

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Walquíria do Nascimento Silva

**Otimização operacional de microturbinas a gás para aplicações de geração
distribuída**

Juiz de Fora

2020

Walquíria do Nascimento Silva

**Otimização operacional de microturbinas a gás para aplicações de geração
distribuída**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr.: Bruno Henriques Dias

Coorientador: Prof. Dr.: Leonardo Willer de Oliveira

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Walquíria do Nascimento.

Otimização operacional de microturbinas a gás para aplicações de geração distribuída / Walquíria do Nascimento Silva. – 2020.

111 p. : il.

Orientador: Prof. Dr.: Bruno Henriques Dias

Coorientador: Prof. Dr.: Leonardo Willer de Oliveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenharia Elétrica. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

1. Microturbinas. 2. Geração Distribuída. 3. Otimização. I. Dias, Bruno Henriques. II. Oliveira, Leonardo Willer de. III. Título.

Walquíria do Nascimento Silva

Otimização Operacional de Microturbinas a Gás para Aplicações de Geração
Distribuída

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-
versidade Federal de Juiz de Fora, na área de
concentração em Sistemas de Energia, como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica, Sistemas de
Energia.

Aprovada 02 de março de 2020

BANCA EXAMINADORA



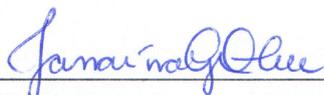
Prof. Bruno Henrique Dias - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Leonardo Willer de Oliveira - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Bruno Wanderley França
Universidade Federal Fluminense



Profª. Janaína Gonçalves de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho a meus pais, Antônio e Jurema.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a energia superior, Deus, que sempre está comigo emanando-me luz e sabedoria através da presença de seres divinos e de luz. Agradeço por jamais me deixar nas horas difíceis, permitindo que eu pudesse chegar até aqui, mesmo diante dos entraves da vida.

Agradeço aos meu pais, que são anjos protetores em minha vida e que sempre me incentivaram e apoiaram para que eu nunca desistisse dos meus objetivos. Juntamente a eles, agradeço as minhas irmãs e minha sobrinha por serem o meu apoio e consolo nas horas que sempre precisei.

Agradeço aos professores orientadores Bruno Dias e Leonardo Willer, e a professora Janaína Oliveira por toda orientação e dedicação oferecidas ao longo do desenvolvimento desta Dissertação. Agradeço por todo amparo, incentivo e conhecimento compartilhado que obtive ao longo desta trajetória, gratidão. Agradeço também, a disponibilidade do Professor Bruno França em fazer parte desse momento trazendo contribuições para melhoria do trabalho desenvolvido.

Agradeço ao pessoal do laboratório NUPESP, LABSPOT que forneceram a estrutura para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Agradeço aos amigos do laboratório e do mestrado por todos os momentos alegres e por todo conhecimento compartilhado. Ainda, agradeço a Técnica Administrativa Tatiane Lopes por todo amparo, gentileza e carinho.

Agradeço a todos que diretamente e indiretamente me ajudaram neste processo. Agradeço à banca avaliadora, pela atenção e contribuição dedicadas neste trabalho.

E ainda, agradeço ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica (PPEE-UFJF) e as instituições CAPES, FAPEMIG, CNPq e INERGE pelo apoio a este trabalho.

"Para o mundo, a grandeza de um homem está no poder ou na riqueza que ele detém. Mas para Jesus, a estatura de um homem se mede pelo serviço que presta aos seus semelhantes." (LUCCA, 2017, p.146).

RESUMO

Essa dissertação propõe uma estratégia de investigação do princípio de funcionamento dinâmico de microturbinas a gás (MGT) através de sua modelagem matemática. Por meio da análise do comportamento dinâmico da MGT, faz-se a inserção de um regulador de potência em malha fechada para aumentar a capacidade de resposta à demanda para utilização em sistemas de cogeração e de geração distribuída (GD). Adicionalmente, propõe-se um algoritmo de otimização para identificar os parâmetros de sintonia do regulador visando ao ajuste de potência mecânica. O método adotado é uma técnica meta-heurística bioinspirada denominada Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA). O objetivo principal é projetar um sistema adequado visando à otimização operacional de MGT para geração de energia, com conexão à rede elétrica. Para a otimização dos parâmetros do controlador, utiliza-se um modelo simplificado a fim de aumentar a eficiência computacional na otimização de seus parâmetros. Após a otimização, valida-se a efetividade da operação do controlador otimizado utilizando um modelo completo de MGT. De modo geral, esta proposta envolve a análise da MGT modelo Capstone C30, o dimensionamento do sistema de eletrônica de potência e projeto de cada um dos controladores pertencentes ao sistema para conexão à rede, bem como a aplicação do algoritmo SIA para ajuste de parâmetros do controlador. O desenvolvimento é validado por meio de simulação, utilizando o *software Simulink-MATLAB*[®], cujos resultados obtidos indicam que a estratégia de controle proposta é capaz de atingir os objetivos esperados e é adequada para MGT. Por fim, os resultados demonstram que o modelo simplificado utilizado na otimização via SIA responde de forma satisfatória na sintonia do controlador, ao se comparar suas respostas com aquelas do modelo completo.

Palavras-chave: Controle. MGT. Otimização. Potência Mecânica. SIA.

ABSTRACT

This paper proposes a research strategy of dynamic behavior of gas microturbines (MGT) through mathematical modeling. By analyzing MGT's dynamic behavior, a closed mesh power regulator is inserted in order to increase the ability to respond to usage demand in distributed cogeneration and distributed generation (DG) systems. Additionally, an optimization algorithm is proposed to identify the regulator's tuning parameters aiming at mechanical power adjustment. The method adopted is a bioinspired meta-heuristic technique called Artificial Immune Systems (AIS). The main objective is to design an appropriate system aimed at the operational optimization of MGT for power generation, with a connection to the electricity grid. To optimize controller parameters, a simplified model is used to increase computational efficiency in optimizing its parameters. After optimization, the effectiveness of the operation of the optimized controller is validated using a complete MGT model. In general, this proposal involves the MGT analysis Capstone C30 model, the sizing of the electronic power system and the design of each of the controllers belonging to the system for on grid connection, as well as the application of the AIS algorithm to adjust controller parameters. Development is validated through simulation, using *Simulink software- MATLAB®*, whose obtained results indicate that the proposed control strategy is capable of achieving the objectives as expected. Finally, the results show that the simplified model used in the optimization via SIA responds satisfactorily in the controller's tuning when comparing to the complete model.

Keywords: Control. MGT. Mechanical Power. Optimization. AIS.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros operacionais da microturbina.	75
Tabela 2 – Parâmetros GSIP	80
Tabela 3 – Parâmetros do algoritmo SIA	88
Tabela 4 – Sistema de eletrônica de potência.	91
Tabela 5 – Ganhos do controlador	92
Tabela 6 – Resultados algoritmo SIA	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CHP	Combinação de Calor e Energia (do inglês, <i>Combined Heat and Power</i>)
CHCP	Combinação de Calor, Frio e Energia (do inglês, <i>Combined Heat, Cooling and Power</i>)
DB	Diagrama de Bloco
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FPB	Filtro Passa-Baixa
FT	Função de Transferência
GD	Geração Distribuída
GSIP	Gerador Síncrono de Imãs Permanentes
IGBT	Transistor bipolar com gatilho isolado (do inglês, <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
MGT	Microturbinas a Gás
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PLL	Circuito de sincronismo com a rede (do inglês, <i>Phase Locked Loop</i>)
PSO	Otimização por enxames de Partículas (do inglês, <i>Particle Swarm Optimization</i>)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (do inglês, <i>Pulse-Width Modulation</i>)
REN	Resolução Normativa
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIA	Sistema Imunológico Artificial
SRF	Sistema de Coordenadas Síncronas (do inglês, <i>Synchronous Reference Frame</i>)
SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal (do inglês, <i>Sinusoidal Pulse-Width Modulation</i>)
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do sistema de Distribuição
VSC	Conversor Fonte de Tensão (do inglês, <i>Voltage Source Converter</i>)
VSI	Inversor Fonte de Tensão (do inglês, <i>Voltage Source Inverter</i>)
VSR	Retificador Fonte de Tensão (do inglês, <i>Voltage Source Rectifier</i>)
WOA	Algoritmos de Otimização de Baleias (do inglês, <i>Whale Optimization Algorithm</i>)

SUMÁRIO

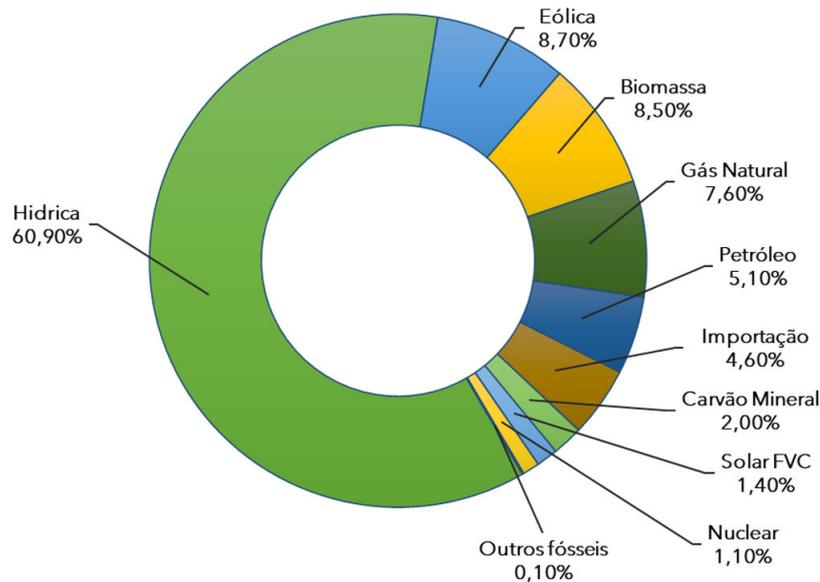
1	INTRODUÇÃO	21
1.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	22
1.2	BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
1.3	ANÁLISE DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO	26
1.4	OBJETIVOS	27
1.4.1	Objetivos gerais	28
1.4.2	Objetivos específicos	28
1.5	PUBLICAÇÃO DECORRENTE DA PESQUISA	28
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
2	FUNDAMENTOS GERAIS	31
2.1	COGERAÇÃO E TRIGERAÇÃO	31
2.1.1	Aplicações de sistemas de cogeração e trigerção	32
2.1.2	Tecnologias usuais em sistemas de cogeração e trigerção	33
2.1.2.1	<i>Cogeração</i>	33
2.1.2.2	<i>Trigerção</i>	34
2.2	MICROTURBINAS A GÁS	35
2.2.1	Modelagem da microturbina	41
2.2.2	Controle de velocidade	42
2.2.3	Controle de aceleração	43
2.2.4	Controle de temperatura	43
2.2.5	Seletor mínimo	44
2.2.6	Sistema de combustível	45
2.2.7	Dinâmica da microturbina	45
3	FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS	49
3.1	GERADOR ELÉTRICO	49
3.1.1	Gerador síncrono de ímãs permanentes	49
3.1.2	Circuito trifásico equivalente do GSIP	50
3.1.2.1	<i>Equações características do GSIP</i>	52
3.2	SISTEMA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA	54
3.2.1	Conversor back-to-back	54
3.2.1.1	<i>Conversor CA-CC</i>	55
3.2.1.2	<i>Conversor CC-CA</i>	56
3.2.2	Características de operação do conversor <i>back-to-back</i>	56
3.2.3	Barramento de corrente contínua (CC)	57
3.2.4	Filtro indutivo	58
3.3	PROJETO DE CONTROLE DO CONVERSOR <i>BACK-TO-BACK</i>	59
3.3.1	Análise de métodos de controle para conversores trifásicos	59

3.3.2	Controle do lado máquina	60
3.3.3	Controle de velocidade da máquina síncrona	61
3.3.4	Controle do lado da rede	62
3.4	CONTROLE DE CORRENTE DAS COORDENADAS SÍNCRONAS	63
3.4.1	Controle de tensão do barramento CC	68
4	METODOLOGIA PROPOSTA	73
4.1	MICROTURBINA CAPSTONE C30	74
4.1.1	Controle de potência da microturbina a gás	78
4.2	SISTEMA DE GERAÇÃO	79
4.2.1	Gerador elétrico	79
4.2.2	Parâmetros do conversor back-to-back	80
4.3	ALGORITMO PROPOSTO PARA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA	80
4.3.1	Função objetivo	81
4.3.2	Sistemas imunológicos artificiais (SIA)	82
4.3.3	Algoritmo SIA	87
4.3.4	Modelo simplificado para simulação	88
4.3.5	Metodologia de simulação	88
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	91
5.1	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA	91
5.2	ANÁLISE DA MICROTURBINA CONECTADA À REDE	92
5.3	OTIMIZAÇÃO ALGORITMO SIA	94
5.3.1	Simulação do algoritmo SIA-(principais resultados)	94
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS	97
5.4.1	Velocidade angular do gerador elétrico.	98
5.4.2	Tensão no barramento CC	98
5.4.3	Corrente trifásica injetada no PAC	99
5.4.4	Tensão trifásica no PAC	100
5.4.5	Potência ativa e reativa injetada no PAC	101
6	CONCLUSÃO E DISCUSSÕES	103
6.1	TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

Diferentes sistemas energéticos estruturam o mercado brasileiro de energia, tais como: usinas hidrelétricas, usinas eólicas, solares, termelétricas, entre outros. Ao analisar a matriz energética do Brasil de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), infere que a principal fonte geradora de energia elétrica utilizada no país é proveniente do sistema hídrico, como pode ser visto na Figura 1. Entretanto, ao considerar o contexto atual, constata-se que os recursos até então utilizados estão se tornando cada vez mais escassos devido a fatores como: aumento da demanda energética, mudanças climáticas, modificações do padrão de consumo e o crescimento demográfico.

