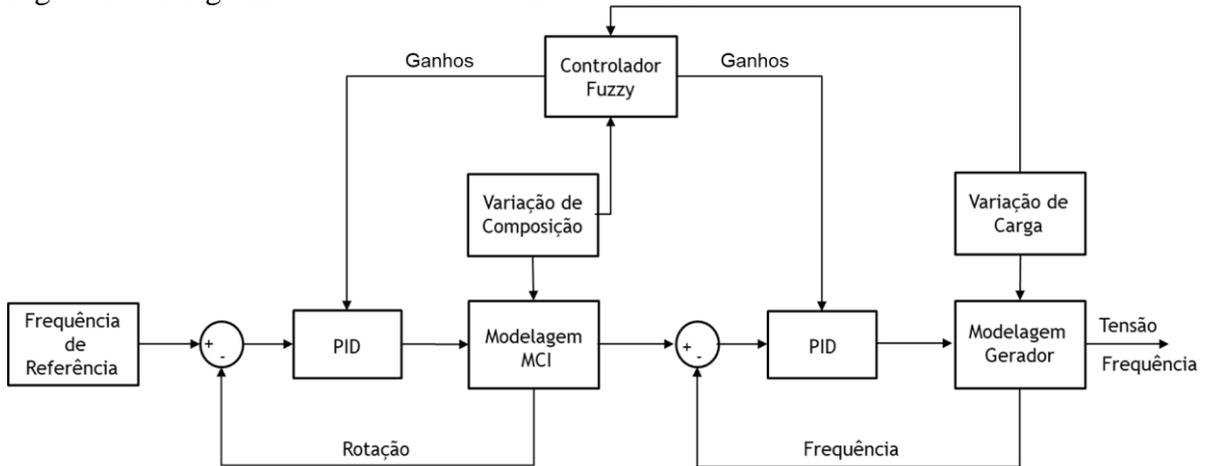
Fonte: Enel Distribuição Especificação Técnica 122 v.2, 2018.

Ainda considerando a Especificação Técnica como documento de referência para o padrão de rede elétrica empregada neste estudo, verifica-se que a Tensão de Referência da rede trifásica é de 380V, enquanto que para as redes monofásicas a Tensão de Referência é de 220V. Assim, as principais especificações que os sistemas de geração devem atender estão dispostas nas Tabelas 6 e 7. De maneira qualitativa, pode-se afirmar que o sistema deve atuar rapidamente no controle da frequência a fim de manter a mesma sempre dentro dos limites estabelecidos respeitando os intervalos de tempo de tolerância apresentados. Trata-se de atuação rápida, visto que no caso mais extremo o sistema teria apenas 5 s para se restabelecer e voltar ao valor nominal da frequência. No caso da regulação da tensão essa resposta deve ser ainda mais rápida, pois o sistema teria apenas 0,2 s no pior caso para reestabelecer o valor padrão. Com isso, conclui-se que uma das principais exigências do sistema de controle projetado é que o mesmo atue com a rapidez necessária para a aplicação proposta, mas não sendo suficiente apenas uma atuação imediata, tendo que se considerar ainda a estabilidade do sistema de geração como um todo.

Assim, tendo em mãos as principais exigências do sistema elétrico, foi iniciada a fase de projeto do sistema de controle. Por conta da complexidade do sistema e da variação de suas entradas (composição do combustível e carga solicitada) viu-se a necessidade de implementar um sistema de controle híbrido adaptativo, composto por um Controlador Fuzzy e dois controladores PID, conforme representado na Figura 17.

¹ BT – Conexão em Baixa Tensão; MT – Conexão em Média Tensão

Figura 17 - Diagrama de blocos do sistema controlado



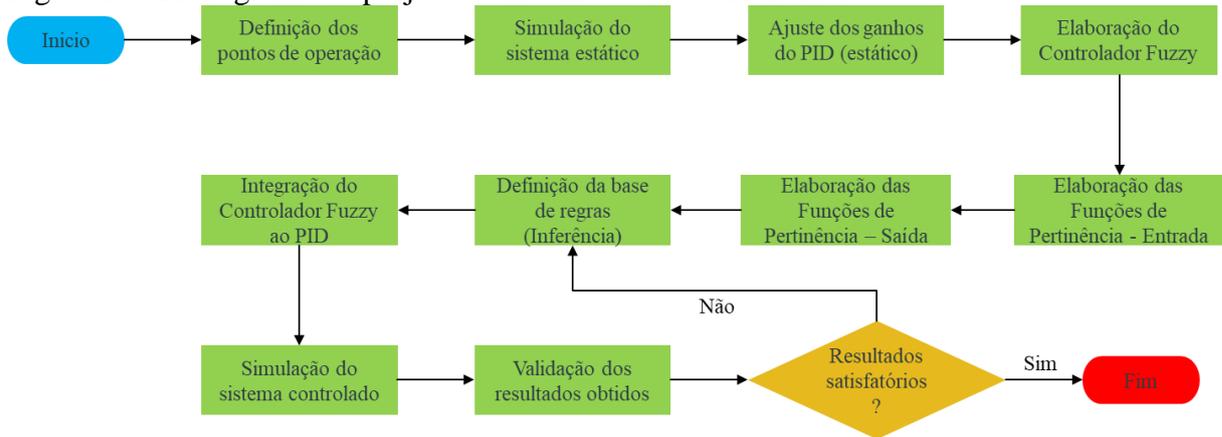
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a arquitetura proposta, um Controlador Fuzzy fica responsável por receber as informações de composição do biogás e carga elétrica solicitada ao sistema de geração. Em seguida, o Controlador Fuzzy implementa a lógica proposta e configura os ganhos K_p (Ganho Proporcional), K_i (Ganho Integral) e K_d (Ganho Derivativo) dos controladores PID no sistema. Por sua vez, os controladores PID são responsáveis por assegurar que o erro entre o valor de referência e a resposta do sistema seja mantido dentro do padrão aceitável e conferindo características de grande importância, como Erro Estático nulo ao longo do funcionamento (sistema tende a manter a saída estável no mesmo patamar da saída desejada), tempo de subida satisfatório (parâmetro de grande importância no regime transiente do sistema, assegurando rapidez no momento em que o mesmo é iniciado) além da velocidade de resposta necessária.

Para que o sistema de controle proposto venha a desempenhar seu papel conforme projetado, foram propostos pontos de operação que combinam um estado de composição do combustível e um percentual da carga total suportada pelo sistema. Cada ponto de operação foi estudado individualmente para que os ganhos dos controladores PID fossem otimizados. Em seguida, o Controlador Fuzzy foi construído de forma a reconhecer os padrões de variação entre um ponto de operação e outro e assim decidir quais os valores de ganho deveriam ser passados aos controladores PID. Este procedimento é detalhado nas seções a seguir, onde são discutidos os métodos usados para definir os valores de ganho ideais para cada ponto de operação, as Funções de Pertinência implementadas no Controlador Fuzzy de forma a contemplar as duas entradas e as Regras impostas para definir os valores das três saídas do controlador. Além disso, é discutido em detalhes o método utilizado para definir quais os pontos de operação seriam escolhidos dentro de um universo de possibilidades infinito.

Na Figura 18 é apresentado em formato de Fluxograma a metodologia empregada neste trabalho para o projeto do sistema de controle híbrido Fuzzy-PID aplicado ao gerador.

Figura 18 - Fluxograma do projeto do sistema de controle híbrido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1 Definição dos pontos de operação estudados

Conforme discutido anteriormente, cada ponto de operação estudado é composto pela combinação de dois estados das variáveis de entrada do sistema de controle: composição do combustível e carga solicitada. Assim, pelo fato de ambas as variáveis indicadas serem de grandezas contínuas, a quantidade real de combinações dos estados destas variáveis é infinita. Para contornar este problema, foi utilizado o Controlador Fuzzy, que dentre outras características, pode classificar os infinitos pontos de operação a partir de Funções de Pertinência que são construídas apenas com intervalos definidos das variáveis de entrada, ou seja, ao utilizar-se da Lógica Fuzzy é possível descrever os pontos de operação do sistema, baseando-se apenas em algumas observações e aplicando Funções de Pertinência ao intervalo de entradas possíveis.

Sendo assim, o primeiro passo foi definir quais os pontos de operação que seriam utilizados na construção do Controlador Fuzzy. Tais pontos devem ser representativos da realidade do funcionamento do sistema, sendo definidos de forma empírica, levando em consideração observações feitas durante os testes de bancada do sistema experimental. Assim, na Tabela 8 é apresentada a matriz de pontos de operação propostos a partir da combinação de amostras da composição de combustível e carga. O par ordenado apresentado na matriz de pontos de operação é definido como sendo (a,b) em que a representa o percentual de CH_4 no combustível (composição) e b o percentual da carga máxima suportada pelo sistema.

Tabela 8 - Matriz de pontos de operação

Carga (%) x Composição (%)			
(1,00 ; 1,00)	(1,00 ; 0,75)	(1,00 ; 0,60)	(1,00 ; 0,40)
(0,75 ; 1,00)	(0,75 ; 0,75)	(0,75 ; 0,60)	(0,75 ; 0,40)
(0,50; 1,00)	(0,50; 0,75)	(0,50; 0,60)	(0,50; 0,40)
(0,25; 1,00)	(0,25; 0,75)	(0,25; 0,60)	(0,25; 0,40)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se pela Tabela 8 que a composição assume os valores [1,0 ; 0,75 ; 0,60 ; 0,40], enquanto a carga varia de acordo com os valores [1,0 ; 0,75 ; 0,50 ; 0,25]. Os valores de composição foram escolhidos variando entre 0,4 e 1,0 pois observou-se a partir de levantamento bibliográfico que raramente o biogás gerado a partir de águas residuárias tem teor de CH₄ em sua composição inferior a 40% em volume. Desta forma, optou-se por limitar o intervalo de possíveis estados da variável composição dentro desta faixa de valores. Vale observar ainda que quando a composição assume o valor 1,0 significa que todo o biogás é composto por Metano (neste caso o biogás também é chamado de biometano), o que se mostra como uma condição pouco provável de ser encontrada naturalmente. Porém, vale ressaltar que existem sistemas de purificação do biogás que estão sendo cada vez mais utilizados e que conseguem atingir níveis de eficiência bastante elevados, por isso optou-se por incluir este valor como um possível caso da composição do biogás, mesmo que raro.

Já no que se refere à carga, observa-se que os pontos de operação vão na verdade de 0 a 1, haja vista que a carga pode oscilar entre esses valores normalmente em situações nominais de operação. Seria possível ainda introduzir no estudo alguns casos em que a carga solicitada é maior do que o valor nominal do sistema de geração (ou seja, nesses casos a carga assumiria valores maiores do que 1,0), porém observou-se ao longo dos estudos que, para tais casos, a degradação da vida útil do sistema fica muito mais acentuada, representando um desgaste precoce de partes mecânicas além de sobrecarregar os sistemas elétricos, proteções e condutores. Assim, optou-se por limitar a carga solicitada possível em 100% da carga nominal do sistema, sendo ainda recomendado que o mesmo opere em regime contínuo até apenas 80% de sua carga nominal como uma forma de prolongar sua vida útil.

Conclui-se que de posse desta combinação de valores para carga e composição, é possível criar 16 pontos de operação distintos, nos quais a modelagem matemática foi testada individualmente a fim de avaliar os valores dos ganhos dos controladores PID. A partir destes 16 pontos de operação o Controlador Fuzzy pode inferir quaisquer outros pontos de operação, dentro do intervalo das variáveis de entrada (composição de 0,4 a 1,0 e carga de 0,0 a 1,0) solucionando o problema das infinitas possibilidades de pontos de operação possíveis na

prática.

Após definidos quais pontos seriam usados como base para as simulações, foram implementados os modelos do sistema linearizado em uma simulação do Matlab/Simulink de forma que todos os 16 pontos fossem implementados. Para cada um destes pontos, uma simulação foi usada para avaliar o desempenho do sistema controlado apenas por PID. Na seção seguinte é apresentada a metodologia usada para a realização destes testes e como os controladores PID foram sintonizados de forma que o sistema (estático) obedecesse às especificações de projeto apresentadas na Seção 3.4.

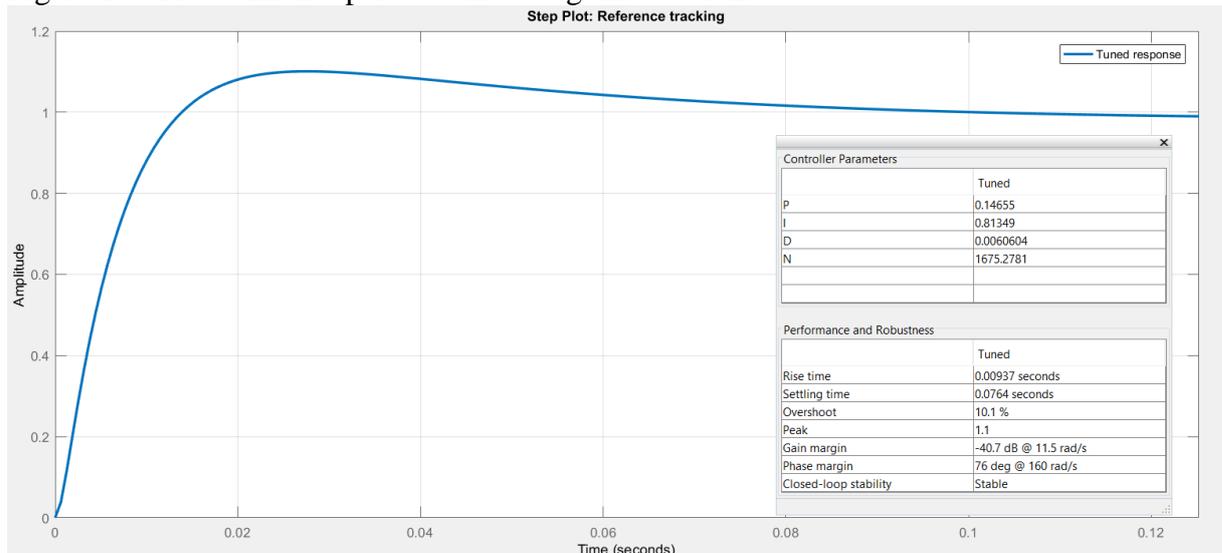
3.4.2 Projeto dos controladores PID para cada ponto de operação

Tendo os pontos de operação escolhidos para sintonizar os controladores PID, foi implementado no Matlab/Simulink uma representação estática do modelo estudado. Este modelo usado representa um ponto de operação fixo onde a composição e a carga não variam ao longo de toda a simulação. O objetivo deste modelo é permitir o uso das ferramentas disponíveis no software de simulação para sintonizar os ganhos dos controladores PID criando assim, padrões e referência que atendam às especificações de projeto pretendidas.

O método de sintonia dos controladores PID empregado neste trabalho foi o de tentativa e erro utilizando a ferramenta de *tunning* do Simulink como forma de observar graficamente as alterações no comportamento do sistema controlado quando aplicado o PID.

Buscou-se assegurar que o sobressinal máximo permitido ao sistema fosse inferior a 10% do valor esperado, estando de acordo com as exigências do sistema elétrico conforme as Tabelas 6 e 7. Além disso, decidiu-se por utilizar um tempo de resposta que fosse pequeno o suficiente para garantir ao sistema controlado a velocidade necessária para a atuação em caso de variações súbitas das variáveis de entrada, neste caso foi inserido um tempo de subida de 0,1s. Finalmente, outro requisito para o sistema controlado foi a estabilidade do mesmo durante todo o período da simulação, dessa forma é possível garantir que o sistema não irá se comportar de forma aleatória ou tendendo a um estado irreversível de funcionamento. Com isso, foram iniciadas as simulações dos 16 pontos de operação escolhidos e apresentados na Seção 3.4.1. Na Figura 19 é apresentado um exemplo da metodologia seguida para a sintonia dos ganhos do PID utilizando a ferramenta do Simulink, observa-se que o sistema controlado apresenta um sobressinal de 10,1%, tempo de subida de 0,00937 s e tempo de acomodação de 0,0764 s, o que mostra que as condições especificadas estão sendo atendidas neste caso e que o sistema atua de maneira rápida o suficiente de acordo com as exigências da aplicação prevista.

Figura 19 - Procedimento para escolha dos ganhos do PID



Fonte: Elaborado pelo autor.

A cada nova simulação (novo ponto de operação) a ferramenta de sintonia de PID's do Simulink foi utilizada e os ganhos dos controladores foram alterados até que as condições de sobressinal, tempo de subida e estabilidade fossem asseguradas. Uma vez atingidas as especificações mínimas de projeto, os ganhos K_p , K_i e K_d eram registrados para este ponto de operação e uma nova simulação era então iniciada. Ao final das 16 iterações propostas, uma tabela com os valores dos ganhos foi montada para cada situação estudada. Mais detalhes sobre os valores de ganhos definidos, bem como a apresentação destes valores são apresentados na Seção de Resultados e Discussões desta Dissertação.

Finalmente, após esta primeira etapa de simulações foi possível obter 16 sistemas controlados independentes, cada um representando um ponto de operação do sistema, mas ainda de forma estática, ou seja, não havendo variações de composição e/ou carga. O segundo passo é implementar a Lógica Fuzzy no sistema de controle, ela será responsável por utilizar os valores discretos de ganhos dos PID implementados e inferir um intervalo contínuo de valores entre os pontos escolhidos. Com isso, o sistema será capaz de operar de forma contínua abrangendo todos os infinitos pontos de operação resultantes das combinações de estados de composição de combustível e carga do motogerador.

3.4.3 Projeto do Controlador Fuzzy

Como tratado anteriormente, o Controlador Fuzzy é responsável por receber como parâmetros de entrada a variação de carga e composição do combustível e como saída são passados os ganhos K_p , K_i e K_d do controlador PID. Esta metodologia é adaptativa, uma vez que à medida que as variáveis de entrada do sistema mudam, as Funções de Pertinência do

Controlador Fuzzy determinam quais os novos valores de ganho serão repassados na saída, garantindo assim que o sistema de controle como um todo opere de forma mais precisa e acompanhe as mudanças dos parâmetros do sistema.

Para tal, foram construídas Funções de Pertinência para cada uma das variáveis de entrada que definem como será aplicada a lógica para cada combinação de valores de composição e carga. Primeiramente, foram definidos quais os valores base seriam tomados para a construção dos cenários estáticos dos testes, conforme explicitado na Seção 3.4.1. Tais valores formam o intervalo no qual as variáveis são definidas como existentes, ou seja, os valores assumidos pela carga e composição química estão compreendidos dentro deste intervalo. No caso da composição, o domínio das Funções de Pertinência é o intervalo $[0,40, 1,0]$, pois como discutido anteriormente, assume-se que a fração de Metano no biogás não será inferior a 40% e podendo chegar até 100%.

Já a carga elétrica solicitada ao grupo gerador pode variar dentro do intervalo $[0,0, 1,0]$ assumindo que não será permitida sobrecarga do sistema com valores maiores do que 100% da carga nominal do gerador.

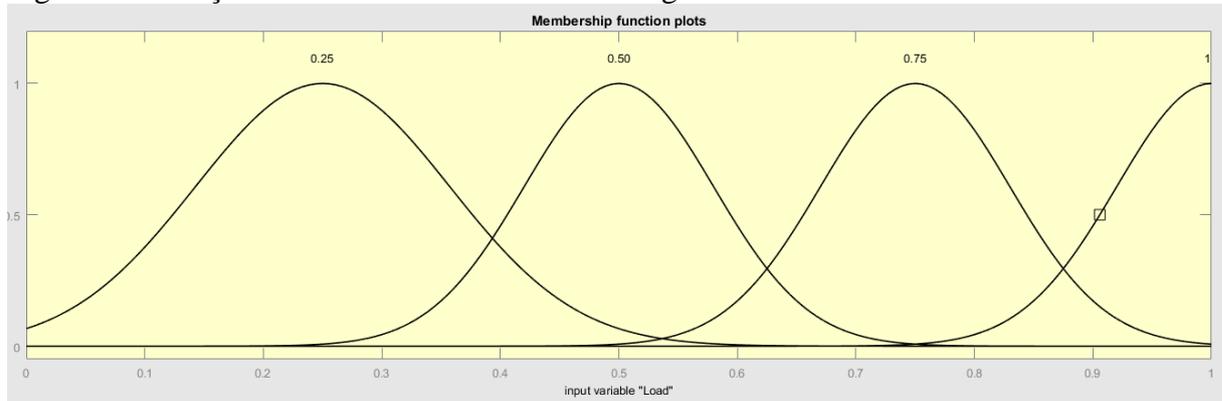
Assim, foram definidas quatro funções de pertinência para cada uma das variáveis de entrada do sistema, de forma que haja superposição entre tais funções indicando que a transição entre diferentes pontos de operação é feita a partir de uma ponderação dos demais estados possíveis. As Funções de Pertinência escolhidas para esse estudo são curvas Gaussianas e são determinadas por uma média (μ) e um desvio padrão (σ). A escolha deste formato particular de funções baseia-se no fato de que a Gaussiana apresenta perfil de decaimento suave à medida que os valores vão se afastando da média além de apresentarem valores diferentes de zero em todo o domínio da variável estudada. Isso confere uma característica de transição suave, sem grandes distúrbios entre os diferentes pontos de operação, evitando que tais perturbação possam vir a prejudicar a estabilidade do sistema controlado a partir de mudanças muito abruptas nos valores dos ganhos do PID. Tendo em vista que os pontos de operação estáticos, utilizados como caso base para a sintonia dos ganhos do PID, contemplam quatro valores possíveis para a carga e quatro para a composição, foram criadas Funções de Pertinência que atingissem seu pico (máxima pertinência, igual à unidade) centradas nos pontos fixos estudados e a partir destes pontos, as funções vão apresentando decaimento dentro do domínio estudado.

Estas Funções de Pertinência contínuas dentro do domínio estudado, garantem que quaisquer valores válidos de carga e composição resultarão em um ponto de operação também válido, tornando o funcionamento do sistema de controle como um todo mais suscetível à estabilidade e operando de forma contínua.

Nas Figuras 20 e 21 são mostradas as representações gráficas das Funções de

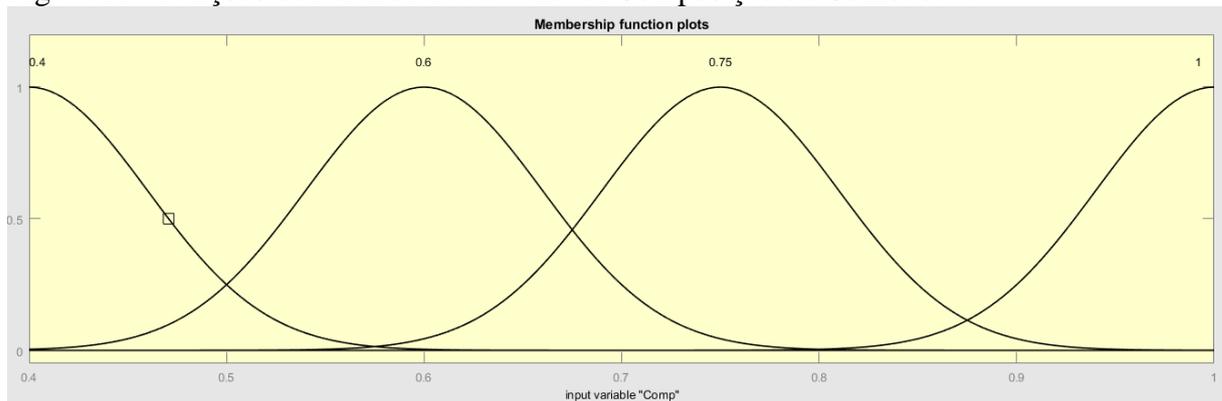
Pertinência para as variáveis de entrada do sistema de controle. Observa-se que existe a superposição entre as funções e ainda que as funções assumem valores diferentes de zero para todo o domínio estudado.

Figura 20 - Funções de Pertinência da variável Carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Funções de Pertinência da variável Composição do Combustível



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez tendo sido definidos os domínios das Funções de Pertinência para as variáveis de entrada, bem como o formato destas funções e seus parâmetros construtivos (média e desvio padrão), o passo seguinte no projeto do Controlador Fuzzy foi determinar as Funções de Pertinência das variáveis de saída, ou seja, determinar como se comportam os ganhos do controlador PID à medida que as entradas variam ao longo do tempo.

Para isso, foram utilizados os ganhos definidos para cada um dos 16 pontos de operação estáticos simulados e apresentados na Seção 3.4.1. Para cada um dos ganhos necessários (K_p , K_i e K_d), foram definidos os domínios de existência das funções de pertinência baseados nos resultados obtidos.

Após a definição dos domínios das funções, utilizou-se cada um dos 16 pontos simulados como padrão para os respectivos ganhos estudados, aplicando-se uma função

Gaussiana centrada em tais pontos. Com isso, obtém-se um conjunto de 16 Funções de Pertinência para cada um dos ganhos do PID que vão se superpondo ao longo de todo o domínio, garantindo assim a continuidade do sistema para quaisquer outros pontos de operação diferentes daqueles testados e que pertençam ao domínio escolhido.

Na Tabela 9 são mostrados os intervalos dentre os quais as Funções de Pertinência de cada um dos ganhos do PID estão definidos. Para a construção destes intervalos foram tomados os valores mínimos e máximos assumidos pelos ganhos K_p , K_i e K_d ao longo das simulações feitas com os pontos de operação estáticos. Observou-se que os valores mínimos para cada um dos três ganhos do PID ocorre quando a carga está em seu patamar máximo junto com a composição (ponto de operação (1,00 ; 1,00)) enquanto que o valor máximo, para os três ganhos surge quando a composição atinge seu máximo porém a carga apresenta seu mínimo (ponto de operação (1,00 ; 0,25)). As implicações de tal fenômeno são abordadas na Seção de Resultados e Discussões deste trabalho.

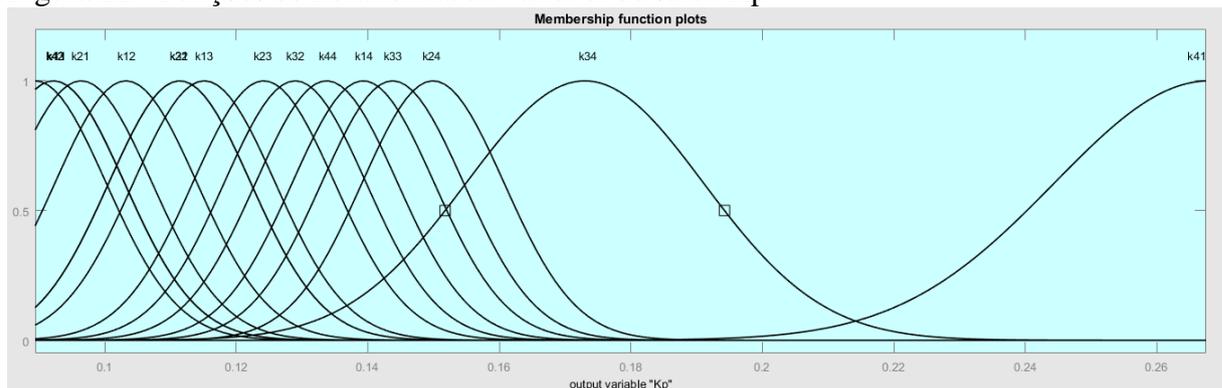
Tabela 9 – Limites dos ganhos do PID

Ganhos	Mínimo	Máximo
K_p	0,08938	0,26748
K_i	0,60262	1,49476
K_d	0,00331	0,00882

Fonte: Elaborado pelo autor.

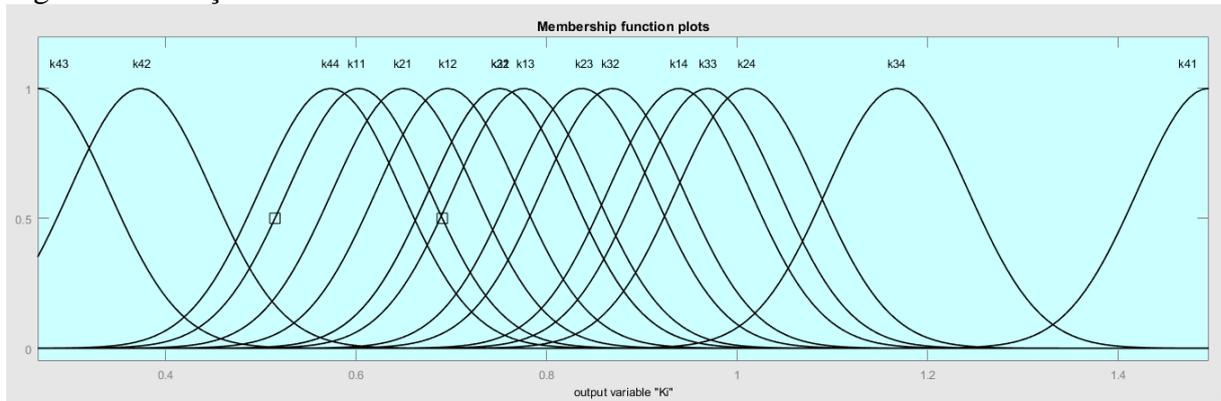
Nas Figuras 22, 23 e 24 são apresentadas as representações gráficas das Funções de Pertinência de cada um dos ganhos do PID, que são as saídas do Controlador Fuzzy. Assim como nas Funções de Pertinência das entradas, as gaussianas se mostram bem adaptadas ao tipo de controle empregado, uma vez que são contínuas em todo o domínio e que apresentam seu decaimento suave diminuindo as perturbações no sistema e, conseqüentemente, influenciando positivamente na estabilidade do mesmo.

Figura 22 - Funções de Pertinência da variável de saída K_p



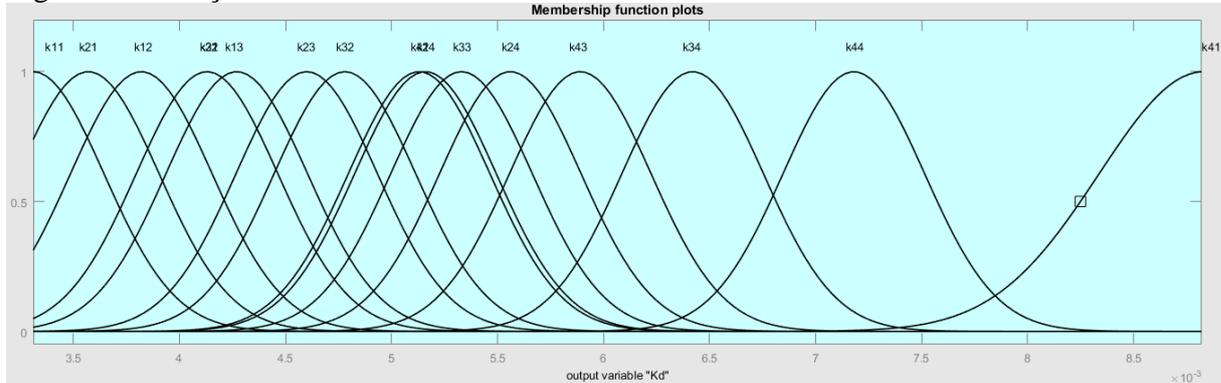
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Funções de Pertinência da variável de saída Ki



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Funções de Pertinência da variável de saída Kd

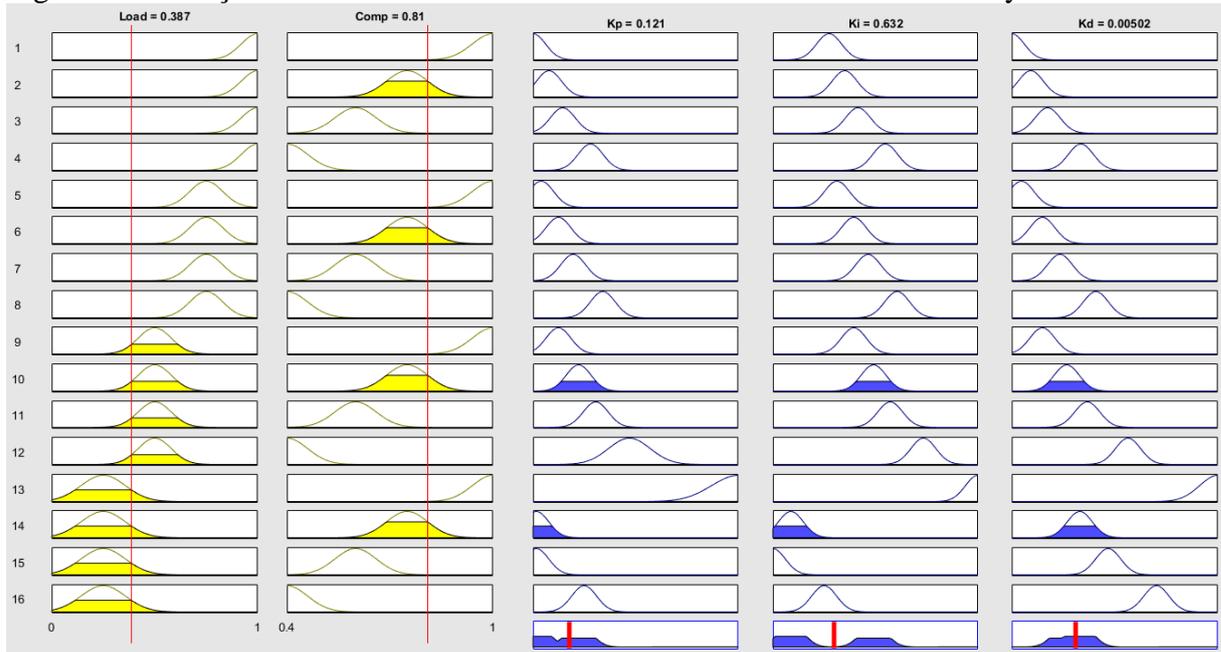


Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, tendo posse das Funções de Pertinência de entrada e saída do Controlador Fuzzy, foi possível escrever a base de regras linguísticas que relaciona entrada e saída de acordo com as condições impostas pelo projetista.