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: Dados baseados em ABSOLAR (2019).

Para suprir o aumento dessa demanda e dos aspectos considerados anteriormente afere-se a necessidade de alteração da matriz elétrica buscando-se novas alternativas de fornecimento de energia elétrica com um menor custo e que resultem em uma geração eficiente. Contudo, para ocasionar tais modificações pondera alguns fatores como: a preservação do meio ambiente e sustentabilidade, visto que o aquecimento global e a poluição ambiental ganham cada vez mais relevância. Ainda é necessário fazer a análise do impacto econômico, uma vez que a geração de energia elétrica deve ser tratada de modo estratégico pelo governo e pelos órgãos responsáveis, pois o efeito usual do desenvolvimento econômico está relacionado ao custo e ao respectivo aumento da demanda da energia (GIVISIEZ, 2018).

Perante essas questões, busca-se cada vez mais o desenvolvimento de novas tecnolo-

gias e o aprimoramento das já existentes no que concerne a geração de energias renováveis e por alternativas de geração de energia com maior confiabilidade, principalmente em aplicações com geração distribuída (GD).

O intuito é gerar energia de forma eficiente, com menor custo e menor impacto ambiental. Permitindo assim, que novas fontes de energia renováveis e de métodos que utilizem tecnologias convencionais e alternativas sejam incorporadas ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), ampliando a diversificação da matriz energética e, conseqüentemente, aumentando a eficiência energética do sistema elétrico, mantendo ou melhorando a confiabilidade do mesmo.

Os sistemas de GD vêm sendo utilizados em instalações para diversas finalidades, permitindo a descentralização da geração de energia elétrica, aprimorando os recursos de geração, distribuição e transmissão, diminuindo as perdas nas linhas de transmissão, trazendo mais flexibilidade e qualidade ao sistema elétrico, reduzindo os investimentos em sistemas convencionais e operações do mesmo.

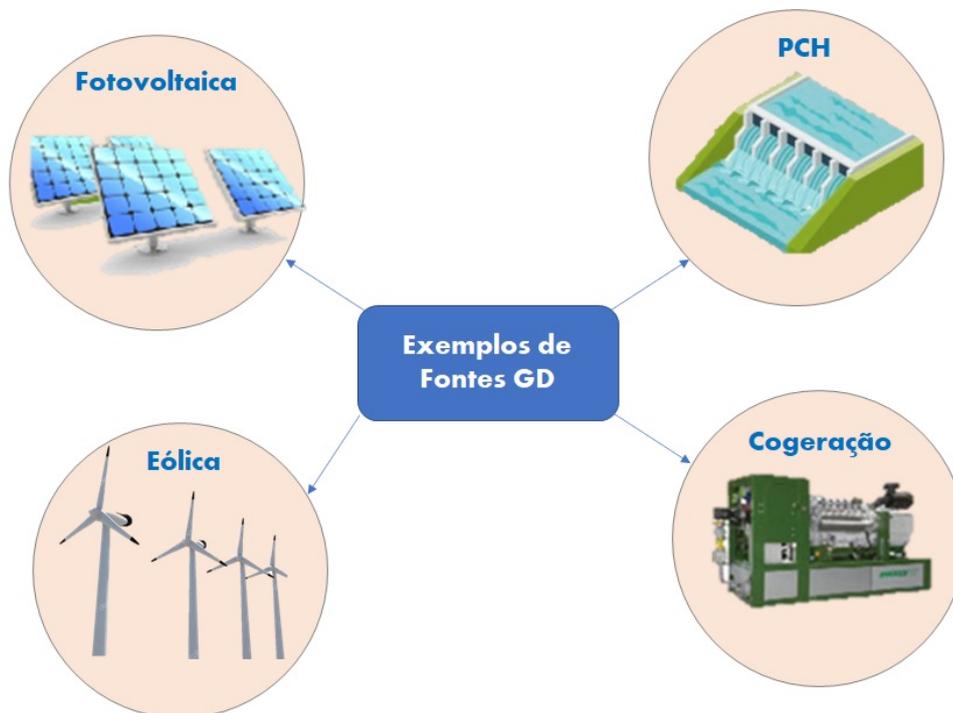
1.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De acordo ANEEL (2015), a geração distribuída (GD) é dada por meio de instalação de unidades geradoras de pequeno porte. Como exemplos de sistema de GD encontramos os sistemas proveniente da geração fotovoltaica, geração eólica, microturbinas a gás, sistemas de cogeração e trigeração qualificados, motores de combustão interna, células a combustível e pequenas centrais hidrelétricas (PCH), estando essas fontes de geração localizadas próximas aos centros de consumo de energia elétrica. Tendo como exemplo o esquemático apresentado na Figura 2.

As instalações GD podem ser de médio ou pequeno porte, podendo estar conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou conectadas por meio de instalações que alimentem diretamente as cargas do consumidor, operando de forma isolada, ou ainda operando nos dois modos com um sistema de anti-ilhamento (SANTOS, 2014). As unidades GD próximas as cargas proporcionam diversos benefícios para o sistema elétrico tais como: menor impacto ambiental, melhoria do nível de tensão que alimenta a carga, atenuação das perdas associadas às linhas de transmissão, aumento da qualidade do fornecimento de energia, entre outros.

No entanto, o aumento da quantidade de GD inseridas no sistema de distribuição pode ocasionar impactos no sistema, tais como: aumento da complexidade de operação da rede, distorções na forma de onda da tensão, dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico, eventual incidência de tributos e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger a rede elétrica, sendo então necessário estudos de planejamento e viabilidade para a implementação da inserção dos sistemas de GD à rede elétrica (ANEEL, 2014, 2019).

Figura 2 - Exemplo de fontes GD



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Dentre os sistemas GD é possível classificá-los conforme a Resolução Normativa (REN) n° 482/2012, que define as aplicações de sistema em microgeração ou minigeração distribuída. Esses sistemas são caracterizados pela produção de energia elétrica partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição. A microgeração distribuída refere-se a sistemas GD com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto a minigeração distribuída a sistemas GD com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2012).

Para implementação dessas estruturas deve-se efetuar a compatibilização com o sistema de compensação de energia elétrica aferindo e efetuando a Resolução Normativa - REN n° 786/2017, atualização da REN n° 687/2015 e REN n° 482/2012, que estabelece as condições gerais para o acesso aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e análise do sistema de compensação de energia elétrica correspondente (ANEEL, 2017a, 2017b).

No ano de 2015 foi previsto uma nova revisão da REN n° 482/2012, tendo como proposta no ano de 2019, o debate de transição para as possíveis alterações, e teve como discussão os seguintes itens: os consumidores que possuem o sistema de minigeração e microgeração permanecerão com o faturamento da regra em vigor até o ano de 2030 e os consumidores que realizarem o pedido da instalação de geração distribuída após a publicação da norma (prevista para o ano de 2020) passarão a pagar o custo da rede pela

tarifa de uso de sistema de distribuição (TUSD Fio B e Fio A) (ANEEL, 2019).

Em 2030, ou quando atingida uma quantidade de GD pré-estabelecida em cada distribuidora, os consumidores passarão a compensar à componente de energia da Tarifa de Energia (TE), e pagarão além dos custos de rede, os outros encargos. Já para os sistemas de geração remota, a proposta prevê dois cenários: os consumidores que já possuem GD continuam com as regras atualmente vigentes até o final de 2030; e os novos pedidos de acesso após a publicação da norma, prevista para 2020, passarão a pagar custos de rede quando utilizada e os encargos referentes a mesma, também compensando a componente de energia da Tarifa de Energia (ANEEL, 2019). Essas propostas estão em discussão e alteram a disposição de investimentos em GD no Brasil.

Assim, diante dessas premissas, é necessária a análise da viabilidade de implementação do sistema de GD junto a um estudo técnico do comportamento dinâmico das fontes que compõem um sistema GD e as diferentes configurações possíveis, para verificar se é possível empregá-las aos distintos recursos expostos, e ponderar qual é a melhor opção a ser escolhida para integração ao sistema elétrico.

Os sistemas de GD estão relacionados ao conceito de redes inteligentes, sendo também designadas como *Smart-Grids*, onde essa tipologia de rede está relacionada com o conceito de microrredes. As microrredes são redes de distribuição que podem operar isoladas do sistema de distribuição, sendo alimentadas por uma fonte de GD, e assim, atuar no controle de um conjunto de cargas, sendo essas fontes plantas de geração de pequeno e/ou médio porte. Já o conceito de redes inteligentes consiste na aplicação de sistemas de automação, tecnologia de informação e comunicação, objetivando o controle e a otimização da rede na qual está aplicada. Esses recursos aumentam a qualidade, confiabilidade e eficiência da rede elétrica, se projetados de forma correta (CHAGAS, 2018).

Dentre os diferentes recursos utilizados para geração de energia, que também podem se enquadrar como GD, está a microturbina a gás, cujo uso tem expandido por ser uma fonte despachável, podendo ser utilizada para sistemas de geração de energia elétrica. As microturbinas geram um alto potencial calorífico podendo fazer o uso deste em aplicações de cargas térmicas, caracterizando os sistemas de cogeração qualificada, aumentando a eficiência do conjunto em que estão inseridas (BARJA, 2006). São geralmente utilizadas em aplicações que requerem alta qualidade no fornecimento de energia, sendo também usadas para locais de difícil acesso (geração isolada), nos casos de supressão de picos de tensão, podendo o sistema ser conectado à rede ou alimentando as cargas locais, sendo utilizadas em aplicações de médias e baixas tensões.

Para os sistemas de microturbina para aplicação de cogeração qualificada, esta exercerá o papel de estrutura geradora principal, e quando a mesma não gerar calor suficiente para atender a demanda térmica uma caldeira auxiliar poderá ser utilizada para suprir a energia térmica necessária. E ainda, é possível adicionar, à central de cogeração,

um chiller de absorção ou adsorção para geração de frio, caracterizando uma planta de trigerção (GIVISIEZ, 2018).

1.2 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diferentes autores vêm propondo estudos de otimização da operação de sistemas de geração de energia, utilizando a cogeração a partir das microturbinas. Diante do contexto abordado, são apresentados os principais trabalhos que contribuíram para fundamentação teórica da pesquisa proposta. Ainda, apresenta-se uma contextualização de sistemas de GD com microturbinas conectadas à rede, abordando os trabalhos que utilizam algoritmos de otimização para potencializar o sistema de geração das microturbinas a gás, principal abordagem do presente estudo.

Em seu estudo Ghadimi, Danandeh e Ghadimi (2012) introduziu ao sistema de operação da microturbina um controlador para regulação da potência de saída da máquina. A microturbina abordada possui configuração de eixo simples para aplicações em modo ilhado. Propôs um controlador do tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID), e para realizar sua sintonia, utilizou o algoritmo de otimização de enxame de partículas, (do inglês: *Particle Swarm Optimization*, PSO). Para o problema de otimização o autor definiu a função objetivo e de suas restrições, em seguida, aplicou o PSO para resolver o problema, e assim, obter uma sintonia factível para o controlador projetado. O sistema foi submetido a simulações com diferentes cargas no domínio do tempo, e os resultados obtidos mostraram a eficiência do controlador proposto. As simulações apresentaram uma precisão aprimorada do desempenho do controlador proposto.

De modo análogo, Mohamadi e Ghadimi (2013) propôs em seu trabalho a inserção de um controlador para regular a potência de saída de uma microturbina a gás para aplicações de geração distribuída no modo ilhado. O objetivo era ter um maior controle durante variações de carga do sistema, uma vez que a potência de saída da microturbina deve ser controlada contra as variações de carga, tanto conectada à rede quanto ilhada. O autor escolheu utilizar um controlador do tipo PID, e para realizar a sintonia dos coeficientes do regulador utilizou um algoritmo de otimização baseado no algoritmo de Programação Evolutiva. Os resultados da simulação são feitos para várias cargas no domínio do tempo e mostram a eficiência do controlador proposto.

Propondo melhorias para aprimoramento do desempenho de microturbinas, o autor Sun *et al.* (2017), apresentou em seu trabalho a modelagem de sistemas combinados de calor e energia para aplicações em microrredes. O autor pleiteou, durante a abordagem da temática, que as microturbinas a gás utilizadas em aplicações de cogeração fossem capazes de estabilizar diante a variação de carga em operação com microrredes, visando o despacho de energia e a regulação de frequência. Buscando a operação ótima da microturbina o autor propôs uma nova estratégia de controle para o controlador de velocidade do tipo

isócrono para promover regulação de frequência, e assim, obter um erro nulo do estado estacionário. O controlador desenvolvido neste artigo baseia-se no controlador *Woodward*, que é gerado ao adicionar um bloco integral ao controle de velocidade. O controlador pode ajustar o ponto de saída de energia de cogeração enquanto realiza a regulação de frequência em torno do ponto de ajuste, promovendo uma maior eficiência do sistema e uma resposta rápida diante das variações do sistema. O intuito desse estudo foi propor um modelo de sistema de cogeração que atendesse diferentes necessidades operacionais de microrredes. A nova estratégia de controle permite realizar a regulação da frequência de erro no estado estacionário nulo.