Ao todo foram criadas 16 regras linguísticas relacionando cada ponto de composição do combustível e carga solicitada com um valor específico de K_p , K_i e K_d . Estes valores correspondem aos pontos escolhidos para a realização das simulações propostas na Seção 3.4.1. De maneira geral, estas regras permitem associar um determinado valor de ganho previamente obtido com as simulações a um estado das variáveis de entrada. Com isso, a lógica Fuzzy pode inferir os valores para os ganhos nos casos diferentes daqueles testados previamente através de uma ponderação de todos os pontos do domínio. Na Figura 25, é apresentada a relação entre entradas e saídas do Controlador Fuzzy baseando-se nas regras linguísticas impostas ao sistema. No caso mostrado na Figura 25 observa-se que quando a carga é de 38,7% e a composição do combustível é 81%, por exemplo, apenas as Regras 10 e 14 são usadas para gerar os resultados apresentados ($K_p = 0,212$, $K_i = 0,632$ e $K_d = 0,00502$).

Figura 25 - Relação entre as variáveis de entrada e saída do Controlador Fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor.

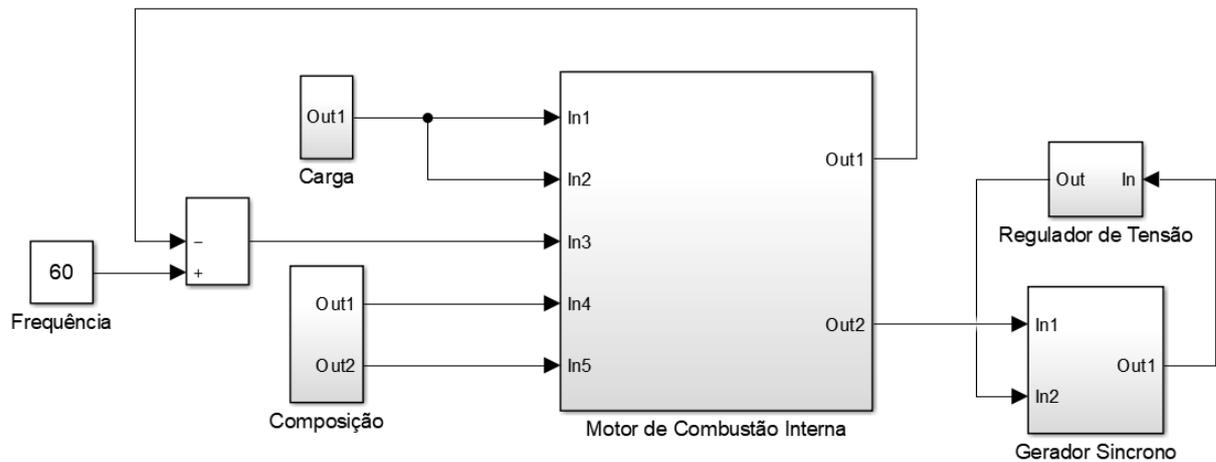
Percebe-se a partir da Figura 25 que para quaisquer valores assumidos pelas variáveis de entrada (pertencentes ao domínio definido para cada variável), obtém-se um valor específico para os ganhos do PID. Essa característica importante do Controlador Fuzzy confere continuidade e melhora na estabilidade do sistema de controle, uma vez que a passagem de um estado para outro sempre ocorre de forma contínua e sem distorções abruptas nos valores assumidos pelos ganhos.

Neste capítulo foram abordados temas relacionados à construção do modelo matemático que representa o funcionamento do grupo gerador. Foi apresentado todo o equacionamento matemático, bem como o processo de linearização empregado para que tal modelo pudesse ser implementado em uma ferramenta computacional adequada. Além disso, discutiu-se como foram obtidos os parâmetros experimentais necessários para adequar o modelo proposto ao estudo de caso empregado neste trabalho. Em seguida, foram abordados os temas relacionados ao projeto dos controladores usados no sistema, primeiro o controlador PID e, na sequência, o Controlador Fuzzy. Para a sintonia do controlador PID foi utilizada uma abordagem de sistema estático, ou seja, as entradas do sistema se mantinham constantes ao longo do tempo. Com isso, foi possível elaborar a base de regras e funções de pertinência necessárias para a construção do Controlador Fuzzy.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como discutido no Capítulo anterior, após a etapa de modelamento matemático do sistema de geração de energia, foi feita a implementação deste modelo no *software* Matlab/Simulink de forma que este modelo pudesse ser avaliado e testado de forma mais rápida e possibilitando facilidades para a edição do mesmo. Na Figura 26 é apresentada a modelagem do sistema, implementada no Simulink. Além da Figura 26, os Apêndices A e B trazem maiores detalhes do modelo que foi implementado computacionalmente para simular a operação do Motor de Combustão Interna e do Alternador Síncrono.

Figura 26: Modelo implementado no Simulink



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, foram simulados 16 pontos de operação distintos a fim de gerar parâmetros necessários para a construção do Controlador Fuzzy, responsável por alterar os ganhos dos controladores PID ao longo do funcionamento do sistema.

Neste capítulo são apresentados os resultados destas simulações e é discutido o significado de tais resultados, sua qualidade e aplicabilidade na prática. Para maior clareza e facilidade na apresentação de tais resultados, neste capítulo serão tratadas de forma distintas cada uma das simulações executadas.

4.1 Modelo Linearizado

Primeiramente, foi implementado no Matlab/Simulink o modelo linearizado desenvolvido para o motogerador, ainda sem nenhum tipo de controle, para que pudessem ser estudadas as características deste sistema, quanto a sua estabilidade e comportamento sob excitações de diversos tipos de entrada.

Como discutido anteriormente, os parâmetros do modelo são variáveis ao longo do

tempo. No caso deste estudo, a composição do biogás e a carga elétrica solicitada pela rede são tais parâmetros, e com isso o sistema apresenta características diferentes de acordo com os valores assumidos pelos parâmetros de modelo.

Na Equação (21.3) foi apresentado o resultado da linearização do sistema em função de três parâmetros numéricos k_1 , k_2 e k_3 . Estes parâmetros são derivados da associação dos diversos outros parâmetros experimentais e de projeto que ao longo do processo de linearização vão se relacionando e que, para efeitos de apresentação, foram agregados nestas três variáveis finais.

Com isso, a primeira simulação implementada foi com o objetivo de avaliar como os valores destes parâmetros k eram afetados pelas alterações de composição do combustível e de carga. Nas Tabelas 10, 11 e 12 são apresentados os valores destas variáveis para cada um dos 16 pontos de operação estudados. Assim como foi feito no projeto dos controladores, foram simulados pontos de operação que combinam estados de composição do combustível e de carga para a obtenção dos valores numéricos para cada um desses parâmetros, conforme apresentados nas tabelas.

Tabela 10 - Valores assumidos pelo parâmetro k_1

Parâmetro k_1					
		Composição			
		1,00	0,75	0,60	0,40
Carga	1,00	$4,145 \times 10^4$	$3,704 \times 10^4$	$3,587 \times 10^4$	$3,216 \times 10^4$
	0,75	$3,846 \times 10^4$	$3,436 \times 10^4$	$3,328 \times 10^4$	$2,986 \times 10^4$
	0,50	$3,515 \times 10^4$	$3,139 \times 10^4$	$3,040 \times 10^4$	$2,727 \times 10^4$
	0,25	$3,335 \times 10^4$	$2,881 \times 10^4$	$2,584 \times 10^4$	$2,144 \times 10^4$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Valores assumidos pelo parâmetro k_2

Parâmetro k_2					
		Composição			
		1,00	0,75	0,60	0,40
Carga	1,00	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171
	0,75	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171
	0,50	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171
	0,25	0,0171	0,0171	0,0171	0,0171

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Valores assumidos pelo parâmetro k_3

Parâmetro k_3					
		Composição			
		1,00	0,75	0,60	0,40
Carga	1,00	162,2356	162,2356	162,2356	162,2356
	0,75	136,3558	136,3558	136,3558	136,3558
	0,50	110,4761	110,4761	110,4761	110,4761
	0,25	97,5363	97,5363	97,5363	97,5363

Fonte: Elaborado pelo autor.

Primeiramente, observa-se que os valores assumidos por k_1 variam em todos os 16 pontos de operação propostos. Isso se deve ao fato de que este parâmetro depende de ambas as variáveis estudadas (composição do combustível e carga), além de outras constantes da modelagem. Outro ponto que pode ser destacado é que este parâmetro assume valores bastante elevados, quando comparados aos demais valores de k_2 e k_3 , com uma ordem de grandeza de 10^4 . Como k_1 é o denominador da Função de Transferência do sistema linearizado, esse efeito pode ser interpretado como um ganho bastante elevado inerente ao sistema. Tal comportamento pode indicar que o sistema tenha tendência à instabilidade e a assumir um caráter oscilatório intenso em regime transiente. Nas seções seguintes este tema é abordado novamente quando são discutidos os valores assumidos pelos ganhos dos controladores PID. Por fim, pode-se observar um comportamento decrescente nos valores de k_1 da esquerda para a direita e de cima para baixo (de acordo com a Tabela 10), ou seja, à medida que a composição e a carga diminuem, o valor de k_1 também diminui, indicando que este valor é diretamente proporcional à composição do combustível e à carga.

Ademais, pode-se observar que o efeito que a composição exerce sobre este parâmetro é mais forte do que o efeito causado pela diminuição na carga. Para tal, basta observar o caso em que tem-se o estado (1,00 ; 0,75) onde o valor de k_1 é $3,704 \times 10^4$, enquanto para o estado inverso, ou seja, (0,75 ; 1,00) o valor de k_1 passa a ser $3,846 \times 10^4$, uma variação de 4% aproximadamente. Esta observação pode ser explicada através do fato que k_1 depende diretamente do valor do Poder Calorífico do combustível (medida alterada diretamente quando a composição do combustível é alterada) enquanto que o efeito gerado pela diminuição da carga é imposto de forma indireta através de uma função da carga.

Já na Tabela 11, observa-se o fenômeno inverso do que foi discutido para a Tabela 10. Neste caso, todos os valores assumidos por k_2 apresentam-se constantes para todos os 16 pontos de operação testados. A conclusão direta que se pode inferir a partir desta observação é que este parâmetro não é afetado pela variação da composição e nem da carga. Este aspecto

constante de k_2 é interessante para o sistema, pois indica uma maior facilidade no momento da implementação do sistema de controle. Além disso, o valor assumido por k_2 é muito baixo quando comparado com os demais valores presentes nas Tabelas 10, 11 e 12. De acordo com a Equação (21.3), k_2 assume a função de amortecimento do sistema, este valor muito próximo de 0 indica um sistema que tende a oscilar no regime transiente podendo até mesmo ser instável. Este fato, corrobora com a observação feita também para os valores assumidos por k_1 , indicando de forma preliminar uma forte tendência à instabilidade por parte deste sistema, caso o mesmo não possua um sistema de controle adequado.

Por fim, tem-se que na Tabela 12 os valores assumidos por k_3 variam apenas dentro de uma mesma coluna, sendo constantes ao longo da mesma linha. A conclusão direta desta observação é que k_3 varia apenas com a carga, sendo imune às variações de composição do combustível. De fato, ao longo da composição do parâmetro k_3 o efeito da composição do combustível é anulado, restando apenas a influência da carga sobre os valores assumidos por este parâmetro. Como se pode observar, os valores de k_3 diminuem à medida que a carga é reduzida, implicando uma relação direta de proporcionalidade entre os valores assumidos pela carga e por k_3 . Porém, a proporção que a carga cai não é a mesma observada nos valores do parâmetro k_3 , por exemplo, quando se observa uma variação de 25% na carga, o valor de k_3 varia apenas 15%.

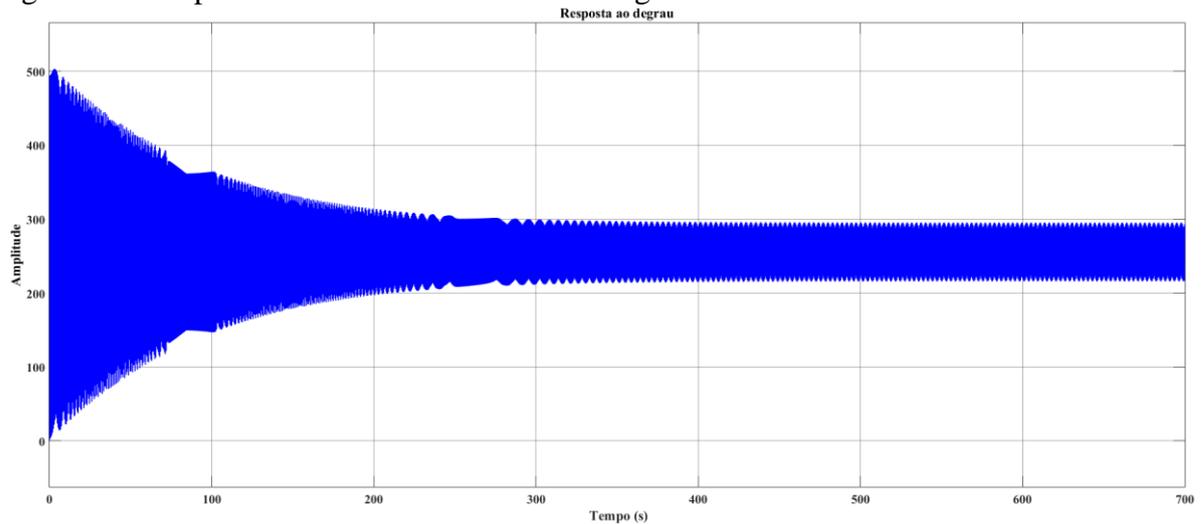
Uma vez sendo conhecidos os valores de todos os parâmetros da Função de Transferência do sistema linearizado, é possível simular o comportamento deste sistema em um ambiente de simulação apropriado (neste caso foi usado o Simulink) para que se possa observar o comportamento do mesmo em diversas condições de entrada, em estados diferentes.

As primeiras simulações realizadas foram com o sistema operando no ponto (1,00 ; 1,00), ou seja, com 100% da carga e o biogás sendo composto 100% por CH_4 . Neste caso, foi imposta uma entrada do tipo degrau para que se pudesse avaliar o comportamento do sistema simulado. Na Figura 27 é apresentado o resultado desta primeira simulação do sistema linearizado em malha aberta.

Observa-se pela resposta ao degrau do sistema em malha aberta que as suposições feitas a partir dos valores dos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 foram concretizadas. Observa-se uma forte oscilação na resposta transiente do sistema, que mesmo apresentando um certo grau de amortecimento ao longo do tempo, ainda assim não é capaz de se estabilizar no valor esperado, apresentando um erro estático considerável (o valor de equilíbrio em torno do qual o sistema oscila é da ordem de 250, bem acima da unidade, valor que era esperado) e não perde seu caráter oscilatório mesmo após 700 s de simulação.

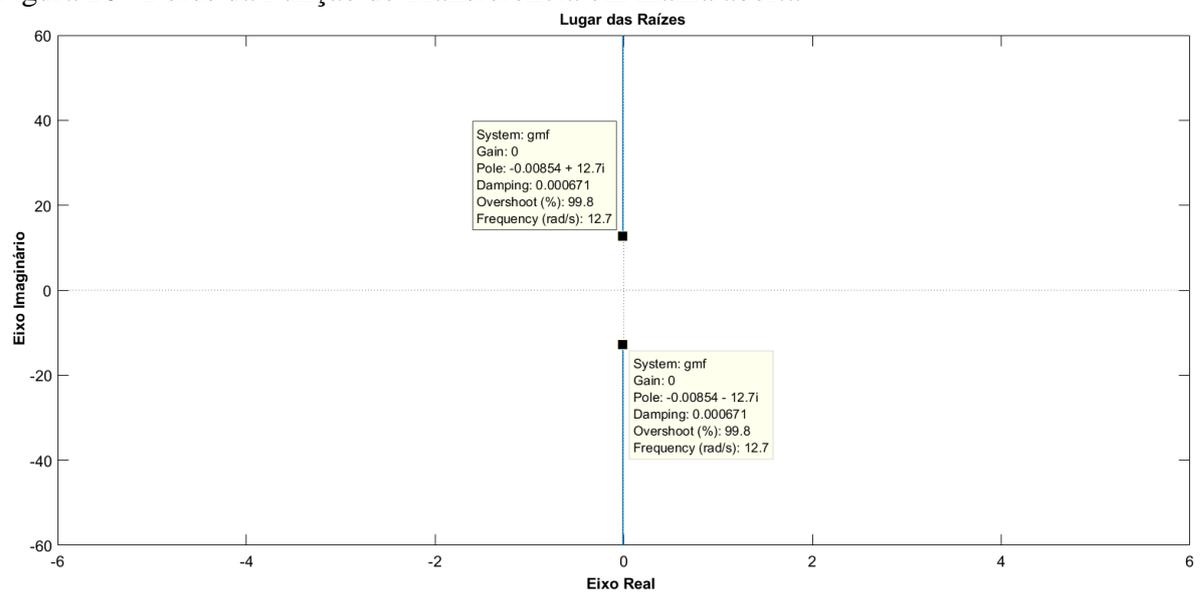
Mesmo assim, pode se dizer que o sistema é estável haja vista que sua resposta não tende a valores infinitos e o sistema apresenta um caráter dissipativo por conta do grau de amortecimento presente, ainda que muito inferior ao necessário para se eliminar por completo as oscilações. Na Figura 28 são apresentados os polos da FT para o sistema em malha aberta.

Figura 27 - Resposta do sistema linearizado ao degrau em malha aberta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Polos da Função de Transferência em malha aberta

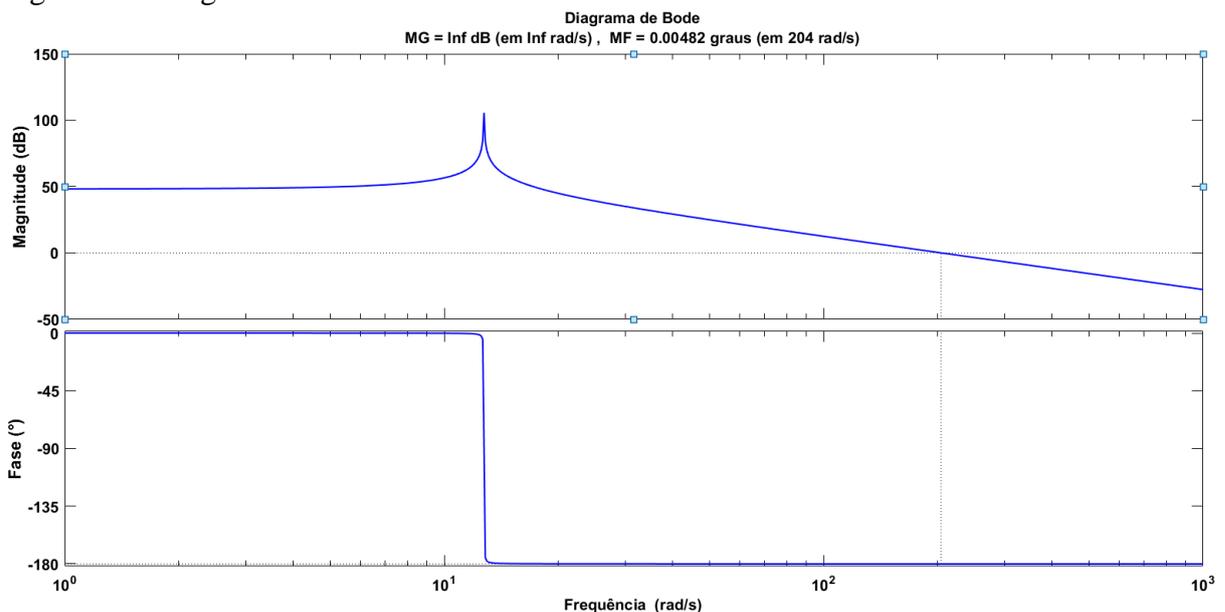


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 28 é possível perceber que os polos da FT são polos complexos, justificando a existência de um caráter oscilatório neste sistema. Além disso, nota-se que a parte real destes polos é bem próxima de zero, porém ainda assim negativo, mostrando que o sistema tem um caráter dissipativo (apresenta amortecimento) e por isso não é totalmente instável por si só.

Na Figura 29 pode-se ver que o Diagrama de Bode típico de um sistema de segunda ordem, com um pico de ganho atribuído ao baixo amortecimento do sistema (bem menor que 1), além de estar deslocado da origem em quase 50 dB por conta do alto ganho intrínseco ao sistema. O diagrama das fases apresenta comportamento característico para um sistema de segunda ordem começando em 0° e terminando em -180° com um decaimento bastante acentuado, mais uma vez devido ao baixo fator de amortecimento atribuído ao sistema s^{-1} .

Figura 29 - Diagrama de Bode em malha aberta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que o sistema linearizado se encontra na iminência da instabilidade, mas que ainda possui características dissipativas e por isso tende a uma estabilidade marginal após um longo tempo de simulação. Do ponto de vista prático, isso significaria que a saída do processo de geração de energia seria um sinal altamente oscilatório no regime transiente e que levaria um período de tempo considerável (quando considerados os intervalos de tempo impostos pela norma brasileira apresentados nas Tabelas 6 e 7), o que tornaria inviável a geração de energia utilizando tal sistema exclusivamente, sem o emprego de um controlador adequado. Daí surge a necessidade de se estudar mecanismos de controle adequados, que possam se apresentar como soluções apropriadas para este tipo de situação, permitindo que, na prática, possa-se utilizar tais sistemas de geração de energia com a confiabilidade e operabilidade necessárias e exigidas por norma.

Vale ressaltar ainda que estes resultados aqui apresentados se referem a apenas um dos pontos de operação estudados. De fato, a apresentação dos resultados de simulação para todos os 16 pontos de operação propostos seria redundante e desnecessária, visto que, mesmo

apresentando parâmetros diferentes para as FTs, todos os pontos de operação propostos acabaram por gerar sistemas com características bastante similares do ponto de vista de resposta transiente, regime estacionário, caráter oscilatório e respostas ao degrau.

4.2 Simulações dos Pontos de Operação com controlador PID

O próximo passo na sequência desta dissertação é simular os 16 pontos de operação previstos de forma a obter os valores dos ganhos K_i , K_p e K_d para os controladores PID do sistema. Estes valores de ganho representam os valores ideais para cada um dos pontos de operação e foram utilizados na implementação do Controlador Fuzzy como discutido no Capítulo 3. Nas Tabelas 13, 14 e 15 são apresentados tais valores de ganho para cada um dos casos propostos.

Tabela 13 - Valores assumidos pelo ganho K_p

Ganho Proporcional					
		Composição			
		1,00	0,75	0,60	0,40
Carga	1,00	0,0894	0,1032	0,1151	0,1393
	0,75	0,0964	0,1114	0,1242	0,1499
	0,50	0,1114	0,1289	0,1438	0,1733
	0,25	0,2675	0,0922	0,0922	0,1337

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Valores assumidos pelo ganho K_i

Ganho Integral					
		Composição			
		1,00	0,75	0,60	0,40
Carga	1,00	0,6026	0,6958	0,7761	0,9390
	0,75	0,6498	0,7509	0,8369	1,0106
	0,50	0,7509	0,8692	0,9691	1,1680
	0,25	1,4948	0,3737	0,2658	0,5731

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Valores assumidos pelo ganho K_d

Ganho Derivativo					
		Composição			
		1,00	0,75	0,60	0,40
Carga	1,00	0,0033	0,0038	0,0043	0,0052
	0,75	0,0036	0,0041	0,0046	0,0056
	0,50	0,0041	0,0048	0,0053	0,0064
	0,25	0,0088	0,0051	0,0059	0,0072

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 13 pode-se observar que o ganho proporcional K_p aumenta da esquerda para a direita e de cima para baixo, seguindo uma tendência inversa ao parâmetro k_1 da Função de Transferência do sistema linearizado. Esse efeito é justamente uma forma de balancear o alto ganho do sistema não controlado, de forma a atenuar o erro estático e diminuir as oscilações no regime transiente. Além disso, é possível observar que os valores do ganho mudam em todos os casos estudados, haja vista que a FT do sistema também tem seus parâmetros variando em todos os pontos de operação.

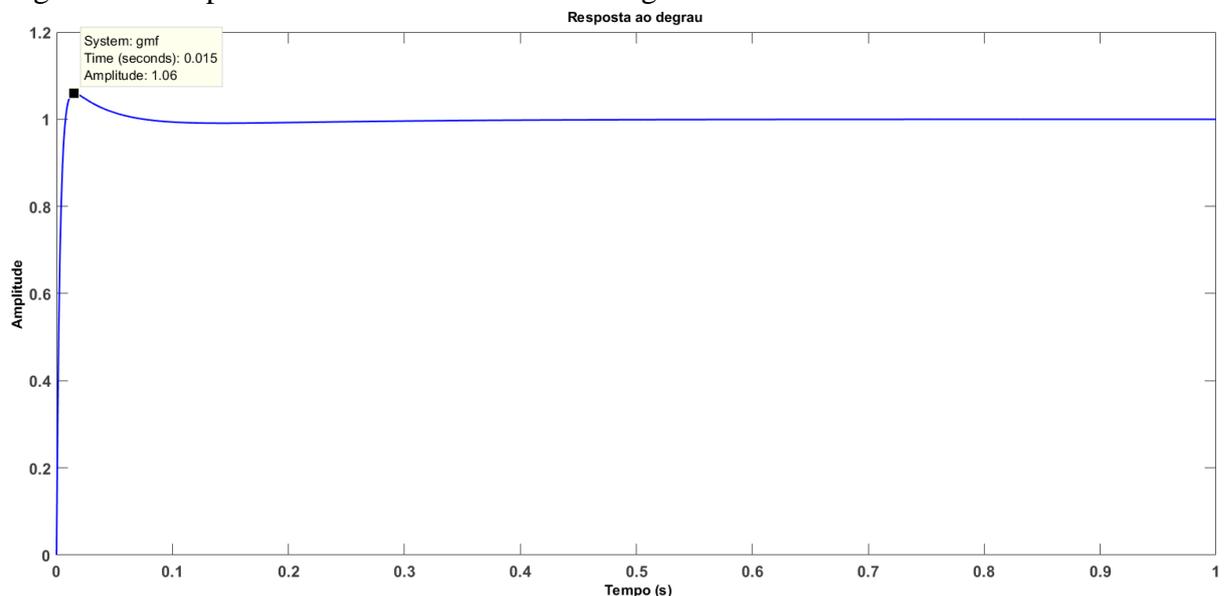
É importante ressaltar que o menor valor do ganho K_p ocorre no ponto onde a carga e a composição do combustível são máximos (1,00; 1,00). Porém, o valor máximo do ganho K_p não ocorre no ponto de mínima carga e composição do combustível, na verdade, isso ocorre quando a carga é mínima, mas a composição atinge o seu máximo (0,25; 1,00). Esse fato decorre, muito provavelmente, do fato de que neste ponto de operação em específico foi encontrado o sistema mais instável dentre todos os 16 pontos testados. Neste ponto em específico observou-se que seria necessário aumentar consideravelmente o ganho do controlador para atingir o mesmo patamar de qualidade do sinal de saída quando comparado aos demais casos estudados. Ademais, toda a última linha da Tabela 13 apresenta valores de ganho K_p destoantes do restante dos valores, quebrando a tendência observada até então. Essa observação indica que o sistema se mostra mais sensível as variações de composição do combustível quando está submetido a cargas muito baixas, próximas de zero. Este fato pôde ser observado na prática também, é perceptível a instabilidade de funcionamento do motogerador quando operando com baixas cargas e a composição do combustível varia. Diversas suposições podem ser levantadas para elucidar esse fato, de forma geral, entende-se que quando operando a baixas cargas o sistema está fora de seu ponto de operação nominal (situação para a qual o equipamento foi projetado) o que torna seu funcionamento prejudicado naturalmente, além disso, nestas condições ocorrem diversos fenômenos mecânicos com o MCI que degradam sua operabilidade, tais como: diminuição na eficiência volumétrica; baixa eficiência térmica da combustão; dificuldade em manter uma temperatura de operação adequada; resistência ao escoamento dos gases de combustão no sistema de escapamento devido à baixa pressão no interior da câmara de combustão, dentre outros.

Finalmente, pode-se perceber que os valores de ganho K_p são, em sua totalidade, menores do que 1, indicando que o ganho proporcional do controlador tem um papel de contrapor o efeito natural do ganho do sistema que já é bastante elevado (da ordem de 10^4).

Nas Tabelas 14 e 15 percebe-se que o mesmo tipo de tendências observadas no caso da Tabela 13, ou seja, a tendência de crescimento nos valores dos ganhos, o fato de que o ganho máximo ocorre no ponto (0,25; 1,00) e os baixos valores absolutos dos ganhos de forma geral.

Uma atenção especial deve ser dada à ordem de grandeza dos valores apresentados na Tabela 15 para o ganho derivativo K_d . Neste caso, observa-se que valores estão muito próximos de zero (sendo da ordem de 10^{-3}). Como discutido no Capítulo 2, o ganho derivativo tem o papel de atenuar as oscilações do sistema em seu regime transiente garantindo que o mesmo atinja os valores esperados sem grandes variações ao longo do caminho. Visto que o sistema apresenta, naturalmente, um certo grau de amortecimento inerente de seu desenvolvimento, o ganho derivativo existe apenas para assegurar que essa atenuação ocorra de forma rápida o suficiente e sem comprometer a estabilidade do sistema como um todo.

Figura 30 - Resposta do sistema controlado ao degrau

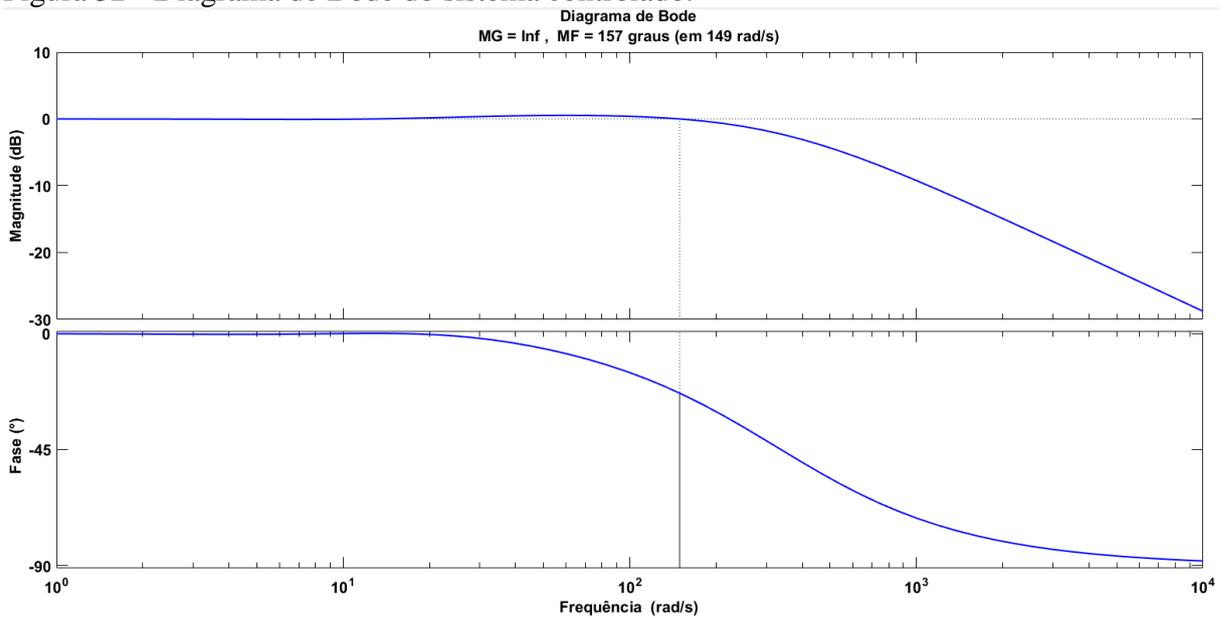


Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez determinados os valores dos ganhos proporcional, integral e derivativo para cada um dos 16 pontos de operação estudados, foram simulados os sistemas controlados em malha fechada com realimentação negativa. Os resultados obtidos com uma destas simulações são apresentados nas Figuras 30, 31 e 32 a seguir, na forma de gráficos de resposta ao degrau, Diagrama do Lugar das Raízes e o Diagrama de Bode do sistema apresentando as Margens de Ganho e de Fase.