Zhu *et al.* (2019) em seu trabalho propôs uma estratégia de controle para o sistema de geração MGT através da metodologia do algoritmo de otimização das baleias (do inglês: *Whale Optimization Algorithm-WOA*). Nesse estudo, o autor fez a inserção de um controle de potência em malha fechada para que a microturbina melhorasse a capacidade de resposta à demanda, e ainda, introduziu um limitador de combustível para que abertura da válvula de combustível ficasse limitada a uma determinada vazão para proteger o equipamento contra ameaças de fadiga térmica. Para identificação dos parâmetros do controlador proposto, a metodologia adotada pelo autor foi o desenvolvimento do algoritmo aprimorado de otimização de baleias pela inserção de pesos adaptativos ao algoritmo. Os resultados do desempenho do algoritmo mostraram que o WOA é competitivo com outros algoritmos heurísticos e que o WOA adaptado é mais adequado para problemas de otimização de parâmetros.

Já Paepe *et al.* (2019) propôs em seu estudo uma otimização operacional robusta de uma microturbina a gás típica. Para isso, ele propôs que se deve analisar com precisão o desempenho de cada fator que compõe o sistema, pois as condições operacionais de uma MGT possui um grau incerteza durante seu funcionamento. A partir dessas considerações, o autor apresentou um método de otimização robusta para operação típica de MGT. Para análise do método proposto, utilizou-se o modelo de microturbina *Turbec T100*. O algoritmo de otimização é baseado em incertezas de estrutura clássica de otimização multiobjetivo, vinculado a uma técnica de propagação da incerteza. Nesta abordagem encontrou-se controlador ótimo operando de forma robusto, menos sensível as variações dos parâmetros do projeto e da operação. A otimização determinística resultou máxima eficiência elétrica e potência, destacando que os dois objetivos são conflitantes.

1.3 ANÁLISE DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

Na busca contínua para a melhoria das condições de operação do sistema elétrico, diferentes estratégias têm sido empregadas para o desenvolvimento de novas fontes de geração de energia elétrica e aprimoramento das já existentes; visando à redução de custos, a otimização de sistemas e recursos, melhorando requisitos como confiabilidade dos sistemas

de geração, transmissão e distribuição. Diante destas expectativas almejadas, os sistemas de cogeração apresentam benefícios para o sistema elétrico. Pode-se citar a diminuição de impactos ambientais devido ao aproveitamento da energia térmica proveniente da queima dos combustíveis, o que ocasiona baixa emissão destes gases na atmosfera. Há também a redução das perdas de energia na transmissão e distribuição, uma vez que a energia proveniente de GD e/ou cogeração é gerada no local de consumo, ou bem próximo ao mesmo.

Como forma de contribuição, o estudo apresentado nesta dissertação traz a análise da modelagem matemática e do sistema de controle de uma microturbina a gás, verificando as equações que regem o comportamento dinâmico. Por meio desta análise verificará-se a performance da potência de saída da MGT e dessa forma propõe-se a inserção no sistema para o controle de potência, uma vez que na MGT essa grandeza pode ser mais facilmente controlada pela geração elétrica da MGT ser caracterizada como uma fonte despachável.

O intuito da inserção do controlador de potência da MGT é melhorar a capacidade da geração elétrica do sistema, para que mesmo ante as variações que possa vir a ocorrer durante o desempenho dinâmico da máquina este seja capaz de fazer que o sistema de geração opere de forma eficaz, reduzindo-se ao máximo as perdas do processo. Desse modo, propôs um algoritmo de otimização para sintonia do controlador de potência a fim de potencializar a eficiência de geração energética da mesma, e diminuir ou reduzir os erros de estado estacionário entre a potência nominal de operação da máquina e a potência gerada por meio da dinâmica da MGT.

Ainda, propõe-se um modelo simplificado para execução do algoritmo de otimização do controlador de potência da MGT, sendo o modelo desenvolvido validado por meio de simulações computacionais. O objetivo do modelo simplificado será diminuir o tempo computacional de simulação.

Mediante os resultados obtidos, será possível ponderar as características do modelo de uma microturbina, para assim, explorar sua aplicabilidade de forma otimizada em sistemas de cogeração e geração distribuída. Este estudo demonstra a importância do conhecimento da planta e dos projetos de controle do sistema para possíveis aplicações, bem como de se averiguar novas metodologias de otimização que aprimorem a eficiência e o desenvolvimento do sistema.

1.4 OBJETIVOS

Neste tópico serão apresentados os objetivos dessa dissertação, estes foram divididos em objetivos gerais e específicos, os quais serão descritos nas seções subsequentes, expondo-se de modo ecumênico e os escopos principais a serem desenvolvidos ao longo deste estudo.

1.4.1 Objetivos gerais

Diante do contexto descrito anteriormente, esta pesquisa tem como objetivo a análise do comportamento dinâmico de uma microturbina a gás, a partir da aplicação de um algoritmo de otimização para potencializar seu sistema de geração, a fim de então presumir as condições de operação satisfatórias para aplicação em sistema de geração distribuída e cogeração.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Realizar o estudo da modelagem dinâmica de microturbina e de geradores síncronos de ímãs permanentes;
- b) Realizar o projeto de controle do sistema de eletrônica de potência para conexão de microturbina à rede elétrica e o dimensionamento dos componentes referentes ao sistema;
- c) Elaborar um sistema em diagramas de blocos e com funções de transferência que representem a MGT conectada à rede para avaliar e validar a operação do sistema por meio de simulações;
- d) Propor um algoritmo de otimização que realize a sintonia do controlador de potência mecânica da microturbina;
- e) Realizar a simplificação do sistema de simulação para a aplicação eficiente de um algoritmo de otimização, a fim de levantamento da potencialidade da aplicação de MGT conectada à rede;
- f) Realizar simulações computacionais para verificação do funcionamento de todas as topologias estudadas e abordadas neste estudo.

1.5 PUBLICAÇÃO DECORRENTE DA PESQUISA

SILVA, W. N. ; OLIVEIRA, J. G. ; DIAS, B. H. ; OLIVEIRA, L. W.. Gas microturbines for distributed generation system. In: **IEEE Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)**, 2019, Santos, SP.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O presente capítulo apresentou a introdução com a contextualização do estudo proposto, a motivação de realização do mesmo e uma breve revisão bibliográfica. Por fim, foram apresentados os objetivos gerais e específicos.

Nos capítulos 2 e 3, será apresentada a fundamentação teórica para a realização deste trabalho. No capítulo 2, serão introduzidos os fundamentos gerais deste estudo como: conceitos de cogeração/trigeração, topologias de operação da microturbina, modelagem matemática e dinâmica da microturbina. Já no capítulo 3, será apresentado o sistema de eletrônica de potência para conexão à rede elétrica.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta explorando os procedimentos para a realização das análises deste trabalho. Primeiro, será apresentada a modelagem da microturbina modelo C30, o sistema melhorado da microturbina e ainda a fundamentação do algoritmo de otimização SIA com a proposta de aplicação com um modelo de simulação simplificado, prosseguindo com as considerações do sistema de eletrônica de potência.

O Capítulo 5 traz as simulações e os resultados derivados da aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior, seguidos de análise dos mesmos.

2 FUNDAMENTOS GERAIS

Como descrito no capítulo anterior, este trabalho tem como propósito o estudo da modelagem de microturbinas a gás para possíveis aplicações em sistemas de cogeração e geração distribuída, por meio da utilização de algoritmos que otimizem a potência de geração da MGT. Desse modo, o presente capítulo aborda os fundamentos teóricos e aspectos gerais dos elementos que compõem o sistema a ser analisado, apresentando inicialmente os conceitos de cogeração e trigeração, seguindo-se dos fundamentos da microturbina a gás.

2.1 COGERAÇÃO E TRIGERAÇÃO

No contexto de geração distribuída (GD), a aplicação de cogeração qualificada e trigeração tem se expandido como mais uma possibilidade para a produção descentralizada de energia elétrica, elevando os índices de eficiência operacional (BERTINOTTI, 2016).

Proveniente dos sistemas térmicos, a cogeração e trigeração também é designada respectivamente como *Combined Heat and Power (CHP)* e *Combined, Cooling, Heat and Power (CCHP)*. Esses sistemas foram desenvolvidos visando o aumento da eficiência da geração de energia a partir dos sistemas térmicos convencionais ocasionando um menor impacto ambiental e uma maior eficiência energética.

Cogeração é definida como produção simultânea e de forma sequenciada de duas ou mais formas de energia a partir da utilização de um determinado combustível, geralmente na forma de eletricidade e calor. Essa aplicação se dá pela utilização do calor não convertido em energia mecânica, ou seja, emprega as perdas sob a forma de energia térmica para uma aplicação secundária (ANDREOS, 2013). Já os sistemas designados como trigeração podem ser considerados um sistema de cogeração alargado, onde a cogeração é interligada a um ciclo de absorção para produção de frio a partir da energia térmica. Portanto, haverá a produção simultânea de energia elétrica, calor e frio.

O princípio termodinâmico desses processos baseia-se na queima de combustíveis para a produção de vapor e conseqüentemente de energia. No entanto, grande parte da energia proveniente do combustível é transformada em calor e perdida no meio ambiente. No processo convencional apenas 1/3 da energia do combustível é convertida em energia elétrica, sendo o restante dissipada em forma de calor. Para aumentar a eficiência energética faz-se o uso de sistemas de recuperação de calor gerando uma maior eficiência no processo de conversão energética, onde 4/5 da energia do combustível é transformado em energia utilizável (SILVA; COSTA, 2012).

Como pode ser observado, existem diversas vantagens provenientes da aplicação de unidade de cogeração e trigeração. Contudo, é necessário efetuar estudos para certificar a sua viabilidade econômica, tornando fundamental uma análise detalhada quanto ao

funcionamento e implementação desses sistemas.

A análise de viabilidade econômica deve visar a redução dos custos de implementação e manutenção, além de propiciar um melhor desempenho para geração final da energia. Caso não pondere esses fatores na elaboração da solução do problema considerado poderá ocorrer o encarecimento das operações das unidades de geração. Já que esses sistemas dependem dos preços da eletricidade e do combustível utilizado para o funcionamento. Nessas condições a aplicação desses sistemas deve ser projetada de modo a minimizar os gastos totais com energia e maximizar o lucro do processo, otimizando o sistema. Para realizar o estudo da viabilidade econômica de aplicação recomenda-se utilizar os métodos de otimização, como apresentado em (SALES, 2008).

2.1.1 Aplicações de sistemas de cogeração e trigeração

As unidades de cogeração e trigeração aumentam o rendimento da produção energética em relação aos sistemas térmicos convencionais, sendo possível empregá-los em processos distintos onde há uma necessidade simultânea da produção de energia elétrica e térmica. O alto índice de eficiência energética é proporcionado, pois não há o desperdício de energia térmica, sendo utilizada em processos industriais, como secagem, aquecimento, cozimento, destilação entre outras atividades industriais e comerciais. No Brasil, estes sistemas vêm sendo utilizados em diferentes setores como: nas indústrias de modo geral, principalmente na química e petroquímica, usinas de açúcar e etanol, hospitais, hotéis e edifícios entre outros (ABDOLLAHI; VAHEDI, 2004; ASSIS *et al.*, 2012).

A viabilidade de aplicações de unidades de cogeração no setor industrial ocorre em função do elevado índice de utilização de vapor e de energia elétrica para execução das atividades diárias. Assim, ao aplicar esses sistemas se obtém um aumento do rendimento da máquina térmica e o aumento da geração de potência resultando em um rendimento total maior em relação aos sistemas térmicos convencionais, proporcionando menores custos operacionais e elevando a eficiência do conjunto em operação (SALES, 2008; SILVA; COSTA, 2012).

Já o emprego destes sistemas no setor terciário ocorre em aplicações em hotéis, shoppings, edifícios comerciais, supermercados e hospitais. A aplicabilidade dos sistemas de cogeração e trigeração é caracterizadas pela geração de energia elétrica para iluminação local, ar condicionado central, ar quente, aquecimento de água para diferentes utilizações, tais como: lavanderias, cozinhas, esterilização e etc. A viabilidade prática no terciário está vinculada ao modo de operação e aos preços relativos do combustível e da eletricidade (FRANCA; CASEIRO, 2007; SALES, 2008).

A aplicação também pode ocorrer em aterros sanitários, em plantas de tratamento de esgoto, onde se utiliza o gás metano, criado através dos digestores anaeróbicos para gerar eletricidade e calor, em plataformas *onshore* e *offshore*, em digestores onde o gás

metano capturado através de digestores e serve de combustível para operação da máquina primária do sistema de cogeração (HEIMER, 2015).

As principais vantagens de implementação das unidades de cogeração e trigeração são a geração da economia de energia primária na produção energética, a redução de emissões de poluentes e promovem a diversificação matriz energética. Já as limitações de empregabilidade desses sistemas são: a necessidade de efetuar estudos de viabilidade econômica, investimento inicial elevado, os lucros estão relacionados ao do preço da eletricidade e do combustível utilizado (FRANCA; CASEIRO, 2007).

2.1.2 Tecnologias usuais em sistemas de cogeração e trigeração

Nesta subseção é apresentada de modo sucinto os princípios de operação e a funcionalidade das tecnologias elementares utilizadas nos sistemas de cogeração e trigeração, estas serão apresentadas nas subseções subsequentes nomeadas cogeração e trigeração respectivamente.