É perceptível a mudança brusca na resposta do sistema uma vez que um controlador PID é inserido no processo. Em comparação com a resposta do sistema não controlado, observa-se que o controlador limita as oscilações da resposta a um simples pico que atinge 8% do valor nominal em 0,020 s. O valor deste sobressinal é aceitável de acordo com as especificações apresentadas nas Tabelas 6 e 7 representando, em valores numéricos, uma frequência de 4,8 Hz acima dos 60,0 Hz cujo tempo de correção dado ao sistema, de acordo com a Tabela 7, é de 10s

Figura 32 - Diagrama de Bode do sistema controlado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 32 percebe-se que o Diagrama de Bode do sistema controlado apresenta uma resposta praticamente sem sobressinal, partindo do ganho de 0 dB, ou seja, não apresentando erro estático em relação à saída desejada e com uma Margem de Ganho infinita. No diagrama de fase do sistema, pode-se observar que a transição entre o 0° e 90° acontece de forma bem mais suave do que era observado no diagrama do sistema não controlado, além de ter aumentado a Margem de Fase que saiu de $0,00482^\circ$ no sistema sem controlador, para 152° no sistema com controle. Esta observação mostra que o sistema teve sua estabilidade melhorada, de forma geral, apresentando uma saída melhor e mais condizente com as necessidades deste projeto.

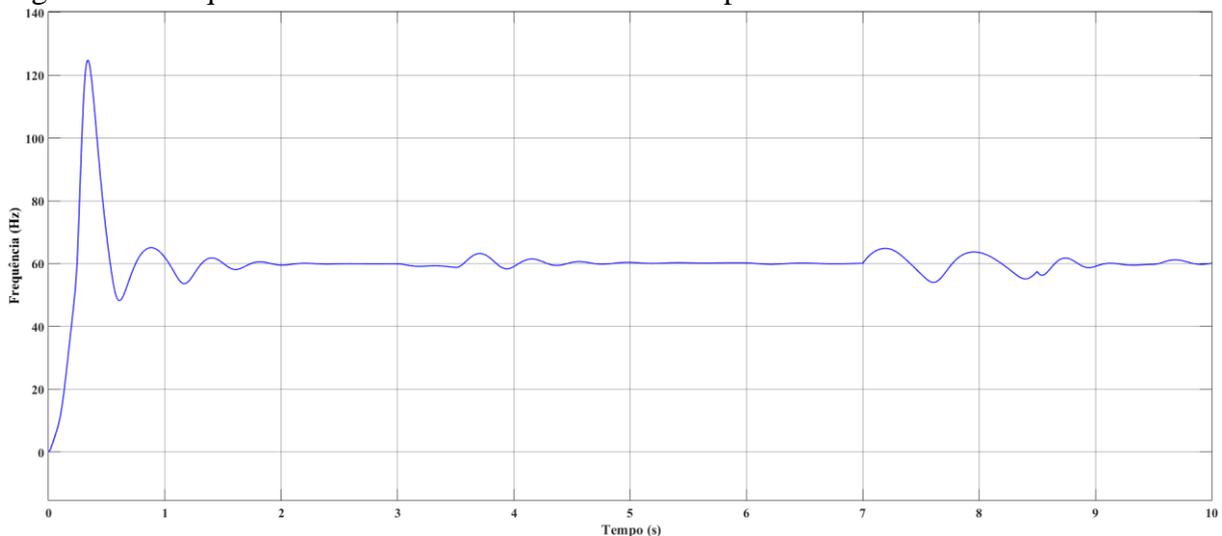
Mais uma vez, é importante ressaltar que os resultados apresentados para o sistema controlado refletem apenas um dos 16 pontos de operação propostos. De forma global, todos os sistemas simulados apresentaram comportamento similar, mostrando que os ganhos proporcional, integral e derivativo dos controladores projetados estão de acordo com o esperado e mostram que o sistema controlado pode ser viável para a utilização na geração de energia.

Em todos os casos estudados, os parâmetros de projeto foram atendidos na forma da redução das oscilações do sistema em seu regime transiente, na velocidade de resposta do sistema às alterações impostas e no quesito estabilidade, que é de grande importância para a aplicação prática. Agora que se conhece os valores de ganho adequados para cada um dos pontos de operação, pode-se avançar para a implementação do Controlador Fuzzy que será responsável por conferir o caráter dinâmico ao sistema de controle. Sabe-se que um controlador PID com os ganhos sintonizados para apenas um dos pontos de operação, não seria capaz de

assegurar as características necessárias ao sistema quando os parâmetros de composição do combustível e carga variassem. Cabe ao Controlador Fuzzy perceber as alterações nestes parâmetros de entrada e assegurar que os ganhos dos controladores PID sejam ajustados de forma adequada para cada condição estudada.

Vale salientar que simulações foram feitas utilizando-se apenas o controlador PID como método de atenuação das oscilações do sistema. Na Figura 33 é apresentado o resultado para a frequência de saída do sistema, utilizando-se o controlador PID otimizado para o ponto de operação em que a composição do combustível é 100% CH₄ e a carga também é de 100% da carga nominal.

Figura 33 - Frequência de saída do sistema controlado apenas com PID



Fonte: Elaborado pelo autor.

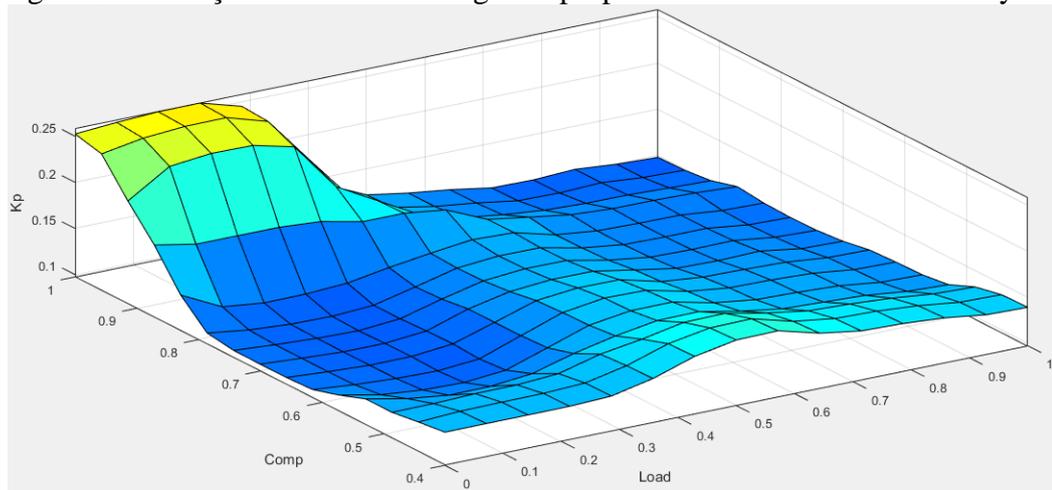
Observa-se que apenas o controlador PID não é capaz de assegurar que a saída do sistema atenda às especificações de projeto no que diz respeito às oscilações. Esse resultado decorre do fato de que o PID é um controlador adequado para situações onde existam pequenas variações dos parâmetros de entrada, ao longo da operação do sistema. Neste caso, observamos que o controlador foi otimizado para um caso específico de operação (100% de composição e 100% de carga) porém, não apresenta desempenho satisfatório quando as condições se distanciam muito do padrão usado na otimização. Isso mostra a importância de um sistema adaptativo que seja capaz de se adequar às adversidades impostas ao regime de operação do sistema, o que justifica o desenvolvimento e uso de um Controlador Fuzzy para ajustar os ganhos do controlador PID sempre que as condições de entrada forem alteradas.

4.3 Implementação do Controlador Fuzzy

Como discutido na Seção 3.4.3, o controlador Fuzzy foi proposto como uma forma de assegurar uma continuidade na alteração dos ganhos dos controladores PID durante a operação do sistema, relacionando as entradas (variáveis que representam a variação na composição do combustível e da carga) e as saídas (os ganhos proporcional, integral e derivativo dos controladores PID).

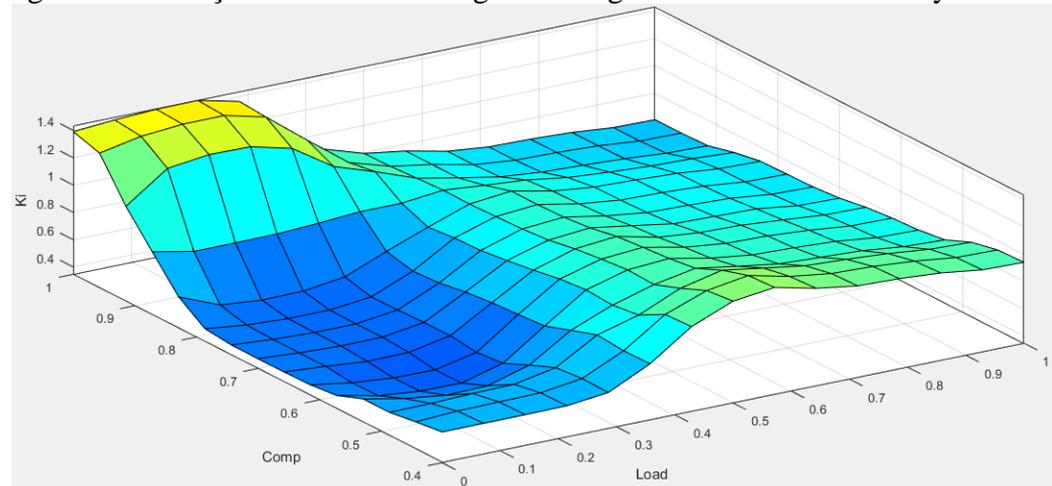
Foi utilizada a ferramenta nativa do Matlab para a criação do Controlador Fuzzy, bem como a implementação das regras e Funções de Pertinência. Essa ferramenta permite a visualização, de forma gráfica, da relação entre entradas e saídas dentro de todo o domínio no qual as variáveis estão definidas. Nas Figuras 34, 35 e 36 são apresentadas as superfícies 3D formadas pela relação entre variação da composição e carga versus os ganhos dos controladores PID.

Figura 34 - Relação entre entradas e ganho proporcional no Controlador Fuzzy



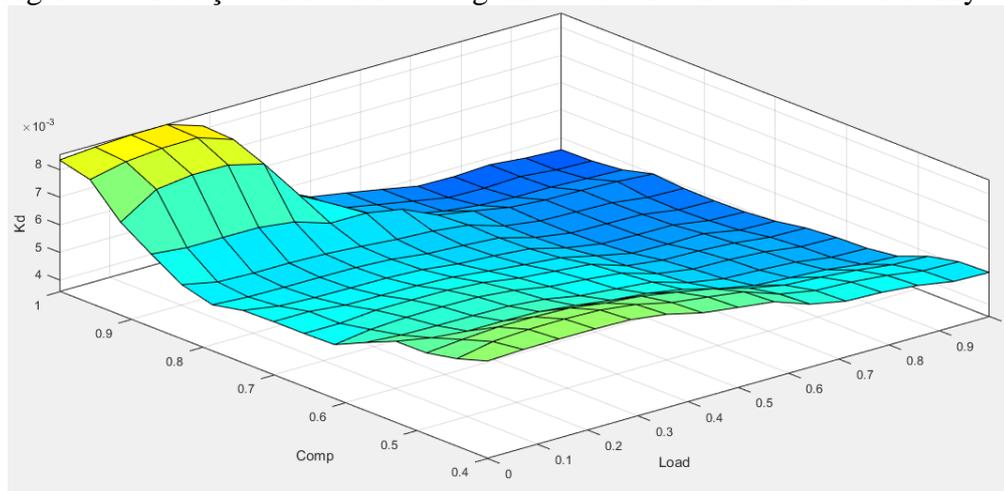
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Relação entre entradas e ganho integral no Controlador Fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Relação entre entradas e ganho derivativo no Controlador Fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 34, pode-se verificar algumas tendências importantes na resposta do Controlador Fuzzy às variações das entradas. Primeiro, conforme apresentado na seção anterior, o valor máximo do ganho K_p ocorre na região onde a composição do combustível assume valores máximos e a carga tem valores mínimos. Nas cargas baixas (valores até 30%) os valores do ganho continuam baixos para uma ampla faixa de composições diferentes e tende a subir quando a composição se aproxima de seus valores mínimos. No outro extremo, observa-se que para valores altos de carga (próximos a 100%) os valores de K_p voltam a ser inferiores, mostrando nesses dois casos que o ganho começa a diminuir como uma forma de balancear o ganho próprio do sistema que já é demasiadamente elevado. Quando o valor da composição começa a cair até atingir seus valores mínimos, o valor do ganho K_p volta a subir indicando que em casos extremos (cargas muito baixas ou composições muito baixas) o sistema precisa de um ganho proporcional mais importante para manter as características de velocidade na resposta e estabilidade sobretudo.

Na Figura 35 é apresentado comportamento similar entre K_p e K_i para a situação de baixas cargas e altas composições, sendo nesta região o valor máximo do ganho integral. Porém, neste caso observa-se que para cargas altas (valores acima de 50%) o ganho tende a ser maior em termos relativos do que K_p quando comparado com seus valores vizinhos. Isso indica que o ganho integral tem uma ligação mais forte com a variação de carga do que o ganho proporcional. Como o K_i está relacionado diretamente ao tempo de subida do sistema, pode-se inferir que neste caso, quando a carga aumenta existe um retardamento na velocidade do sistema sendo necessário um maior ganho integral para corrigir esse efeito e garantir que o sistema mantenha suas características de velocidade de resposta. Ademais, verifica-se que para valores intermediários de composição do combustível e de carga o comportamento do ganho integral

apresenta similaridades com aquele do ganho proporcional.

Finalmente, na Figura 36 observa-se um comportamento alinhado com os demais ganhos na região onde as cargas são baixas e a composição é alta, apresentando os valores máximos de ganho. Nas demais regiões do gráfico, tanto para a região central onde a carga e a composição assumem valores medianos e para toda a região de baixas composições, pode-se observar que o ganho derivativo tem um comportamento contrário ao do ganho integral. Essa observação é explicada ao se observar as relações entre os diferentes tipos de ganho do PID e seus efeitos sob o sistema, apresentadas na Tabela 1. De acordo com a tabela, os efeitos do ganho derivativo e integral são, de certa forma, antagônicos sendo que ambos se equilibram e, de certa forma, atenuam os efeitos um do outro. Sendo assim, para regiões onde o K_i é mais importante, é natural que o ganho derivativo seja menos proeminente e vice-versa.