2.1.2.1 Cogeração

Os principais componentes da planta de operação do sistema de cogeração são apresentadas de forma sucinta:

- a) Turbinas: é uma máquina rotativa que opera em regime permanente, cuja função é gerar trabalho ou potência, transformando a energia química do fluido de operação em trabalho mecânico sobre o eixo. O trabalho realizado na turbina é ocasionado pela diminuição da pressão do fluido de trabalho. Esta poderá ser do tipo a vapor ou a gás, ou operando em ciclo combinado (onde há utilização os dois tipos de turbina para geração de energia térmica e elétrica) desempenhando o papel de componente principal;
- b) Turbina a Gás: é composta por um compressor e uma câmara de combustão. O ar é comprimido pelo compressor, o qual é injetado junto ao combustível na câmara combustão. Nesse processo a temperatura se eleva e a mistura dos gases se expande sobre as pás da turbina gerando a rotação mecânica do eixo;
- c) Turbina a Vapor: é composta por uma fonte de calor e a caldeira de vapor. A turbina utiliza o vapor que é produzido numa caldeira de alta pressão. Este vapor a alta pressão entra nos bocais das pás estacionárias, destas ocorrendo o escoamento do vapor pelas pás móveis, o que gera uma força sobre elas, ocorrendo desse modo a conversão da energia térmica do vapor em trabalho mecânico útil. Este trabalho move o eixo da turbina;

- d) Caldeiras de Recuperação de Calor: são posicionadas na saída das turbinas a gás para aproveitar o calor existente nos gases de exaustão, e assim gerar o vapor por meio das trocas térmicas;
- e) Ciclo Combinado: esse sistema é caracterizado pela combinação de uma turbina a gás e uma turbina a vapor, com uma caldeira de recuperação de calor entre elas. A turbina de gás produzirá a eletricidade e o vapor em alto índice de entalpia. Logo, este é expandido na turbina de vapor para gerar mais eletricidade e vapor com menor índice entalpia.

2.1.2.2 *Trigeração*

A configuração da planta de um sistema de trigeração é análoga ao sistema de cogeração quanto à geração térmica e eletricidade (VELHO; PARISE; PINO, 2020). A diferença entre eles se dá no processo trigeração, em que são utilizados os motores de combustão interna *chillers* de adsorção ou absorção para geração de frio. De modo sucinto a funcionalidade dos principais componentes da planta de trigeração são:

- a) Motor alternativo de Combustão Interna: são máquinas térmicas que convertem a energia química proveniente da queima do gás em energia mecânica. Essa reação é caracterizada pela combustão de uma mistura de ar e combustível que ocorre dentro do cilindro e acontece por meio de ciclos termodinâmicos, o ciclo de *Otto* (gasolina) ou o ciclo de Diesel (óleo-diesel). A mistura ar-combustível gera um aumento de pressão resultante da combustão desses gases o que faz que o motor rotacione, esse mecanismo constituído por pistão, biela e virabrequim que transforma a energia térmica em energia mecânica. O movimento alternativo do pistão dentro do cilindro é transformado em movimento rotativo através da biela e do virabrequim (BRUNETTI, 2018; MARTINS, 2006);
- b) Unidades produtoras de água refrigerada: designado também como *chiller*, é uma instalação térmica que converte calor em frio, utilizando como fonte o calor inutilizado. Tem como função arrefecer água ou outro líquido para variadas aplicações. O processo de resfriamento ocorre por meio de um ciclo termodinâmico que pode ser classificado como *chiller* de absorção e adsorção;
- c) *Chiller* de absorção: o *chiller* de absorção pode ser dividido como: *chiller* de compressão ou elétrico e *chiller* de absorção. O *chiller* de compressão utiliza um compressor mecânico, geralmente acionado por um motor elétrico, de modo a elevar a pressão em determinada fase do ciclo termodinâmico do sistema. Já o princípio de operação dos *chiller* de absorção é que este se baseia em um compressor termoquímico. A produção de água gelada se dá por meio de uma fonte de calor junto à uma solução química como, por exemplo, o cloreto de sódio ou brometo de lítio. Os *chillers*

de absorção subdividem-se em dois tipos: em um processo de queima direta, cujo processo é obtido queimando diretamente um combustível, tipicamente gás natural. e o chiller de queima indireta, onde o calor necessário é fornecido na forma de vapor de baixa pressão, água quente ou de um processo de purga quente (CEETA, 2013);

- d) *Chiller* de adsorção: este equipamento se dá por uma fonte reversível, esse processo é resultante do acúmulo de uma substância gasosa ou dissolvida na superfície de um corpo, assim, no momento em que as moléculas da substância são fixadas, estas liberam energia, caracterizando um processo exotérmico. Desse modo, a diferença entre o *chiller* de adsorção para o *chiller* de absorção se dá pelo que no sistema de absorção o fluido mistura-se com o adsorvente para formar uma solução. O princípio químico de ação dos *chillers* de adsorção é gerado pela água como refrigerante e um gel de sílica como adsorvente. Pode-se utilizar também como adsorvente o carvão ativo ou resina sintética em processos industriais, e para purificar a água ou para secar (com a adsorção da água) (CEETA, 2013).

Dentre as diferentes tecnologias utilizadas como fonte primária em um sistema de cogeração tem as microturbinas a gás, cujo princípio de funcionamento é análogo às turbinas a gás, só que estes possuem dimensões menores o que propicia a aplicações em sistemas de cogeração em geração distribuída. O estudo deste trabalho fará à vista da aplicabilidade das microturbinas gás e o seu princípio de funcionamento, o qual será apresentado na próxima seção.

2.2 MICROTURBINAS A GÁS

A microturbina a gás é definida como uma máquina rotativa que opera em regime permanente, cuja função é gerar trabalho ou potência, transformando a energia de escoamento através da expansão dos gases em trabalho mecânico. O trabalho mecânico movimenta o eixo de rotação que está acoplado a um gerador elétrico, o qual converterá a potência mecânica em potência elétrica. Podendo o fluido de operação ser de diferentes tipos, tais como: propano, gás natural, biogás, diesel, biodigestores e álcool entre outros. Podendo o fluido estar em seu estado líquido ou gasoso (RAUBER, 2016). A escolha do fluido deve estar condicionada ao tipo de aplicação e a viabilidade econômica.

Denomina-se como microturbina uma turbina de pequeno porte, que é uma fonte de geração distribuída com alto potencial para geração de energia elétrica em uma faixa de potência em torno de 25 kW a 1 MW, possuindo a capacidade de operar com diferentes tipos de combustíveis, sejam estes renováveis ou não (COSTA, 2010). Podendo ser usadas em aplicações que exigem alta qualidade no fornecimento de energia, sendo também utilizadas para locais de difícil acesso (sistemas isolados), nos casos de supressão de picos

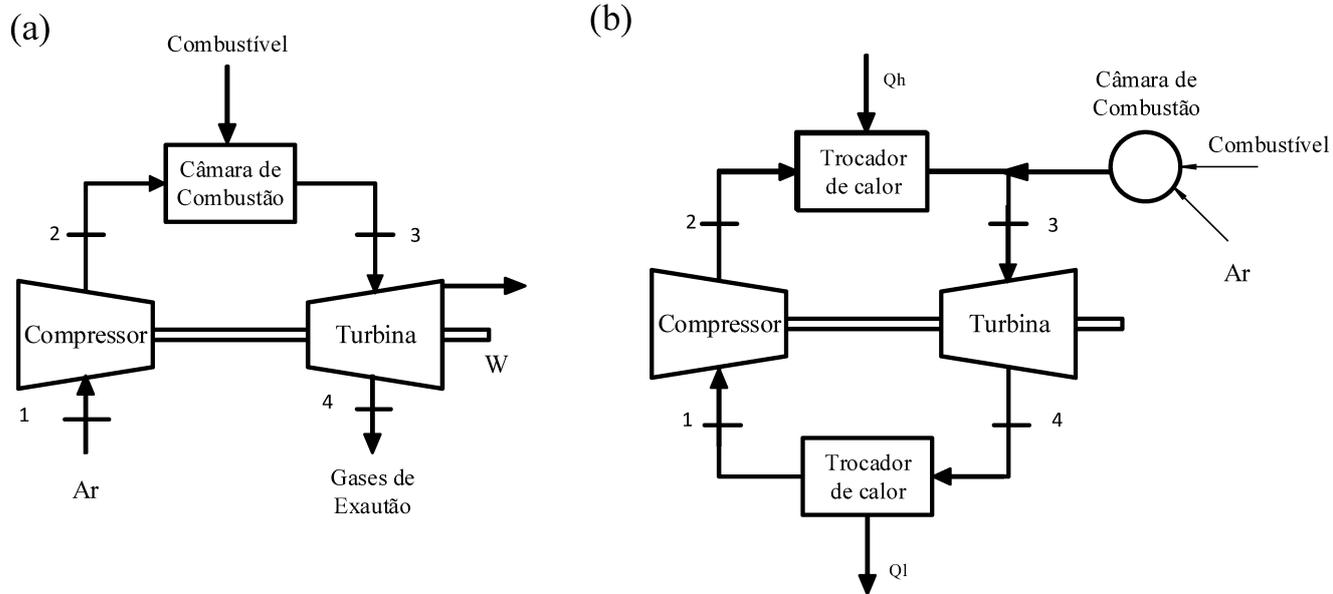
de tensão e ainda para produção combinada de energia elétrica e calor (MALDONADO, 2005; RAUBER, 2016).

Os principais componentes de uma microturbina a gás são: o compressor, a câmara de combustão, a turbina, o gerador elétrico e o trocador de calor (quando utilizado para aplicações térmicas). A quantidade de compressores, trocadores de calor e a configuração do eixo podem variar. De maneira concisa a funcionalidade de cada componente é:

- a) Compressor: é o local onde se inicia o primeiro estágio de trabalho da microturbina, é uma máquina operatriz que tem como função básica elevar a pressão (e temperatura) do fluido refrigerante; o fluido é admitido em uma câmara isolada do meio exterior captando o ar da atmosfera, e logo após o volume do ar é gradualmente comprimido, caracterizando a compressão. O rotor irá transferir a energia cinética para o fluido e o estator transformará essa energia em entalpia, aumentando gradativamente a pressão do fluido, para assim fornecer a vazão de ar comprimido necessária para operação do segundo estágio. Para microturbinas a gás, geralmente se utiliza compressores do tipo axial ou radial. A escolha destes está condicionada à capacidade de geração da turbina (FARIA, 2009);
- b) Câmara de Combustão: caracteriza o segundo estágio de operação, sendo o local onde se dá a combustão proveniente da mistura do ar com combustível, aumentando a energia interna do fluido de trabalho, através da queima do mesmo após a mistura com o combustível, liberando o calor para que o ar seja expandido e acelerado contra as paletas da turbina. Esse estágio compõem a geração de energia térmica do sistema. A quantidade de ar e de combustível deve ser estabelecida de forma correta para que o processo químico ocorra de modo eficiente, pois a vazão inadequada pode ocasionar perda de potência no sistema (DALTRO, 2013);
- c) Turbina: onde ocorre o terceiro estágio de operação, a turbina irá retirar a energia dos gases quentes que deixam a câmara de combustão e os expandir para uma pressão e temperatura mais baixa. Assim, a expansão do fluido faz com que a mesma comece a girar, fornecendo a potência para acionar o compressor e o gerador elétrico, que está acoplado ao conjunto compressor-turbina (COSTA, 2010);
- d) Gerador elétrico: é o componente responsável por converter a energia mecânica proveniente da turbina em energia elétrica;
- e) Trocadores de calor: são os elementos utilizados para aproveitamento da energia térmica dos gases, aumentando a eficiência total do sistema, pois diminuem a quantidade necessária de combustível no processo de geração e a descarga no meio ambiente.

Quanto à configuração de funcionamento microturbina, tem que esta pode operar tanto no modo aberto quanto em modo fechado, como visto na Figura 3.

Figura 3 - Configuração básica de uma MGT de ciclo aberto e ciclo fechado

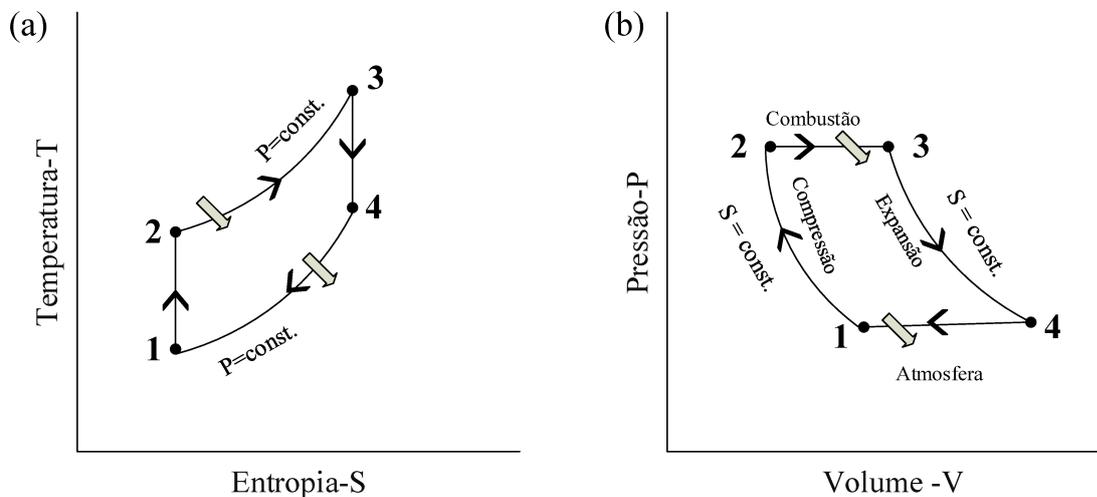


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

No sistema de ciclo aberto o ar entra através da câmara de combustão, sendo então misturado com combustível. Desse modo ocorrerá a combustão, resultando em gases de combustão a uma temperatura elevada. Estes gases se expandem por meio da turbina e são, em seguida, descarregados nas vizinhanças. Já no ciclo fechado, o fluido receberá um aporte energético por transferência de calor de uma fonte externa, e assim, o gás deixará a turbina e passará pelo trocador de calor, onde será resfriado antes de operar novamente no ciclo (MORAN; SHAPIRO, 2006).