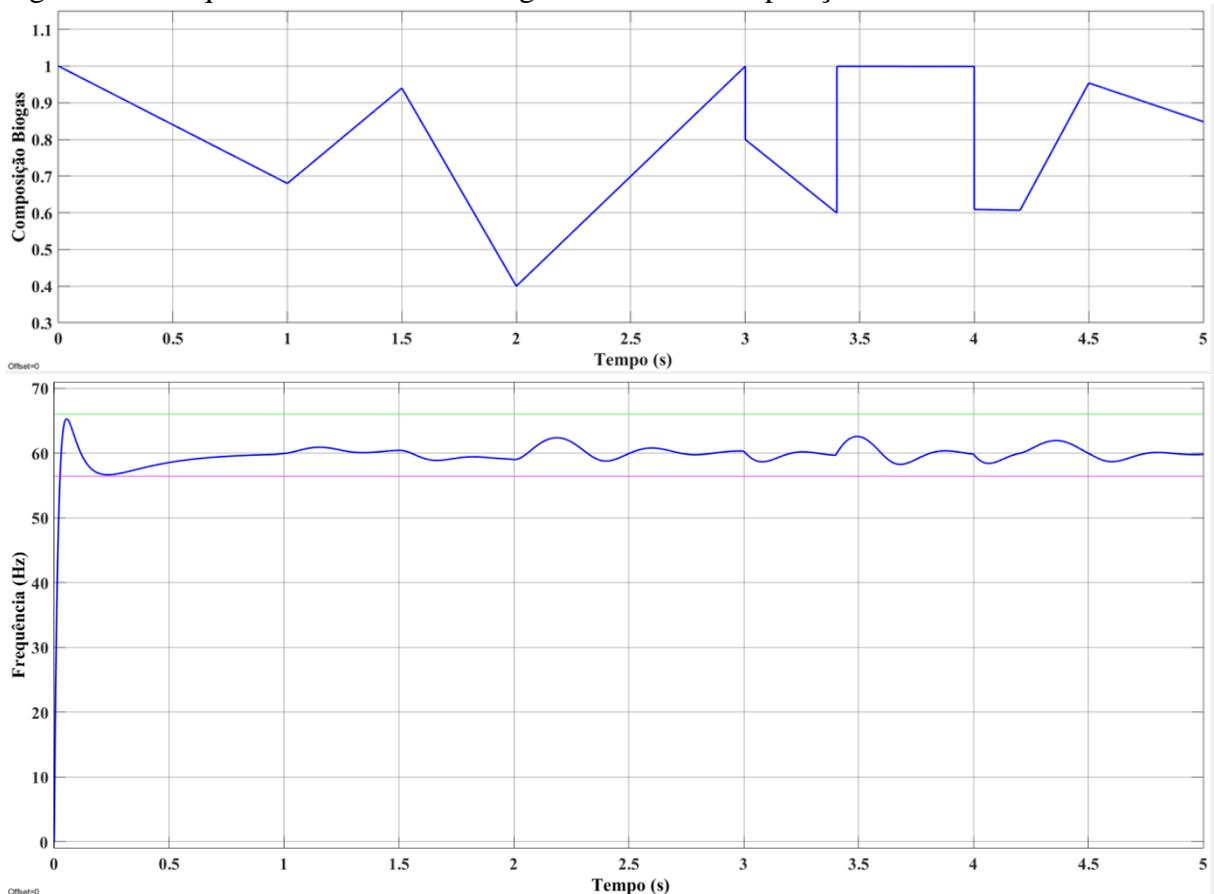
4.4 Simulação do Sistema Utilizando Controlador Híbrido Fuzzy-PID

Uma vez que os parâmetros necessários para a implementação do sistema de controle foram determinados, o modelo matemático completo (desenvolvido no Capítulo 3) foi implementado no Simulink. Este modelo foi construído em três etapas distintas: primeiro foi concebido o modelo matemático que representa a mecânica no MCI cuja entrada é a rotação de referência (equivalente a uma frequência de 60 Hz na saída) e uma saída que é a rotação medida do motor. Neste modelo, foram inseridas duas fontes de perturbações, que representam a variação da composição do combustível e da carga ao longo do tempo. Em seguida, um segundo modelo matemático foi inserido, representando os efeitos eletromagnéticos do alternador síncrono, responsável por transformar a energia mecânica entregue pelo MCI em energia elétrica. Neste modelo do alternador, a entrada é dada pela rotação do MCI e tem-se como saída as tensões, correntes e frequência elétrica geradas. Por fim, o sistema de controle foi inserido no modelo como uma forma de garantir que todo o sistema opere dentro das especificações já discutidas ao longo deste trabalho, sendo composto pelo Controlador Fuzzy que recebe como entradas os sinais de carga e composição do combustível e tem como saídas os três ganhos dos controladores PID (K_i , K_p e K_d), e também pelos controladores PID que recebem como entradas os respectivos ganhos e o sinal de erro entre a variável de referência e o sinal de saída do sistema que se deseja controlar.

As análises serão feitas baseadas nas saídas do sistema que refletem a qualidade da energia gerada, ou seja, frequência, tensão elétrica e corrente. Além disso, são apresentadas as condições de entrada impostas ao sistema para que se possa avaliar os impactos dessas entradas na resposta do sistema de geração. Primeiramente, nas Figuras 37, 38 e 39 são apresentadas as saídas do sistema, frequência, tensão de fase e de linha, respectivamente, quando as entradas

são carga constante, igual a 80% da nominal, e composição do combustível variável.

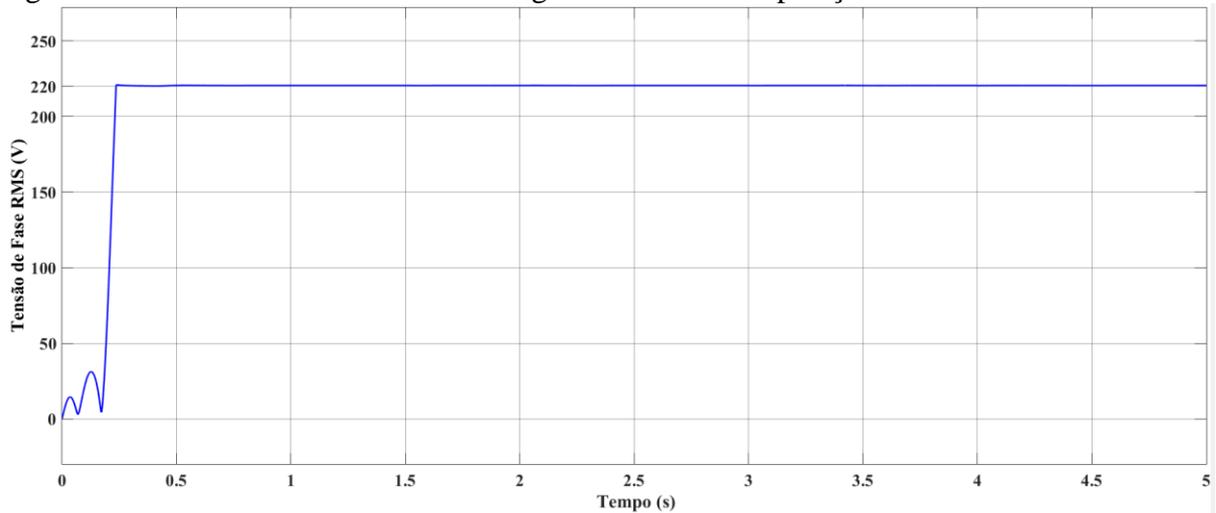
Figura 37 - Frequência de saída com carga constante e composição variável



Fonte: Elaborado pelo autor.

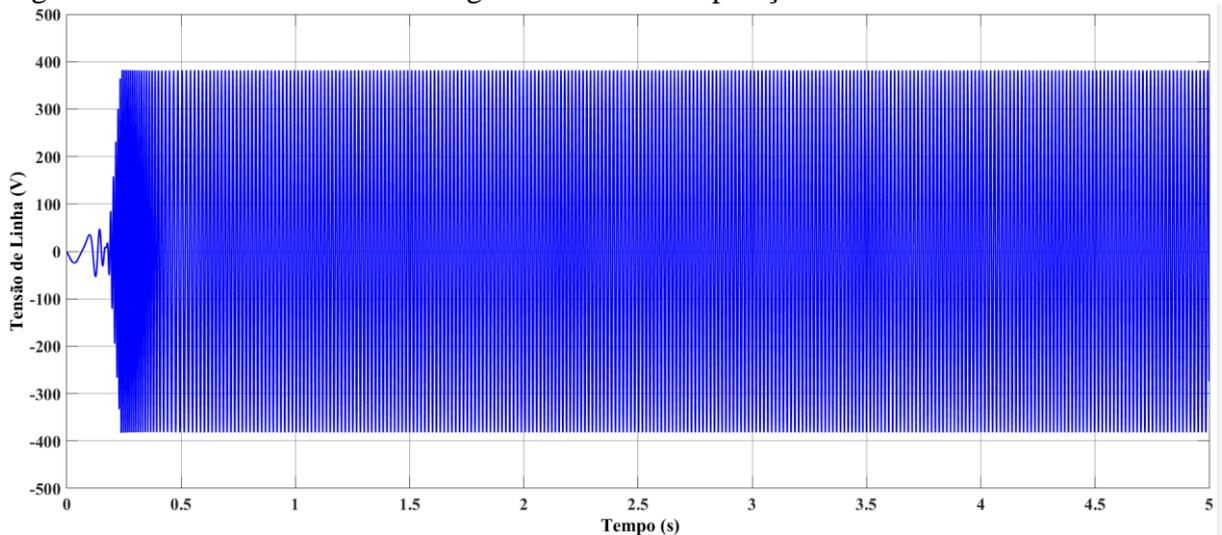
Pela Figura 37 observa-se que a frequência permanece dentro dos limites impostos por norma mesmo sob severas variações de composição ao longo da simulação apresentada. Durante o regime transiente, observa-se que o sistema atinge valores próximos aos limites superior e inferior de frequência devido, principalmente, ao caráter oscilatório do mesmo, conforme discutido anteriormente. O sistema de controle é capaz de assegurar que mesmo com variações ocorrendo durante o regime permanente, a saída continua dentro dos limites esperados, mantendo o sistema ainda conectado à rede. Outro ponto importante neste gráfico é a oscilação gerada por uma variação abrupta na composição do combustível que ocorre entre 3,5 s e 4 s, neste intervalo o valor da variável composição sai de 0,6 para 1,0 instantaneamente e em seguida retorna ao patamar de 0,6, mais uma vez, de forma instantânea.

Figura 38 - Tensão de Fase RMS com carga constante e composição variável



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Tensão de linha com carga constante e composição variável

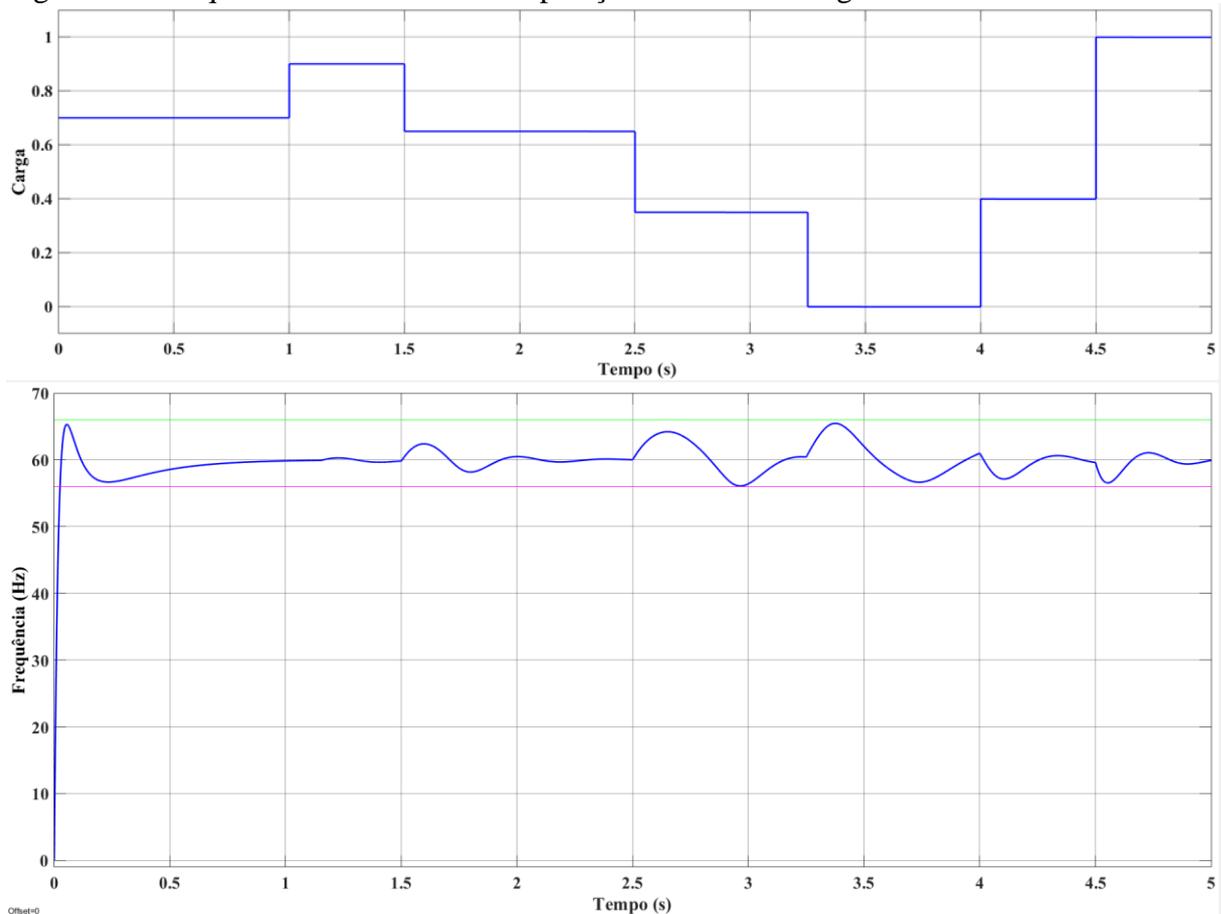


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Figuras 38 e 39 são mostrados que tanto a Tensão de Fase quanto a Tensão de Linha permanecem dentro dos limites impostos pela norma brasileira, após a passagem pelo regime transiente. Observa-se em ambos os casos que as variações na composição do combustível não afetam diretamente a tensão, que é um parâmetro menos sensível às variações pequenas que ocorrem na rotação do MCI quando as variáveis de entrada do sistema variam.

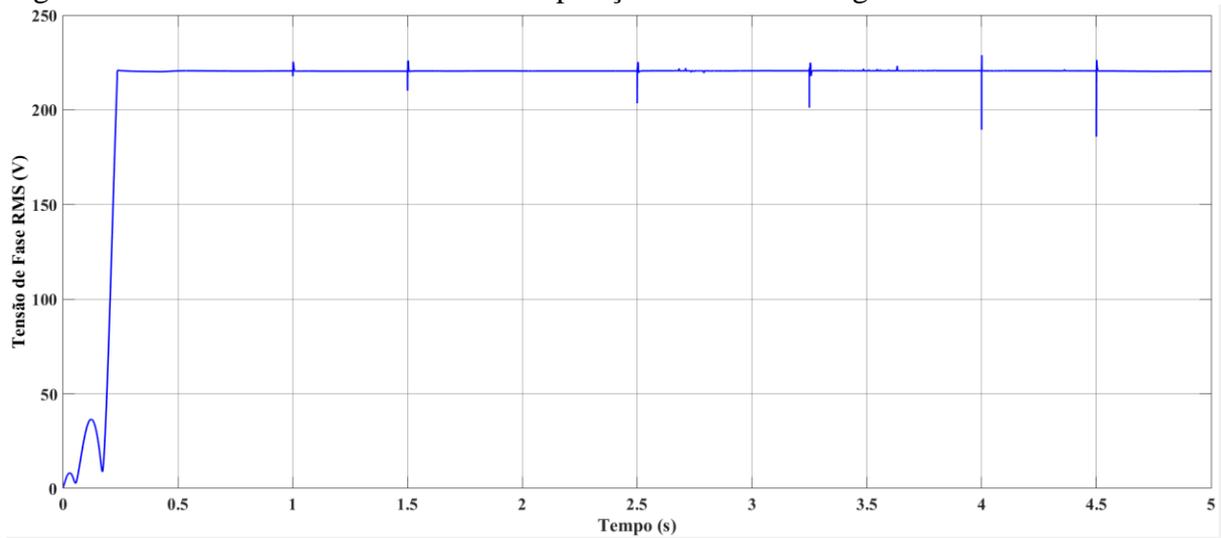
Em seguida, realizou-se a simulação do caso inverso ao apresentado anteriormente, quando a carga oscila ao longo do funcionamento e a composição do combustível foi mantida constante em 80%. Assim, nas Figuras 40, 41 e 42 são apresentados os resultados obtidos em termos de frequência, tensão de linha e de fase, respectivamente, para comparação com os resultados discutidos previamente.

Figura 40 - Frequência de saída com composição constante e carga variável



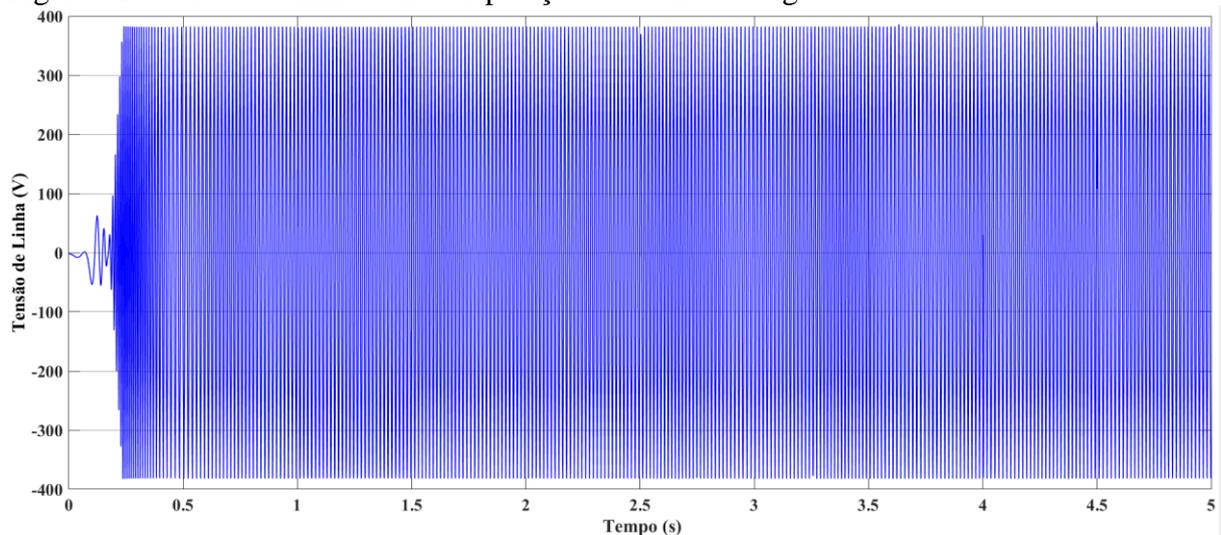
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Tensão de Fase RMS com composição constante e carga variável



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Tensão de linha com composição constante e carga variável



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se pela Figura 40 que o comportamento da frequência de saída do sistema de geração, no caso onde a carga varia e a composição é constante, permanece similar ao caso estudado anteriormente. As principais oscilações do sistema são percebidas quando ocorrem variações súbitas na carga, como indicado no intervalo de 3,0 e 4,5 s. Mesmo nessas condições, a resposta do sistema se mantém dentro dos limites impostos pela norma e também assegura a estabilidade da resposta durante todo o intervalo de tempo observado. Vale ressaltar que existe um retardo na resposta do sistema aos impulsos instantâneos da entrada devido, principalmente, à inércia do próprio sistema, sobretudo ao modelo mecânico do MCI que apresenta um grau considerável de inércia.

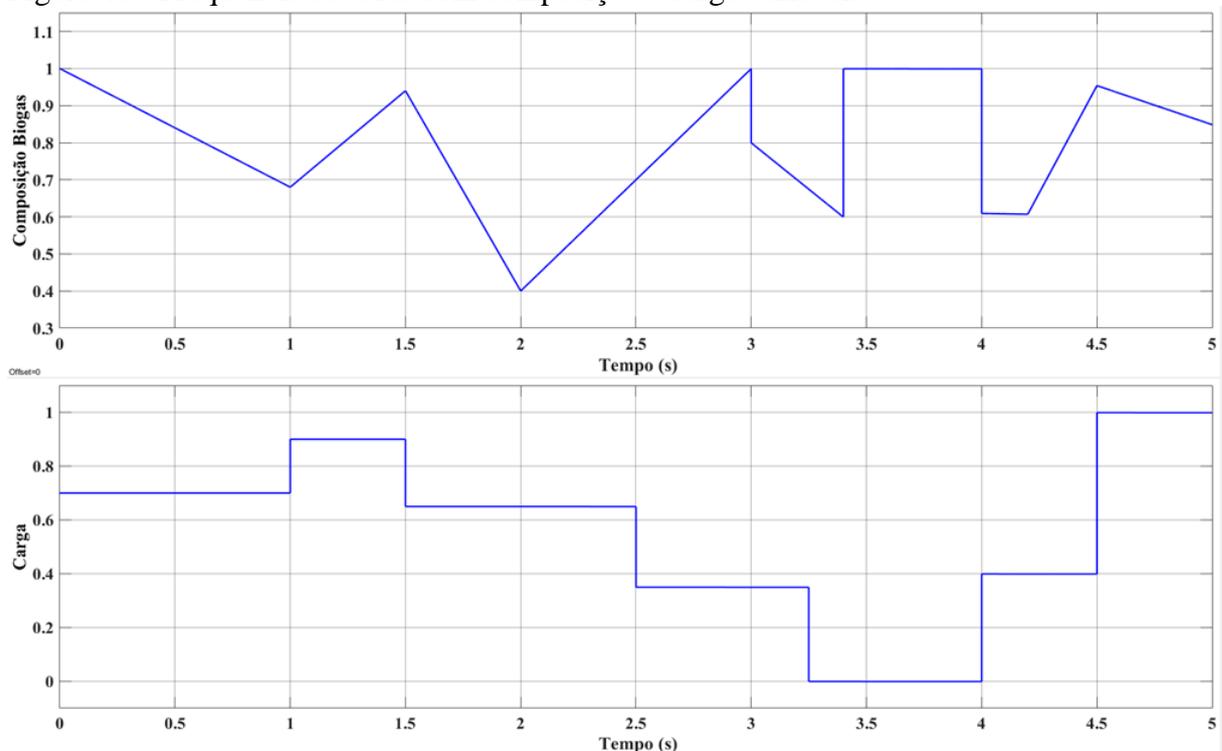
Pelas Figuras 41 e 42 percebe-se que as variações de carga apresentam impacto mais significativo no sinal de tensão gerado pelo alternador síncrono em comparação ao efeito da variação de composição de combustível. De fato, pode-se observar um afundamento de tensão a cada vez que a carga é alterada de maneira imediata (simulando-se um chaveamento de cargas durante o funcionamento do gerador). Mesmo assim, o sistema de controle atua de forma rápida corrigindo a tensão logo em seguida que ocorre a variação na mesma, assegurando que os limites máximos e mínimos para essa variável continuem em acordo com as especificações dadas na Tabela 7.

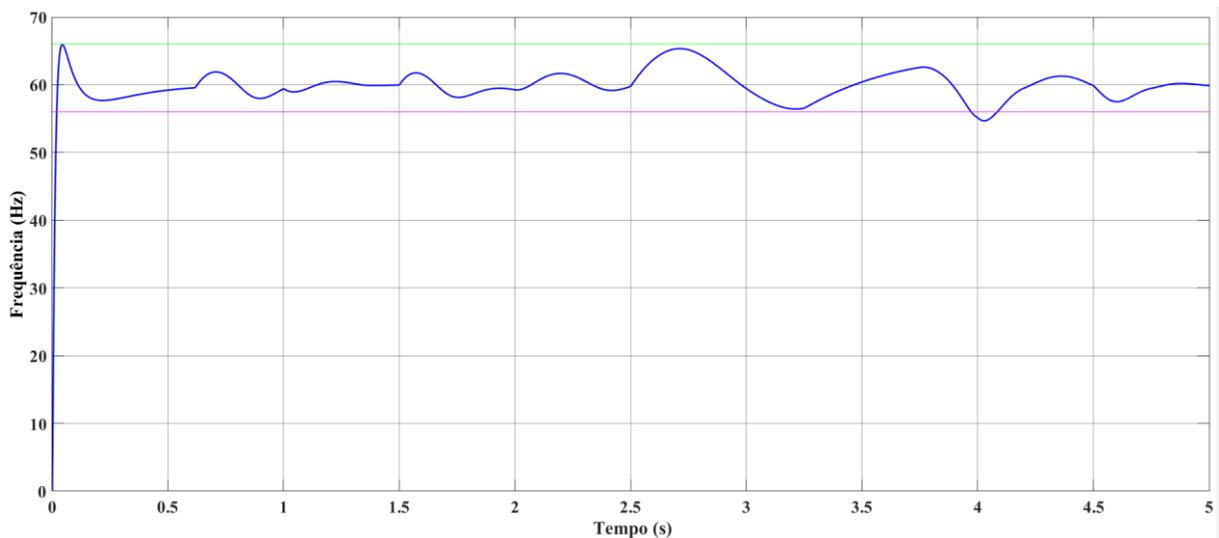
Finalmente, foi simulada a operação do sistema de geração considerando variação de ambos os parâmetros analisados, composição do combustível e carga. Nessa simulação foram utilizados como sinais de entrada aqueles já apresentados nesta seção nas Figuras 37 e 40, com a variação de composição do biogás e de carga respectivamente. Assim, nas Figuras 43, 44 e 45 são apresentados os resultados obtidos com a simulação final do sistema de geração

controlado, impondo condições que podem se aproximar de uma operação real bastante penalizada, visto que na prática, não se observam variações tão bruscas na composição do biogás ao longo do dia e tampouco com variações súbitas de grande intensidade como as aqui simuladas.

As condições severas impostas ao sistema modelo têm como objetivo apresentar a robustez do controlador proposto e evidenciar o comportamento do sistema modelo em condições limites de funcionamento. Mesmo que possíveis, tais condições de operação estão ligadas, majoritariamente, a falhas nos sistemas anexos ao de geração ou no próprio, como por exemplo, problemas com o sistema de captação e purificação do biogás podem levar a variações bruscas na composição do combustível. Do ponto de vista da carga, pode-se evidenciar que para que sejam possíveis tais variações instantâneas de carga seria necessário que o circuito ao qual o gerador está conectado sofresse curto-circuito repentino (para justificar um desligamento súbito de todas as cargas) ou então uma condição de emergência onde se necessita utilizar 100% da potência nominal do gerador. Vale ressaltar que este último caso é desaconselhado, visto que operar com o sistema de geração sempre em 100% de sua potência nominal, pode diminuir drasticamente a vida útil do equipamento e comprometer seu funcionamento correto.

Figura 43 - Frequência de saída com composição e carga variáveis

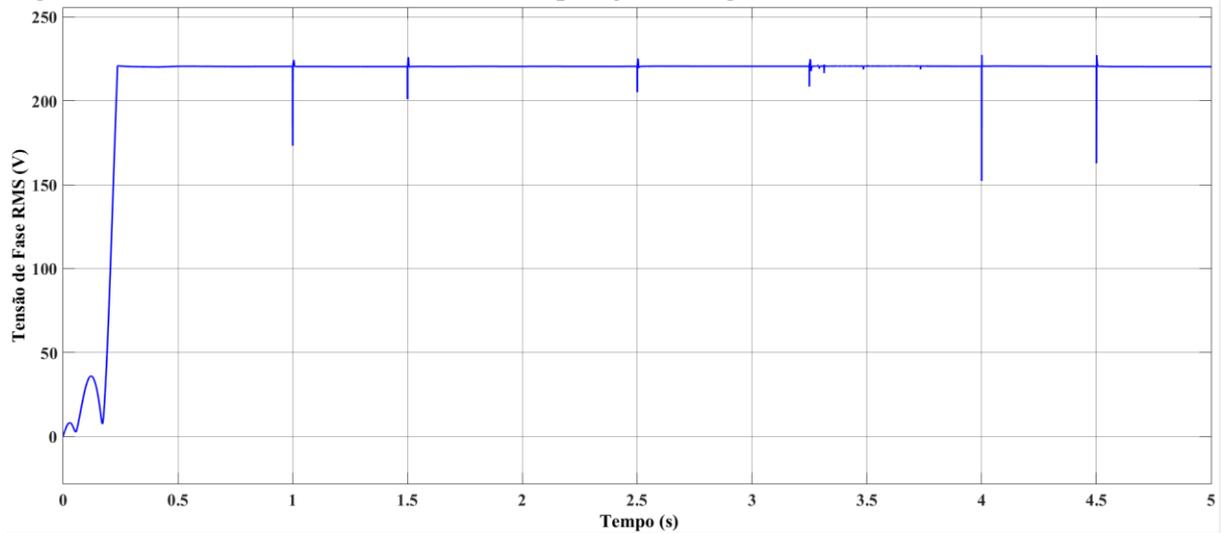




Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que neste caso as oscilações na frequência são muito mais intensas do que visto nas imagens anteriores. Nesse caso o sistema de controle tem de lidar com as variações simultâneas de composição do biogás e da carga de forma a garantir que a saída do sistema se mantenha dentro dos limites de projeto. Percebe-se que o regime transiente se mantém praticamente inalterado em relação às três simulações apresentadas. Já na parte final da simulação inicia-se uma sequência de oscilações mais importantes devido às variações mais severas impostas nas entradas para este intervalo de tempo, sobretudo a partir de 3,0 s quando as variações ficam realmente importantes até culminarem numa ultrapassagem do limite inferior da frequência pouco depois de 4,0 s de simulação. A ultrapassagem da barreira inferior de 56,50 Hz impõe que o sistema seja desconectado imediatamente da rede elétrica, conforme a Tabela 7. Isso implica na queda da geração global do sistema, visto que o mesmo estaria indisponível durante o intervalo de tempo necessário para o reestabelecimento das condições normais de operação. Mesmo que o sistema de controle se mostre ineficiente neste caso específico, pode-se dizer que, de maneira geral, este acontecimento não põe em risco o resultado global obtido com o sistema de controle proposto, visto que na grande maioria dos casos o sistema permaneceria conectado à rede e disponível para geração. A oscilação observada tem uma duração total de 113 ms, onde o sistema de controle consegue restabelecer o valor da frequência de volta aos padrões aceitáveis de funcionamento. Com isso, fica claro que, mesmo não atendendo inteiramente os limites da norma, o sistema ainda assim se mostra eficiente no controle do sistema de geração e se mostra como uma boa alternativa para garantir a disponibilidade do grupo gerador. Nas Figuras 44 e 45 é apresentado como as tensões de fase e de linha, respectivamente, se comportam ao longo da simulação.

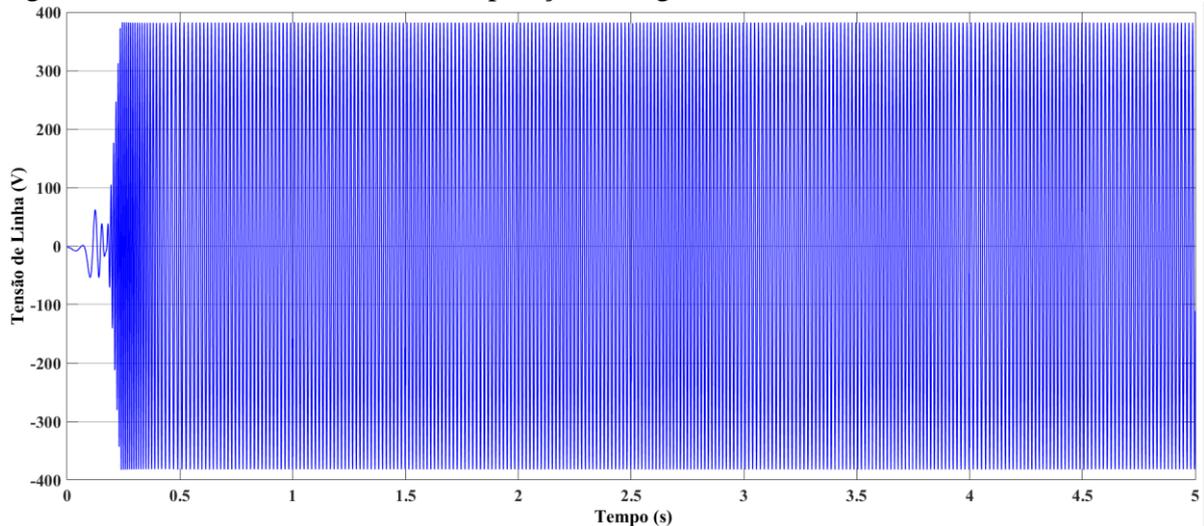
Figura 44 - Tensão de Fase RMS com composição e carga variáveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que, conforme apresenta a Figura 44, existem variações de tensão significativas, como no tempo de 4 s, por exemplo. Neste caso, observa-se que a tensão de saída do sistema chega a 150 V e então é reestabelecida ao valor nominal. O tempo total desta oscilação é da ordem de 2 ms, ou seja, essa oscilação de tensão ocorre num intervalo de tempo menor do que um ciclo (da ordem de 17 ms), sendo praticamente desprezível do ponto de vista da operação do sistema.

Figura 45 - Tensão de Linha com composição e carga variáveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, pode-se perceber que o comportamento da tensão se mantém praticamente inalterado entre as simulações mostradas. Mais uma vez, isso vem do fato de que a variação da tensão está muito mais correlacionada com as alterações de carga do que com o comportamento

da composição do combustível. Assim, como o regime de carga foi o mesmo entre as duas últimas simulações, é de se esperar que o sinal de tensão obtido na saída seja similar.