As microturbinas operam em um ciclo termodinâmico de calor, designado como ciclo *Brayton*. De forma simplificada, este ciclo opera basicamente em quatro estágios (FORNAZARI FILHO, 2018), como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Ciclo de Brayton ideal a) T x S e b) P x V



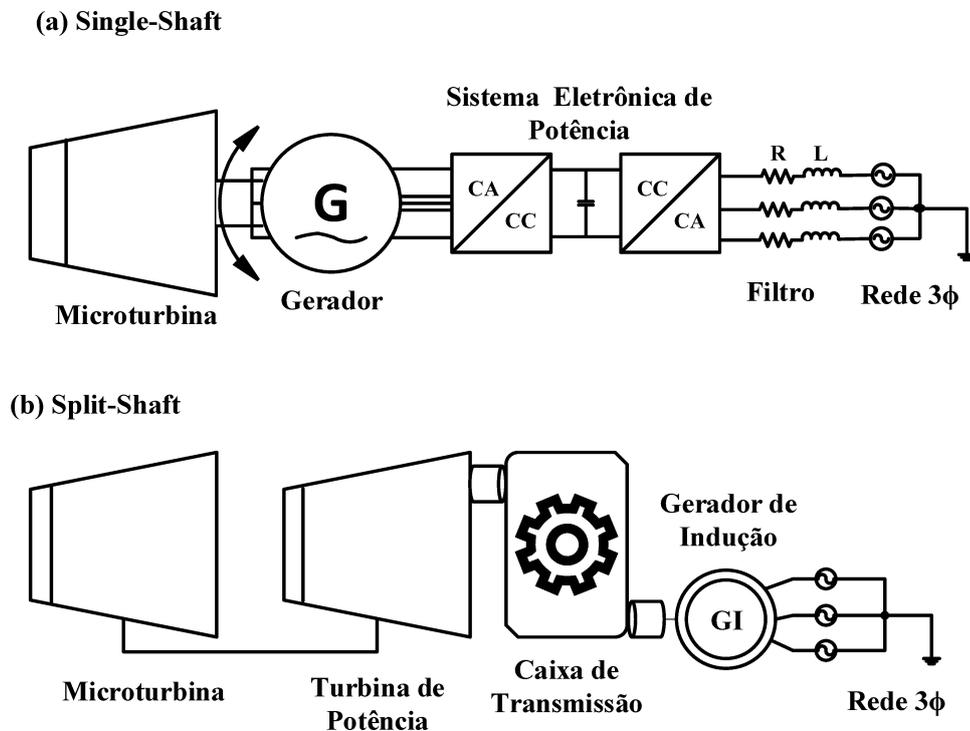
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os quatro estágios podem ser resumidos de acordo com o estudo do autor Fornazari Filho (2018):

- No primeiro estágio, o ar entra no compressor, onde ocorre a compressão a entropia constante, ocasionando o aumento de temperatura, pressão e da entalpia;
- No segundo estágio, o ar comprimido é direcionado para a câmara de combustão, onde é misturado com o fluido de operação. A queima do composto ocorrerá aproximadamente de forma isobárica;
- No terceiro estágio, os gases a alta pressão e alta temperatura saem da câmara de combustão e se expandem ao passar pela turbina. Na medida em que o fluido exerce trabalho sobre as palhetas da turbina haverá uma redução da pressão e da temperatura dos gases, ocasionando a rotação mecânica do eixo;
- O quarto estágio representa a transferência de calor do fluido para o ambiente (ciclo-aberto) ou para o trocador de calor, reiniciando o ciclo quando o sistema operar no ciclo fechado.

A microturbina pode ser classificada de acordo com o posicionamento do seu eixo como *Single-Shaft* ou *Split-Shaft*, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Classificação de microturbinas quanto à configuração dos eixos



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Analisando-se a Figura 5 (a), tem-se a configuração de operação em estágio simples, a qual é caracterizada por apenas um eixo de conexão, denominado de *Single-Shaft*. Essas microturbinas são caracterizadas por operarem em altas velocidades de rotação, geralmente, entre 90.000 e 120.000 rpm (COSTA, 2010). Esse tipo de configuração propicia uma velocidade e carregamento constante, como é o caso da aplicação em sistemas de geração elétrica (MALDONADO, 2005). Onde o compressor, a turbina e o gerador elétrico estarão conectados no mesmo eixo, possuindo a mesma velocidade de operação.

As turbinas *Single-Shaft* são utilizadas para aplicações de geração de energia elétrica e acionamentos mecânicos. Para a aplicação de geração de energia elétrica a turbina é conectada a uma máquina síncrona de ímãs permanentes e para realizar a conexão a rede elétrica utiliza-se conversores estáticos, uma vez que a velocidade do conjunto microturbina-máquina elétrica é alta sendo necessário compatibilizar as características de operação da máquina com as da rede elétrica ou carga (RAUBER, 2016).

Já as turbinas com a configuração em múltiplos estágios, que pode ser observada na Figura 5 (b), designada como *Split-Shaft*, são utilizadas para aplicações em que se requer a mesma frequência de rotação da turbina e do sistema no qual será conectado. Esse tipo de configuração trabalha a baixas rotações, normalmente entre 3.600 a 10.800

rpm. Possui duas turbinas, uma para acionar o compressor e outra para acionar o gerador elétrico, definida como turbina de potência. Essa não está conectada no mesmo eixo que o compressor. A turbina de potência tem velocidade menor que a turbina que acionará o compressor tendo como aplicação em sistemas de geração de energia elétrica e em propulsores de veículos de transporte (RAUBER, 2016).

Quanto à utilização de turbinas do tipo *Split-Shaft* para geração de energia a configuração de conexão com a rede elétrica se dá modo distinto das turbinas *Single-Shaft*, por essas possuírem operação em baixa velocidade de rotação sendo possível utilizar uma caixa de transmissão de engrenagem, a qual terá com função estabelecer a relação entre a rotação e o torque de entrada e de saída entre a turbina de potência e o gerador de indução trifásico. Este por sua vez pode ser conectado diretamente a rede elétrica, onde a tensão e a frequência do gerador, ficam definidos pela rede no qual está interligado, que define a frequência e mantém a regulação da tensão (WU, 2009).

As vantagens da utilização de microturbinas se dão ao passo de apresentarem tamanho e peso menores por unidade de potência, baixa emissão de gases poluentes e de ruído, flexibilização na utilização dos combustíveis, menor número de partes móveis, alta durabilidade e baixa manutenção. No entanto, apresentam baixa eficiência térmica, aproximadamente 30%, sendo ideal a utilização de ciclo combinados em sistemas de cogeração, para que esta aumente de maneira relevante o seu rendimento. Entretanto, possuem custo elevado quando comparadas com máquinas equivalentes de mesma potência (COSTA, 2010).

A operação de uma microturbina é dada em uma produção de alto de calor, sendo este então, muitas vezes, aproveitado na forma de geração combinada de energia elétrica e calor. Esse processo faz o aproveitamento dos gases quentes de escape na saída do exaustor da microturbina e assim, ocasiona uma melhoria da eficiência térmica do sistema elevando o rendimento de 30% para 80% (COSTA, 2010; MALDONADO, 2005).

A proporção que a aplicabilidade do uso de microturbina a gás vem se expandindo é necessário analisar algumas características quando a mesma está conectada à rede elétrica, como: a estabilidade transitória do sistema, os harmônicos e a qualidade de energia. Assim, torna-se essencial o estudo desta aplicação quanto à operabilidade e o impacto nos sistemas de energia.

Devido aos fatores citados anteriormente alude-se a modelagem da microturbina e os aspectos técnicos para conexão à rede de distribuição. O modelo dinâmico de microturbina a gás já vem sido discutido em trabalhos anteriores, nos quais são abordados a dinâmica de operação e a metodologia de controle para sistemas conectados à rede, isolados ou com anti-ilhamento (RAUBER, 2016).

O primeiro modo é o conectado à rede, onde o conjunto é ligado ao sistema de distribuição de energia elétrica, para então alimentar as cargas locais, permitindo assim,

um fluxo bidirecional entre a concessionária e o local onde é produzida. Neste modo deve haver um controle das potências ativa e reativa injetadas na rede. O segundo modo de operação é o isolado, onde não há conexão com a rede, o sistema abastecerá diretamente as cargas. Esse modo de aplicação propicia um controle maior da frequência e da tensão do sistema.

Ressalta-se que diante das premissas abordadas nesta seção, que ao utiliza-se microturbinas a gás para geração de energia elétrica acopladas a uma máquina elétrica, esta funcionará ora como motor, ora como gerador. Inicialmente a máquina elétrica será alimentada pela rede elétrica ou por um banco de baterias e então, operará como motor e este fará com que a microturbina entre em funcionamento e ao complementar um ciclo de funcionamento e atingir um determinado percentual de velocidade no qual o sistema seja capaz de operar de maneira íntegra, deste modo a máquina elétrica então, operará como gerador fornecendo energia ao conjunto no qual estiver conectado.

2.2.1 Modelagem da microturbina

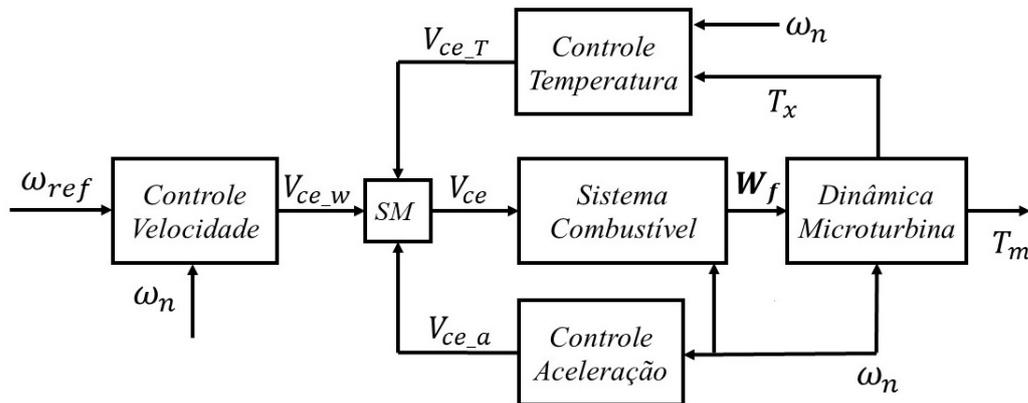
O modelo mais utilizado para modelagem das turbinas e microturbinas é o desenvolvido por Rowen (1983). O estudo do autor apresentou uma proposta simplificada para análise da resposta da máquina quando se encontra ligada a grandes sistemas de potência. Tal modelo geralmente é aplicável para máquinas de 18 MW até 106 MW que funcionam a uma rotação constante, sendo válido em um intervalo de 95 e 107% da velocidade angular. Esse modelo faz alusão a modelagem da máquina quando esta está operando em regime permanente, apresentando os controles de operação da mesma como: controle de velocidade, temperatura e aceleração, controle dos limites inferior e superior para a vazão de combustível. Pode ser adaptado para diferentes aplicações, e para ajustar a operação da microturbina às características exigidas pelo sistema a ser projetado como sistemas com velocidade variável, aos sistemas de potência, características do tipo de gerador utilizado entre outras (MALDONADO, 2005; RAUBER, 2016).

No Diagrama 1 é possível analisar o diagrama em blocos do funcionamento da microturbina proposto por Rowen (1983). O controle de velocidade atuará sobre as conjunturas da carga, podendo este ser tipo isócrono ou *droop*; já o controle de temperatura tem como função limitar a potência de saída e o controle de aceleração tem a função de evitar que não ocorra um excesso de velocidade no rotor, e para que esta não opere acima do estipulado, diminuindo os esforços mecânicos durante o arranque. Esses controladores atuam no bloco de seletor mínimo (SM), no qual saída será o menor valor entre as três entradas, cuja função é manter a vazão de combustível no nível adequado para o funcionamento do conjunto turbina-gerador (ROWEN, 1983).

Cada sistema de controle e dinâmica de operação da microturbina será discutido nas próximas seções, a descrição do estudo da modelagem e controle microturbina apresentada

neste capítulo foi baseado na análise dos trabalhos de Costa (2010), Rauber (2016) e Rowen (1983).

Diagrama 1 - Sistema em blocos simplificado do funcionamento da MGT



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

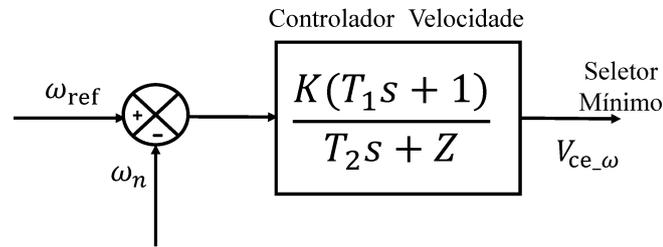
No Diagrama 1 as variáveis em questão representam: ω_{ref} a velocidade nominal de referência da microturbina; ω_n a velocidade angular realimentada da máquina; V_{ce_w} , V_{ce_a} , V_{ce_T} são os sinais provenientes dos respectivos controladores da turbina que atuarão no seletor mínimo (SM); V_{ce} é o sinal que atua no sistema de combustível; W_f é demanda de combustível; T_m é o torque mecânico e T_x a temperatura de exaustão.

2.2.2 Controle de velocidade

O controlador de velocidade da microturbina pode ser classificado como controle isócrona ou controle *droop*, que a escolha de um desses controladores será de acordo com a aplicação requerida. Para aplicações dos sistemas conectados à rede, utilizará-se o regulador do tipo *droop*, já para os sistemas isolados aplica-se o modo de controle isócrona. A funcionalidade do controlador de velocidade é para que não haja oscilação de potência diante das mudanças de carga e de possíveis instabilidades na velocidade da turbina (RAUBER, 2016).