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos com as simulações do sistema. Primeiramente, observou-se a necessidade de um sistema adaptativo capaz de se adequar às variações das entradas, donde foi proposto o uso do Controlador Fuzzy em conjunto ao PID. Foram analisados aspectos relacionados à estabilidade do sistema com e sem os controladores propostos, por meio dos Diagramas de Bode e do Lugar das Raízes do sistema em diferentes estágios. Em seguida, foi discutido o projeto do Controlador Fuzzy e de suas funções de pertinência, os parâmetros que foram utilizados em sua construção e a lógica de funcionamento por trás deste sistema de controle. Tendo, finalmente, o sistema de controle operacionalizado, foram realizados testes no sistema em diferentes situações, a saber: com carga constante e composição do combustível variável; com composição constante e carga variável; com ambos os parâmetros, carga e composição do combustível variando. A partir dessas simulações foram gerados os sinais de saída do sistema (frequência e tensão) que puderam ser analisados e discutidos em detalhes.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo matemático baseado na abordagem do Método do Valor Médio (MVM), que representa a dinâmica de um motogerador a biogás, operando com diversas composições de combustível e sob diversas condições de carga. Utilizou-se parâmetros experimentais obtidos em uma bancada de testes, além de parâmetros empíricos disponíveis na literatura. Foram definidos 16 pontos operacionais distintos para realizar testes com o modelo implementado no MATLAB/Simulink, variando a composição do biogás e de carga. Após a linearização do sistema, foi possível projetar um controlador híbrido, composto por um Controlador Fuzzy, responsável por alterar os ganhos de controladores PID.

Primeiramente, percebeu-se que seria necessário um sistema de controle inteligente, para responder de maneira rápida às variações dos parâmetros de entrada do sistema. Observou-se que somente um controlador PID não apresentava as características necessárias, visto que a sintonia dos seus parâmetros é otimizada apenas para um único ponto de operação. Assim, decidiu-se pela implementação de um Controlador Fuzzy capaz de perceber as variações de composição do combustível e carga e alterar os parâmetros do PID de forma otimizada.

Em segundo lugar, foi possível observar que as variações de composição apresentam impacto mais significativo na frequência elétrica do que nas tensões de saída do gerador. A variação de carga, por sua vez, apresenta efeitos importantes em ambas as variáveis de saída estudadas (frequência e tensão elétricas). Essa relação vem do fato de que a frequência está diretamente ligada a velocidade de rotação do MCI, sendo afetada diretamente por alterações no comportamento mecânico do sistema. Já a tensão possui uma relação menos direta com as variações de rotação, estando mais correlacionada ao circuito de cargas ao qual o grupo gerador está conectado.

Por fim, observou-se que o método de controle proposto se mostrou adequado, garantindo estabilidade na resposta do sistema, mesmo sob variações instantâneas da composição do combustível e de carga. O tempo de resposta apresentado pelo controlador foi inferior ao limite exigido descrito na norma, sendo quase instantâneo para alguns dos casos estudados, o que mostra que o sistema de controle estaria adequado para aplicações de geração distribuída de energia elétrica. Durante as simulações executadas, os valores máximos de frequência e tensão atingidos pelo sistema permaneceram dentro dos limites projetados. Além disso, foi possível perceber que os controladores Fuzzy são aplicações de grande importância em sistemas como o estudado neste trabalho, que apresentam parâmetros variáveis ao longo do tempo e que precisam de um sistema de controle adaptativo, diferente das aplicações industriais mais corriqueiras que são, em sua maioria, estáticas.

Como trabalhos futuros, destaca-se a importância do desenvolvimento de um sistema de controle ainda mais robusto, usando técnicas de parametrização automática, como as Redes Neurais ou Algoritmos Genéticos, como forma de otimização dos parâmetros dos controladores PID, a fim de aumentar a eficiência do controlador e o número de possíveis pontos operacionais para o sistema. Além disto, propõe-se a implementação deste sistema de controle em bancada de testes para que se possa comparar os resultados obtidos com o modelamento matemático e aqueles observados na prática. Tal comparação é de extrema importância para a validação do modelo matemático proposto, bem como a obtenção de resultados concretos que podem ser comparados com aqueles simulados em computador.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa n° 687**. Aneel. Brasília, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acessado: 10/10/2019.
- BASTIDA, H.; UGALDE-LOO, C. E.; ABEYSEKERA, M. Dynamic modelling and control of a reciprocating engine. **Energy Procedia**, v. 142, p. 1282-1287, 2017.
- BOLDEA, I. **Synchronous Generators**. 2. ed. New York: CRC Press, 2015. 467 p.
- BORGNAKKE, S. **Fundamentos da Termodinâmica** – Série Van Wylen. 8. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2013.
- BRITO, T. S. P. **Desenvolvimento de um controlador PID-Fuzzy para o controle de nível de água de um pressurizador de um reator nuclear**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Editora Blucher, 2012. 484 p. v.1.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2013. 700 p.
- CHEN, Q. X.; WU, C. F. Biogas engine start controller PID parameter setting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, MECHANICAL CONTROL AND COMPUTATIONAL ENGINEERING (AMCCE), 2. 2017, Beijing, **Proceedings** [...]. Atlantis Press, 2017. p. 990-993.
- EDMINISTER, J. A. **Circuitos Elétricos**. 2. ed. São Paulo: Editora Mcgraw-hill, 1991.
- ENEL DISTRIBUIÇÃO. **Especificação Técnica n 122 v. 2: Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema Elétrico da Enel Distribuição Ceará/Enel Distribuição Goiás/Enel Distribuição Rio**. Rio de Janeiro: Grupo Enel, 2018.
- ERIKSSON, L.; NIELSEN, L. **Modeling and control of engines and drivelines**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 2014.
- FACCIN, F. **Abordagem inovadora no projeto de Controladores PID**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR). **Guia prático do Biogás: Geração e utilização**. Traduzido pelo projeto Probiogás do Ministério das Cidades, 2010. Disponível em: http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf. Acessado em: 08/06/2019.

GASPAR, R. M. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na geração de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

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**, v. 40, p. 100-111, 2016.

GUZZELLA, L; ONDER, C. **Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems.** 2. ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals.** New York: Mcgraw-hill, 1988.

ISERMANN, R. **Engine modeling and control.** Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

JADRIC, I.; BOROJEVIC, D.; JADRIC, M. Modeling and control of a synchronous generator with an active dc load. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 15, p. 303-311, 2000.

JAGATHEESAN, K.; ANAND, B.; DEY, K. N.; ASHOUR, A. S.; SATAPATHY, S. C. 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**, v. 100, p. 895-911, 2018.

JAIN, S.; JAIN, M.; JAIN, D.; MASAND, D. Fuzzy-PI based SEIG for rural electrification. In: IEEE INTERNATIONAL STUDENTS' CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS AND COMPUTER SCIENCE (SCEECS), 2018, London. **Proceedings [...]**. 2018, p. 1-6,

LEE, C. C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller (part I). **IEEE Transactions on Systems**, v. 20, n. 2, p. 404-418, 1990.

LOURENÇO, J. **Sintonia de Controladores PID.** Rio de Janeiro: Escola Superior de Tecnologia, 1997.

MAGALHÃES, A. P. **Biogás: um projeto de saneamento urbano.** São Paulo: Editora Nobel, 1980.

MANOEL FILHO, F. **Projeto de um controlador Fuzzy-PI para ajuste automático de velocidade da colhedora de cana-de-açúcar.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

KAN, X.; ZHOU, D.; YANG, W.; ZHAI, X.; WANG, C. H. An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine. **Applied Energy**, v. 212, p. 210-222, 2018.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D.; PEKAREK, S. **Analysis of electric machinery and drive systems.** Wiley-IEEE Press, 2002, p. 632, v. 2.

KUMAR, M. K.; KAILAS, T. S.; ILANGO, K.; NAIR, M. G. 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, Amritapuri. **Proceedings** [...]. IEEE, 2017, p. 1-5.

MAYA, P. A.; LEONARDI, F. **Controle Essencial**. 1. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

MOORE, C. F. **Control Modes – Closed-loop Response**. In: LIPTAK, B. G. (Edit.) *Instrument Engineer's Handbook: Process Control*. 3 ed. Boca Raton: CRC, 1999.

OLSSON, L.; FALLDE, M. Waste(d) potential: a socio-technical analysis of biogas production and use in Sweden. **Journal of cleaner production**, v. 98, p. 107-115, 2015.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing**. 3 e.d. John Wiley & Sons, 2007.

REIS, G. B.; NEVES, R. V. A.; AGUIAR, C. R.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A. A fuzzy control strategy for a diesel generating set under stand-alone and grid-connected operations. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 25, p. 174-183, 2014.

RHINEHART, R. R. **Control Modes – PID Variations**. In: LIPTAK, B. G. (Edit.) *Instrument Engineers' Handbook: Process Control*. 3ª ed. Boca Raton: CRC, 1999.

ROLAN A.; LUNA, A.; VAZQUEZ, G.; AGUILAR, D.; AZEVEDO, G. Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2009, Seoul. **Proceedings** [...] IEEE, 2009. p. 734-739.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Application**. 3 ed. Novo México: John Wiley & Sons, 2010.

SABOYA J. F.; ALVES, M. G.; PINTO, W. D. Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic. **Engineering Geology**, v. 86, p. 211-224, 2006.

STERN, S.; KRISHNAKUMAR, B.; CHARATI, S.; AMATO, W.; FRIEDMAN, A.; FUESS, D. Performance of a bench-scale membrane pilot plant for the upgrading of biogas in a wastewater treatment plant. **Journal of Membrane Science**, v. 151, p. 63-74, 1998.

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

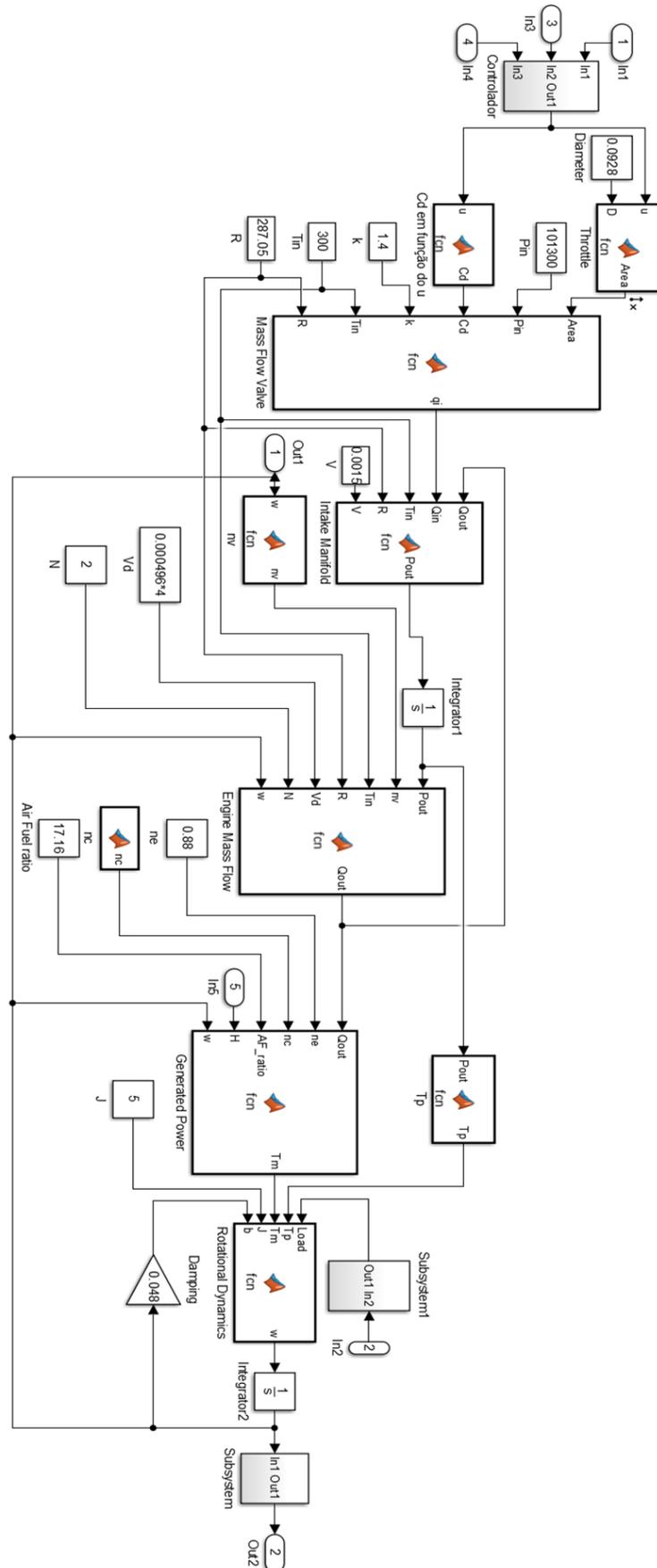
XU, G.; LIU, F.; HU, J.; BI, T. Coordination of wind turbines and synchronous generators for system frequency control. **Renewable energy**, v. 129, p. 225-236, 2018.

YUN, K. T.; CHO, H.; LUCK, R.; MAGO, P. J. Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery. **Applied Energy**, v. 102, p. 327-335, 2013.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

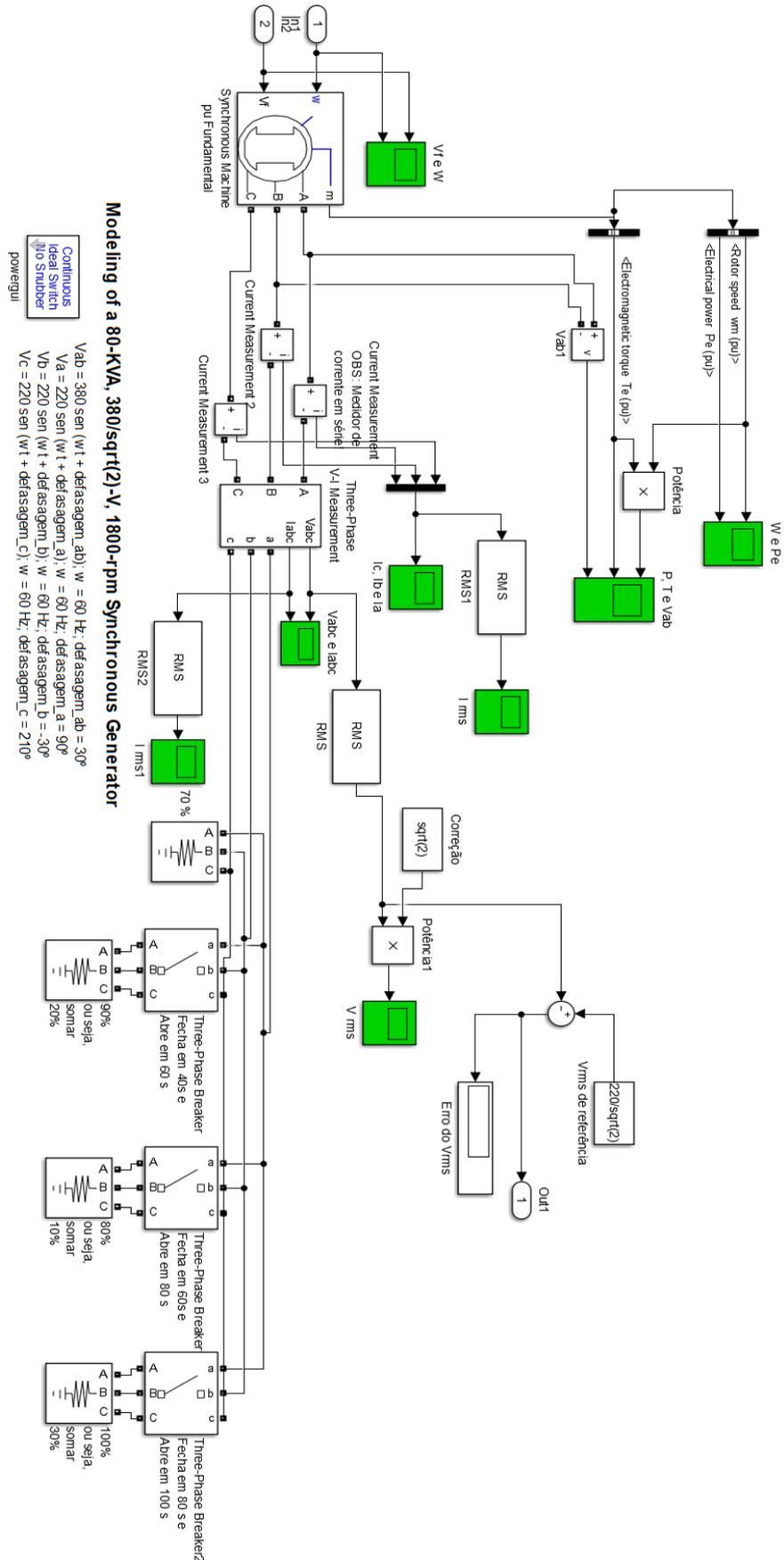
ZHANG, Y.; JIANG, J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. **Annual reviews in control**, v. 32, p. 229-252, 2008.

APÊNDICE A – MODELAGEM DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – MODELAGEM DO ALTERNADOR SÍNCRONO



Fonte: Elaborado pelo autor.