O controlador utilizado para regular a velocidade pode ser do tipo avanço e atraso de fase ou ainda um controlador Proporcional, Derivativo e Integrativo (PID). A representação do esquemático do controle de velocidade é a apresentada no Diagrama 2, cujo diagrama de blocos apresenta a configuração de entrada e saída e a função de transferência respectiva do sistema conforme é apresentado no Diagrama 2.

Diagrama 2 - Controle de velocidade



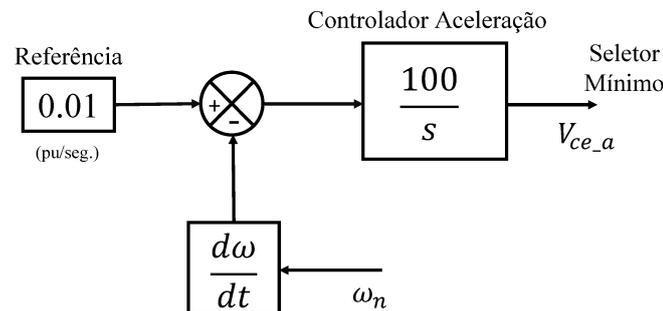
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

em que: K é o ganho do controlador, T_1 e T_2 são respectivamente as constantes de tempo referentes ao controlador de avanço e atraso e Z indica o modo de operação do regulador (isócrono ou *droop*) e V_{ce_w} o sinal do controlador de velocidade.

2.2.3 Controle de aceleração

O controle de aceleração, cuja representação é dada no Diagrama 3, mostra a relação de entrada e saída e a função de transferência respectiva deste sistema. Este controlador tem como intuito limitar a taxa de aceleração do rotor, para que não haja uma sobre-velocidade do mesmo, e conseqüentemente reduzir os esforços mecânicos durante a partida do sistema. Portanto, este controle não atuará por algum tempo após a partida, quando o sistema atingir o regime permanente.

Diagrama 3 - Controle de aceleração



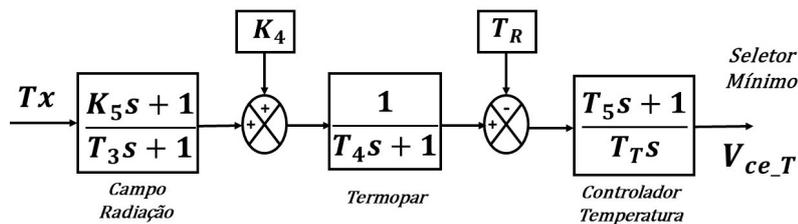
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

2.2.4 Controle de temperatura

O controle de temperatura tem a função de limitar a potência de saída da microturbina a uma dada temperatura de combustão, já previamente estabelecida, independente do combustível utilizado e da temperatura ambiente em que a microturbina se encontra.

A temperatura dos gases da turbina é medida com auxílio de um termopar e associada a seu revestimento de proteção contra a radiação. Primeiramente, o sinal da temperatura de saída da turbina passa por um ganho e pela dinâmica do escudo de radiação. Em seguida, passa pela dinâmica do termopar que representa o tempo de resposta da leitura da temperatura. Assim, inicia o controle de temperatura, afere o erro em relação a referência de temperatura e passa pelo controlador que tem atuação integral, conforme visto no diagrama de blocos apresentado no Diagrama 4.

Diagrama 4 - Controle de temperatura



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

onde, K_4 e K_5 são as constantes de ganho e T_3 é constante de tempo associada ao sistema de radiação. Já o termo T_4 é uma constante de tempo associado ao termopar, e T_5 é a constante de tempo associada ao controle de temperatura, sendo T_T a taxa de integração do controle de temperatura e V_{ce_t} o sinal de atuação o controle de temperatura.

Como pode ser visto no Diagrama 4, a saída do conjunto escudo de radiação e termopar será comparada a uma temperatura de referência (T_R), o sinal gerado será a entrada do controle de temperatura do sistema, para que a temperatura da turbina sempre esteja dentro dos limites de operação. Quando a diferença entre as temperaturas comparadas for negativa, o controle de temperatura atuará limitando a potência da microturbina e consequentemente o fluxo do combustível.

2.2.5 Seletor mínimo

O Seletor Mínimo (SM) é proveniente das três entradas geradas pelos sistemas de controle de velocidade, aceleração e temperatura do sistema. Esse bloco tem a função de definir a prioridade de funcionamento dos sistemas de controle, para determinar a vazão de combustível necessária para que o sistema funcione adequadamente.

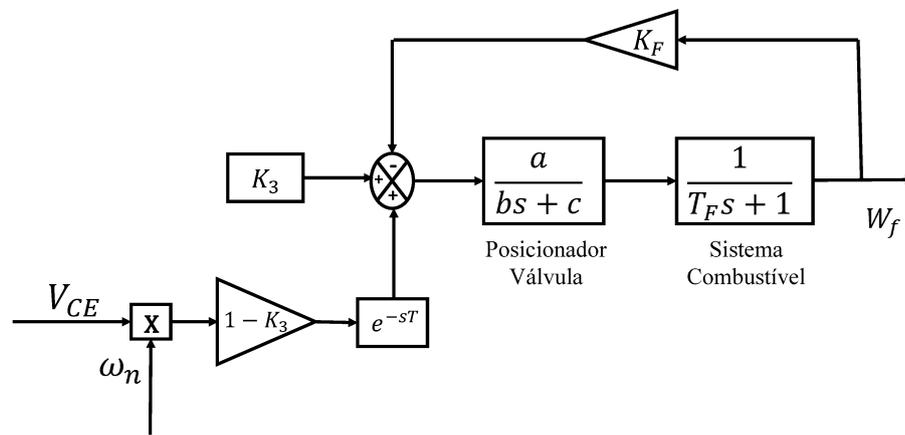
- O primeiro controle a atuar será o controle de aceleração quando o sistema ainda está no regime transitório. Assim que o sistema atinge o regime permanente o controle de aceleração poderá ser negligenciado;
- Em seguida, o controle de velocidade começará a atuar, até que o sistema solicite atuação do sinal de controle de temperatura;

- c) O controle de temperatura irá atuar quando o sistema da microturbina obtiver uma temperatura de exaustão do combustível maior que a temperatura de referência estipulada.

2.2.6 Sistema de combustível

O sistema de combustível consiste numa válvula de combustível e do atuador. A entrada do sistema é proveniente da saída do bloco de seletor mínimo. O sinal de atuação é designado como V_{CE} , que representa o fluxo de combustível necessário para um ponto de operação. O esquema desse sistema é apresentado no Diagrama 5.

Diagrama 5 - Sistema de combustível



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

onde, $K_3 = 1 - K_6$, sendo K_3 um ganho escalonado para o sinal V_{CE} , K_6 é a mínima quantidade de fluxo de combustível quando a turbina opera sem carga, K_V e K_f são os ganhos do posicionamento da válvula e do atuador, respectivamente, enquanto T_V e T_f são as constantes de tempo da válvula e do atuador e W_f a demanda de combustível para operação da microturbina.

A outra entrada do sistema de combustível, apresentada também na Figura 10, é o valor por unidade (p.u) da velocidade angular do rotor, representado por ω_n . O valor de V_{CE} é disposto por um ganho, depois atrasado e compensado por uma quantidade mínima de combustível para alimentar continuamente o processo de combustão na câmara de combustão.

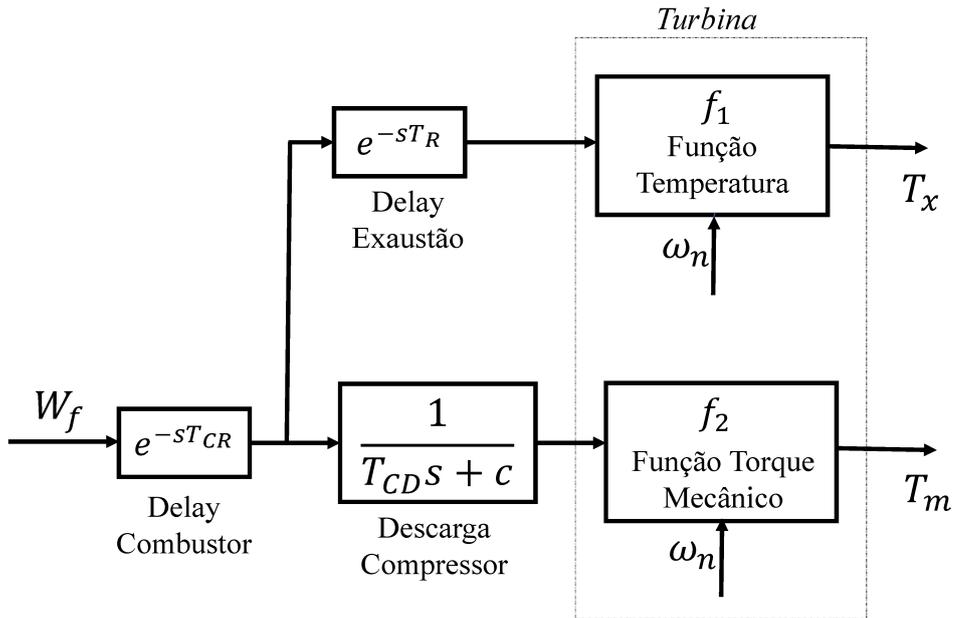
2.2.7 Dinâmica da microturbina

A dinâmica da microturbina é dada por meio da análise do conjunto compressor-turbina, cujo modo de operação é linear, com a restrição da constante de tempo do rotor. Para análise do funcionamento da dinâmica do sistema deve se considerar as seguintes

variáveis: atraso do sistema de combustível, atraso no transporte T_{CR} (associado ao tempo de reação da combustão), tempo de atraso T_{CD} (associado com o volume de descarga do compressor) e um atraso designado como T_{TD} , o qual relaciona o transporte do gás do sistema de combustão através da turbina. Esses parâmetros são utilizadas para formulação matemática da dinâmica da turbina.

A dinâmica da MGT está apresentada no Diagrama 6, está composta pelo diagrama de blocos (DB) que representa o conjunto compressor-câmara de combustão-turbina, cuja performance do sistema é dada pela transformação da energia química do combustível em energia térmica através da combustão dos gases, estes se expandem sobre o eixo da turbina fazendo com que o eixo se movimente, o que caracteriza o torque da turbina representado no Diagrama 6 como a função f_2 , e a temperatura no qual ocorre este estágio que é assinalada como temperatura de exaustão representada como a função f_1 .

Diagrama 6 - Dinâmica da microturbina



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Analisado o conjunto o Diagrama 6 é possível obter as equações que designam as funções f_1 e f_2 , temperatura de exaustão (T_x) e torque mecânico (T_m) respectivamente.

$$T_x = T_R - 700(1 - W_f) + 550(1 - N) \quad (2.1)$$

$$T_m = K_{HHV}(W_f - 0.23) + 0.5(1 - N) \quad (2.2)$$

onde: T_R é a temperatura de referência em Fahrenheit ou graus Celsius, W_f é a demanda de combustível, N é a velocidade de rotação em rad/s, que terá como saída a temperatura de exaustão do gás em Fahrenheit ou graus Celsius. Já K_{HHV} é uma constante que depende da entalpia do combustível utilizado ou do maior valor de aquecimento do gás na câmara de combustão, e as saídas são o torque da microturbina em $(N \cdot m)$.

As Equações descritas em (2.1) e (2.2) são basicamente funções lineares em torno do ponto de operação nominal do fluxo de combustível. De acordo com o trabalho de Tavakoli, Vahidi e Gawlik (2009) é possível parametrizá-las de modo a assemelhá-las ao modelo proposto por Rowen (1983), podendo dessa maneira ser aplicadas para qualquer turbina ou microturbina comercial, desde que se conheça as características construtivas e operacionais do equipamento em estudo, será possível reescrever as Equações (2.1) e (2.2), definindo as Equações (2.3) e (2.4):

$$T_x = T_R - K_{T1}(1 - W_f) + K_{T2}(1 - N) \quad (2.3)$$

$$T_m = K_1(W_f - K_3) + K_1(1 - N) \quad (2.4)$$

em que: K_1 , K_2 , K_{T1} , K_{T2} , são constantes associadas às equações de torque e temperatura, respectivamente, cujos valores dependerão da turbina analisada, T_R é a temperatura de referência em Fahrenheit ou graus Celsius, W_f é a demanda de combustível, K_3 é a vazão mínima de combustível para operação sem carga, N é a velocidade de rotação em rad/s, e as saídas serão o torque da microturbina em $(N \cdot m)$ e temperatura de exaustão do gás em Fahrenheit ou graus Celsius.

Dessa forma diante do estudo proposto neste capítulo, o qual apresentou a modelagem matemática e dinâmica de uma microturbina a gás, segundo o modelo proposto por nos seus trabalhos Rowen (1983,1922), é possível adaptá-lo aos diferentes tipos de microturbinas e turbinas existentes no mercado, desde que se tenha conhecimento das características construtivas e operacionais do equipamento analisado e então adaptar o modelo em questão para que possa atingir o objetivo almejado.

3 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

Este capítulo apresenta as principais características de operação dos componentes que compõem os sistemas elétricos para a conexão da microturbina a gás à rede elétrica. Mais especificamente, aborda-se modelagem matemática simplificada do gerador elétrico de ímãs permanentes e do conversor *back-to-back* de forma sucinta, aludindo às metodologias de controle abordadas e a metodologia de análise.

3.1 GERADOR ELÉTRICO

A função básica de um gerador elétrico é realizar a conversão de energia mecânica em energia elétrica à tensão estável, independente da variação de carga e da velocidade. A energia elétrica produzida pelo gerador poderá ser controlada sistemas de eletrônica de potência ou por caixa de transmissão, o que dependerá da topologia da microturbina *Single-Shaft* ou *Split-Shaft*. Como visto, no capítulo 2 na classificação do modo de operação a MGT (Figura 5), a microturbina do tipo eixo-único utilizará geradores síncronos de ímãs permanentes de polos lisos para conexão à rede/carga, já para topologia de múltiplos-eixos geralmente utiliza-se geradores de indução.

Para topologias de eixo único (*Single-Shaft*), o gerador elétrico opera em frequência elevada, dessa forma, para conexão à rede elétrica é necessário que a frequência da máquina e da rede estejam em sincronia. Deste modo, a frequência de saída da máquina deverá ser reduzida por meio de conversores eletrônicos CA/CC/CA. A utilização dos conversores eletrônicos de potência possibilitará a compatibilização das características da máquina com os requisitos da rede elétrica, como a frequência de operação, níveis de tensão, controle de potência ativa e reativa, e redução de conteúdo harmônico, dentre outros (FOGLI, 2014).

3.1.1 Gerador síncrono de ímãs permanentes

O gerador de ímãs permanentes (GSIP) no sistema da MGT conectada à rede atuará como uma máquina síncrona, nos primeiros ciclos operará como motor e após como gerador. Durante o ciclo de inicialização da microturbina é necessário de energia para vencer a inércia da máquina e dar partida de operação do sistema, deste modo, a máquina operará primeiramente como um motor para elevar a velocidade de ignição da MGT, ocasionando a inicialização do ciclo termodinâmico da MGT, a máquina síncrona atuará como motor até que o ciclo termodinâmico se complete de modo a suprir a alimentação do sistema, e então ocasionará a operação da turbina de modo que esta supra a alimentação do sistema, a partir de então a máquina síncrona atuará como gerador (CAPSTONE, 2005).

A alimentação da máquina síncrona quando opera como motor poderá ser obtida da rede da concessionária (sistemas *on-grid*), ou de um dispositivo de armazenamento de

energia, que pode ser uma bateria ou um arranjo de capacitores. Portanto, a máquina operará como motor durante os ciclos de inicialização do processo de geração e/ou durante processos de recarga do sistema (sistema *off-grid*), ou ainda em situações houverem necessidade como por exemplo em casos de falha no sistema (ALMEIDA; MATOS, 2012). No entanto, na maioria do tempo a máquina síncrona atuará como gerador síncrono, o qual foi um dos fundamentos deste estudo.

O gerador síncrono de ímãs permanentes é uma máquina trifásica de corrente alternada excitada por ímãs permanentes que fornecem um fluxo constante, cujo princípio básico de operação se dá por meio de geração de campos girantes no entreferro. Como característica de uma máquina síncrona em regime permanente, a frequência elétrica gerada dependerá do número de polos e da velocidade da rotação da máquina (IVAQUINI, 2014).

Quanto aos aspectos construtivos de GSIP este é integrado por um estator, que é a parte fixa da máquina, possuindo diversas ranhuras, onde são colocados os enrolamentos de armadura, que são, geralmente, três enrolamentos equilibrados distribuídos simetricamente. Normalmente, são produzidos em aço laminado para reduzir as perdas por histerese e a corrente de *Foucault*. O intuito do delineamento do estator é que este gere um fluxo magnético com distribuição espacial o mais próximo possível da senoidal, de forma a obter tensões praticamente senoidais no tempo (CARVALHO, 2013).

Já a parte móvel do GSIP é designada como rotor, sendo constituído pelo enrolamento de campo. Os polos que compõem o rotor podem ser do tipo lisos ou salientes. Os polos lisos são enrolamentos distribuídos simetricamente sem ranhuras. São utilizados em aplicações com maior velocidade, como é o caso das turbinas a gás ou a vapor. Já os polos salientes são enrolamentos concentrados que, para acomodar as diversas peças polares, são mais utilizados em aplicações que operem em baixa velocidade (OLIVEIRA, 2018).

3.1.2 Circuito trifásico equivalente do GSIP

Para estudo do circuito trifásico equivalente do gerador, primeiramente considera o sistema de coordenadas síncronas, para simplificação do sistema e dessa forma obter as equações características do GSIP.

O sistema de coordenadas síncronas utiliza a transformada de Park para realizar a transposição das grandezas senoidais (tensão e corrente trifásicas) para o sistema de coordenadas ortogonais de eixo direto e de eixo de quadratura (dq0). Essa transformação permite que o sistema trifásico equilibrado seja descrito em um sistema de vetores ortogonais de valor constante, que são transladados em sincronia com a frequência dos sinais trifásicos.

A aplicação da transformada de Park para análise dos sinais senoidais, em consoante com os sinais constantes (provenientes da linearização dos sinais no plano de eixo direto e em quadratura), é um método vantajoso pois, no sistema de coordenadas os sinais

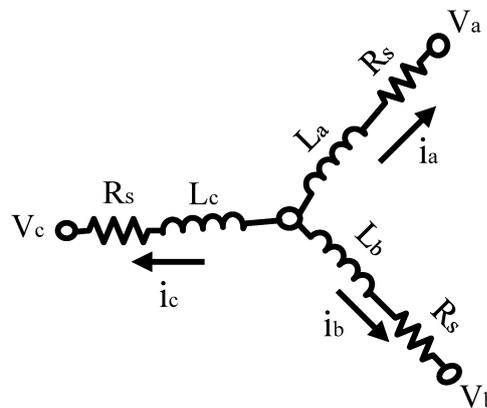
alternados e as variáveis de controle possuirão um comportamento estacionário facilitando as metodologias de controle do sistema (ALMEIDA, 2011).

O gerador utilizado neste trabalho é um gerador síncrono com ímãs permanentes de polos lisos e sem enrolamentos de campo, onde as indutâncias de eixo direto (L_d) e de quadratura (L_q) terão o mesmo valor. As principais vantagens desse tipo de gerador são: a eliminação de perda de campo magnético, maior densidade de potência, menor inércia do rotor e uma construção mais robusta do rotor. Para realizar a análise do modelo trifásico do GSIP, para assim modelá-lo por meio do sistema de coordenadas síncronas, será necessário considerar as seguintes premissas (SCALABRIN, 2016):

- a) As perdas por saturação, histerese e corrente de *Focault* serão desprezadas;
- b) O sistema elétrico do GSIP possui tensões senoidais trifásicas e balanceadas, defasadas em 120° ;
- c) A resistência do estator é idêntica em cada fase.

A Figura 6 apresenta a representação do circuito elétrico equivalente do GSIP.

Figura 6 - Circuito elétrico equivalente



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Aplicando a transformada de Park, a finalidade é transformar grandezas trifásicas equilibradas em dois sinais designados como: grandeza de eixo direto e de eixo quadratura. Dessa forma, ao analisar o GSIP no sistema de coordenadas síncronas, as transformações de coordenadas de abc para dq e vice-versa, invariantes em amplitude, são dadas pelas seguintes relações, conforme apresentado na Equação (3.1):

$$\chi_{dq0} = T_{dq0} \cdot \chi_{abc} \quad (3.1)$$

onde, χ_{abc} é a matriz de grandezas trifásicas, T_{dq0} é a matriz de transformação do sistema abc para o sistema dq0, e χ_{dq0} é a matriz de grandezas transformadas. Assim, reescrevendo as equações definidas em Equação (3.1) em matrizes tem-se a Equação (3.2):

$$\begin{bmatrix} \chi_d \\ \chi_q \\ \chi_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \chi_a \\ \chi_b \\ \chi_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Para a obtenção dos valores χ_{abc} a partir de χ_{dq0} , basta inverter a matriz de transformação e realizar o produto com a matriz χ_{dq0} , conforme pode ser visto na Equação (3.3):

$$\chi_{abc} = T_{dq0}^{-1} \chi_{dq0} \quad (3.3)$$

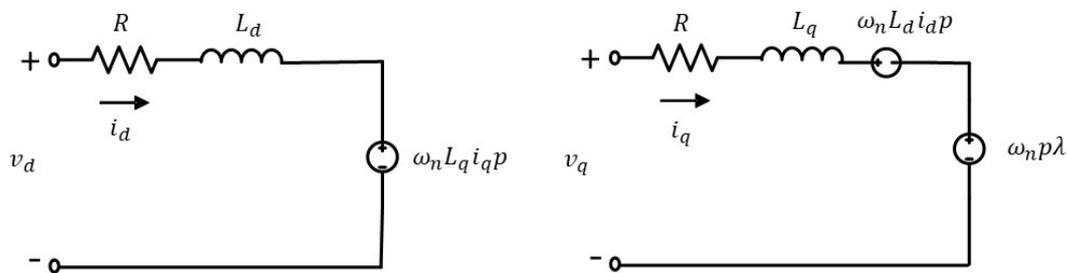
Reescrevendo a Equação (3.3) em matrizes, tem-se a Equação (3.4).

$$\begin{bmatrix} \chi_a \\ \chi_b \\ \chi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\text{sen}(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \chi_d \\ \chi_q \\ \chi_0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.1.2.1 Equações características do GSIP

A análise das equações elétricas do GSIP é realizada por meio da teoria do eixo dq0 conforme já enunciado anteriormente, o circuito equivalente que representa a simplificação do circuito do GSIP é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Simplificação do circuito do GSIP *frame* dq



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Conforme observado na Figura 7, e em relação ao eixo direto e o de quadratura (*frame* dq), é possível representar as partes elétricas e mecânicas do gerador por um modelo matemático simplificado. As equações expressas a seguir fazem referência à dinâmica do

rotor e do referencial eletromecânico *frame* dq em relação ao comportamento do GSIP, essas equações servem para realizar o projeto de controle do sistema de controle da máquina (WU *et al.*, 2011). Uma análise matemática mais elaborada do sistema de equações do GSIP é apresentado nos trabalhos de Lysheski (2008) e Yaramasu e Wu (2016). As equações simplificadas do GSIP são expressas a seguir:

a) Equações Elétricas

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q \quad (3.5)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q} \quad (3.6)$$

$$v_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - p\omega_r L_q i_q \quad (3.7)$$

$$v_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q - p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \lambda \quad (3.8)$$

$$T_e = \frac{3}{2}p(\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (3.9)$$

b) Equações Mecânicas

$$T_e = p \cdot T_m \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_n = \frac{1}{J}(T_e - F\omega_n - T_m) \quad (3.11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_n \quad (3.12)$$

Onde:

- L_d, L_q são as indutâncias dos eixos direto (d) e em quadratura (q) em Henry(H);
- R a resistência dos enrolamentos do estator em (Ω);
- i_d, i_q as correntes do eixo d e q em (A);
- v_d, v_q as tensões do eixos d e q em (V);
- ω_n a velocidade angular da MGT em (rad/s);
- λ o fluxo induzido pelos ímãs permanentes no estator dos enrolamentos em ($V \cdot s$);

- T_e o torque eletromagnético em ($N \cdot m$);
- T_m o torque mecânico do eixo gerador em ($N \cdot m$);
- J a inércia combinada do rotor e carga em ($Kg \cdot m^2$);
- F a fricção viscosa combinada do rotor e carga em ($N \cdot m \cdot s$);
- θ a posição angular do rotor em (radianos);
- p o número de par de polos.

Como dito anteriormente, o gerador síncrono converte energia mecânica em elétrica, mantendo a amplitude e a frequência da tensão gerada controladas, sendo possível relacionar a frequência elétrica (Hz) da máquina e a velocidade mecânica de rotação (rpm) através da Equação (3.13):

$$\omega_n = \frac{120 \cdot f_e}{n_p} \quad (3.13)$$

onde f_e é a frequência elétrica em Hz e n_p o número de polos.

3.2 SISTEMA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Nesta seção serão apresentados os princípios de funcionamentos da parte eletrônica que faz a conexão de uma microturbina a gás com a rede elétrica de distribuição. Ainda, uma breve análise do funcionamento dos sistemas eletrônicos e a modelagem matemática e a dinâmica dos conversores de potência associado ao sistema aqui analisado.

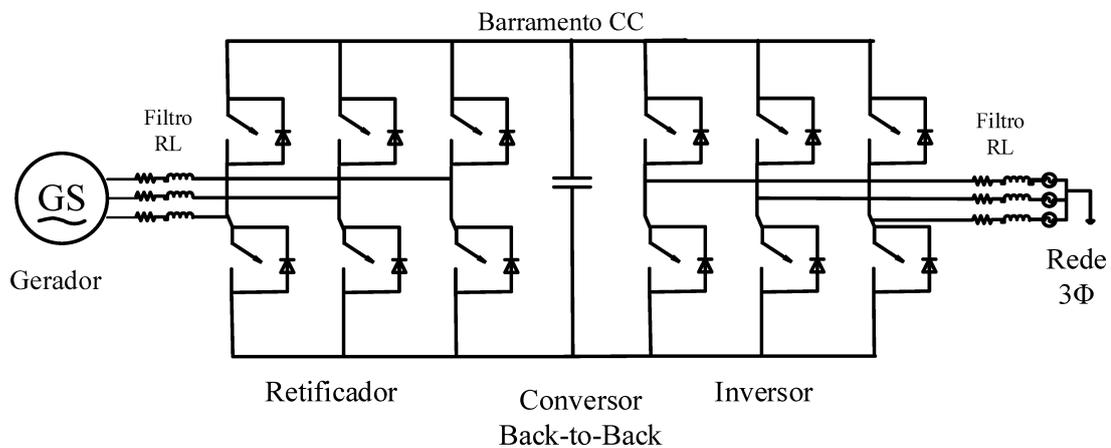
3.2.1 Conversor back-to-back

O conversor *back-to-back* é uma topologia de conversor que apresenta dois conversores de tensão (do inglês *Voltage Source Converter* (VSC)) conectados por meio de um barramento CC. Esse tipo de configuração torna o sistema mais flexível, dado que os dois conversores que o compõem são constituídos por chaves semicondutoras equivalentes e possuem estratégias análogas de controle (SANTOS *et al.*, 2015).

O conversor *back-to-back* vem sendo cada vez mais utilizado para interconexão de sistemas de geração distribuída como sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos e microturbinas a gás, para que estes sistemas possam ser conectados na média tensão. Possui alta versatilidade, podendo ser também usado para aplicações como: acionamentos regenerativos de motores síncronos e de indução, para sistemas de geração de energia conectados à rede ou alimentando um conjunto de cargas em um sistema isolado, para correção ativa de fator de potência, dentre outras aplicações (BENEDETTO, 2017; SANTOS *et al.*, 2015).

A topologia do conversor *back-to-back* é composta de dois estágios, conforme pode ser visto na Figura 8, fazendo com que não seja necessária a comunicação entre o controle dos conversores; isso se dá pois o barramento CC permite um controle distinto para cada estágio, permitindo assim, a conexão entre os dois sistemas de corrente alternada (CA) com características de operação diferentes. No entanto, a tensão do barramento deve ser mais elevada do que as tensões do lados CA, para que seja possível o fluxo bidirecional de potência ativa, sendo necessário um controle da potência em cada um dos lados do conversor (SILVA *et al.*, 2018).

Figura 8 - Conversor *back-to-back*



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 8 apresenta a localização de cada estágio do conversor *back-to-back*, onde há o conversor CA-CC (retificador), o barramento CC e do conversor CC-CA (inversor), cujas funções principais de cada componente é descrita nas subseções seguintes.

3.2.1.1 Conversor CA-CC

O conversor CA-CC (retificador), converte uma tensão CA na entrada para uma tensão CC na saída. O conversor CA-CC que compõe o conversor aqui analisado é do tipo trifásico em ponte completa, também designado como retificador fonte de tensão (do inglês *Voltage Source Rectifier-(VSR)*). Esse tipo de conversor possibilita a síntese de tensões em dois níveis em seus terminais CA, propiciando o controle das correntes drenadas da máquina no qual está conectado, nesse caso em questão o GSIP (MUHAMMAD, 2006).

O comportamento do retificador, em um conversor *back-to-back*, é semelhante ao de um conversor *boost* CC-CC, pois este possui a função de elevar e regular a tensão do barramento CC em relação a velocidade de rotação da máquina. Dessa forma, é necessário que a tensão do barramento CC seja sempre superior à tensão CA do lado da rede, para

permitir que a potência flua do sistema de geração para a rede. Geralmente, o sistema de controle do retificador é responsável por regular o fluxo de potência através do controle da corrente, impondo que toda a potência transferida seja ativa (SOARES, 2012).

3.2.1.2 *Conversor CC-CA*

Análogo ao retificador, o conversor CC-CA (inversor) converterá uma tensão CC na entrada para uma tensão CA na saída com amplitude e frequência desejada. Em aplicações com conversores *back-to-back*, o inversor opera de modo análogo a fonte de tensão, designado *Voltage Source Inverter-VSI*, controlando e mantendo a tensão do barramento CC em um valor de referência desejado para, assim, entregar potência ativa à rede. Essa estrutura de controle é composta por duas malhas em série, a malha de controle da corrente (malha interna), incumbida do controle de potência ativa e reativa, e a malha de controle da tensão (malha externa), que controla a tensão do barramento CC (MUHAMMAD, 2006).

O comportamento do inversor, em um conversor *back-to-back*, é análogo ao de um conversor *buck* CC-CC, pois nesse estágio o sistema abaixa a tensão do barramento CC para um valor de operação de tensão da rede.

Quando o inversor está conectado a uma rede CA, este será responsável pela injeção ou absorção de corrente, gerando a potência a ser entregue à rede. Em aplicações de geração distribuída, sua principal função é entregar energia elétrica à rede de distribuição em corrente alternada, dentro de padrões projetados e com qualidade, injetando as correntes com menor índice de distorção possível, fazendo com que esta tenha a forma de uma onda senoidal (POMÍLIO, 2005).

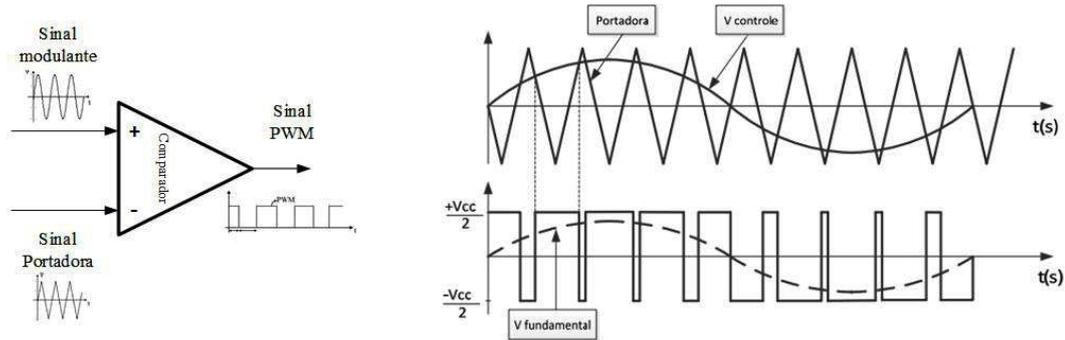
3.2.2 **Características de operação do conversor *back-to-back***

Como visto, o conversor *back-to-back* é estruturado por dois conversores, os quais são compostos por chaves semicondutoras equivalentes. Para esse trabalho, definiu-se que o chaveamento dos conversores será dado pelas chaves semicondutoras do tipo IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Os disparos das chaves semicondutoras ocorrerão através de três sinais de controle. Os sinais atuarão a cada conjunto de chaves (sendo este conjunto de chaves pertencente a parte superior no semiciclo positivo e a parte inferior no semiciclo negativo), esses sinais devem ser sincronizados e defasados de 120° (NDIAYE, 2013).

Para realizar o controle dos dispositivos semicondutores, será utilizada a técnica de Modulação por Largura Pulso, *Pulse-Width Modulation* (PWM). Esta permitirá o controle da tensão e da frequência aplicada ao sistema. A estratégia adotada para este trabalho é uma variante da técnica PWM, a Modulação PWM Senoidal, *Sinusoidal Pulse-Width Modulation* (SPWM). Essa técnica consiste na comparação de um sinal senoidal, a qual

deseja sintetizar, com uma portadora do tipo triangular, Figura 15, resultando em um sinal alternado com frequência fixa com largura variável, sendo este sinal gerado responsável pela frequência de chaveamento do circuito de potência de acionamento dos conversores. A Figura 9 apresenta as formas de onda na modulação SPWM.

Figura 9 - Modulação SPWM



Fonte: Adaptado de Ndiaye (2013).

Assim, por meio da análise da modulação SPWM, a amplitude da tensão do lado CA do conversor é dado pela Equação (3.14)

$$V_{ca} = m \frac{V_{cc}}{2} \quad (3.14)$$

onde, V_{cc} é a tensão no barramento CC fornecida pelo fluxo de potência entre a microturbina e a rede, e m é o índice de modulação, o qual pode ser obtido pela Equação (3.15):

$$m = \frac{V_c}{V_p} \quad (3.15)$$

sendo V_c e V_p respectivamente, a amplitude do sinal de controle do sistema e amplitude do sinal da onda triangular (portadora).

3.2.3 Barramento de corrente contínua (CC)

O barramento de Corrente Contínua (CC) proporciona um desacoplamento entre os conversores, suprimindo a variação de potência no regime transitório entre a máquina e a rede. Devido a essas características, é possível realizar controles distintos para ambos os lados do conversor, promovendo uma compensação da assimetria entre eles. Para a topologia de conversores de fonte de tensão (do inglês, *Voltage Source Converter-VSC*), a tensão do barramento CC deve ser constante, em um valor fixado como o valor mínimo da tensão nos terminais CC, sendo pelo menos o dobro do valor de pico da tensão de fase da máquina. O valor do capacitor do barramento CC deve ter uma ordem de grandeza

suficiente para assegurar uma tensão contínua sem ondulação (ripple) nos terminais de entrada do conversor (ALMEIDA, 2011; ARRAIS, 2014).

Para se designar o valor mínimo da tensão do barramento CC ($V_{cc_{min}}$), deve levar em consideração o tipo de modulação de chaveamento aplicado no sistema. Para a modulação de chaveamento do tipo SPWM, a tensão de barramento é o dobro do pico da tensão de fase da qual se deseja sintetizar, sendo assim, a tensão mínima do barramento CC é dada pela Equação (3.16):

$$V_{cc_{min}} = 2 \cdot V_{max} \quad (3.16)$$

onde, V_{max} representa o valor máximo de operação do sistema. Nesse caso, V_{max} deve ser no mínimo igual ao pico da tensão de fase do lado CA.

Para realizar o cálculo da capacitância de desacoplamento do barramento CC utiliza-se a Equação (3.17) proposta em (NAYAK; GAONKAR, 2012):

$$C_{cc} = \frac{I_{f_{rms}}}{4f\Delta V_{cc}} \quad (3.17)$$

onde, $I_{f_{rms}}$ é a corrente eficaz (rms) (A), f é frequência da rede (Hz), V_{cc} é a tensão no barramento (V) e Δ é *ripple* máximo variação da tensão no barramento, neste caso definirá como de 10%.

3.2.4 Filtro indutivo

O conversor *back-to-back* apresenta filtros de conexão, tanto no lado da máquina quanto no lado da rede. Esses filtros podem ser do tipo filtro indutivo (L), indutivos capacitivos (LC) e indutivos-capacitivo-indutivos (LCL). Nesse trabalho será adotado filtros do tipo L para ambos os lados, o filtro indutivo é caracterizado por ser um filtro de primeira ordem, possuindo a atenuação na região de altas frequências de apenas 20 dB/década, sendo utilizados para aplicações de baixa potência (GOMES; CUPERTINO; PEREIRA, 2018).

O filtro indutivo no lado da máquina e da rede opera muitas vezes como um indutor de acoplamento, fazendo com que o sistema se comporte como uma fonte de corrente, ao operar no modo de corrente controlada via PWM. Um dos objetivos principais da sua utilização é filtrar as correntes provenientes da máquina e filtrar as correntes que saem do inversor, atenuando os harmônicos causados pelo chaveamento das chaves semicondutoras (SOARES, 2012). O filtro é caracterizado por um indutor ligado em série com o circuito do conversor. Assim, pela disposição de ligação do filtro, seu valor não deve ser muito elevado pois pode causar uma queda de tensão (SOARES *et al.*, 2012).

Para dimensionar o indutor do filtro, o critério é limitar o pico do *ripple* de corrente. Para este cálculo se despreza as resistências internas do mesmo, e considera que a tensão

de referência do conversor é igual a tensão de alimentação (SOARES, 2012). A indutância do filtro (L_f) pode então ser calculada pela Equação (3.18):

$$L_f = \frac{V_{fase}}{2\sqrt{6}f_{sw}I_{r_{pico}}} \quad (3.18)$$

onde V_{fase} é a tensão de pico de fase, f_{sw} é a frequência de chaveamento do conversor e $I_{r_{pico}}$ é o da corrente de pico desejado. Para o projeto em questão considerou-se um *ripple* máximo de 10%.

Na prática não é comum utilizar o indutor puro para o acoplamento do conversor, pois este apresenta uma resistência incorporada (CUTRI, 2004). Portanto, costuma se utilizar uma resistência em série com o indutor. Esta deve ter um valor de aproximadamente 10% do valor da reatância (X_L) referenciada à frequência da rede ou na frequência que o sistema estiver conectado.

Logo, tem-se que a reatância é dada para Equação (3.19)

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.19)$$

onde f é a frequência em Hz e L é o indutor de acoplamento ao conversor e rede dado em Henry (H).

Ressalta-se que para o dimensionamento da resistência do filtro de acoplamento entre a máquina e o conversor CA-CC deve-se utilizar a frequência de operação da máquina e já para a resistência do filtro conectado a rede utilizará-se a frequência desta.

O uso de um filtro passa-baixa (FPB) RL propicia a diminuição do tempo transitório quanto ao tempo da simulação do sistema de compensação, além de aproximar mais a modelagem do sistema das características de um indutor real (CUTRI, 2004).

3.3 PROJETO DE CONTROLE DO CONVERSOR *BACK-TO-BACK*

Nesta seção será abordada a análise dinâmica dos conversores que compõem o conversor *back-to-back* e do barramento CC, assim por meio dessa descrição e do princípio de funcionamento dos mesmos será possível implementar o sistema de controle dos componentes do conversor.

3.3.1 Análise de métodos de controle para conversores trifásicos

A estratégia de controle dos conversores trifásicos dependerá da escolha do sistema de referencial adotado, podendo ser efetivados em três sistemas de coordenadas distintos:

- a) Controle no sistema de coordenadas natural;

- b) Controle no sistema de coordenadas estacionárias;
- c) Controle no sistema de coordenadas síncronas.

Para análise de controle considerada neste trabalho, será adotada a metodologia de controle de sistema de coordenadas síncronas, que possibilitará a análise em sinais constantes, sendo, portanto, possível a implementação de técnicas de controles lineares, podendo se aplicar ao sistema do tipo Proporcional-Integral (PI), pois estes geram uma resposta dinâmica satisfatória e ainda podem zerar o erro em regime permanente. A desvantagem do emprego do controle PI para esse tipo de aplicação é que a regulação PI nem sempre suprirá a compensação de harmônicos de baixa ordem (HAUSER, 2014; VILLALVA, 2010).

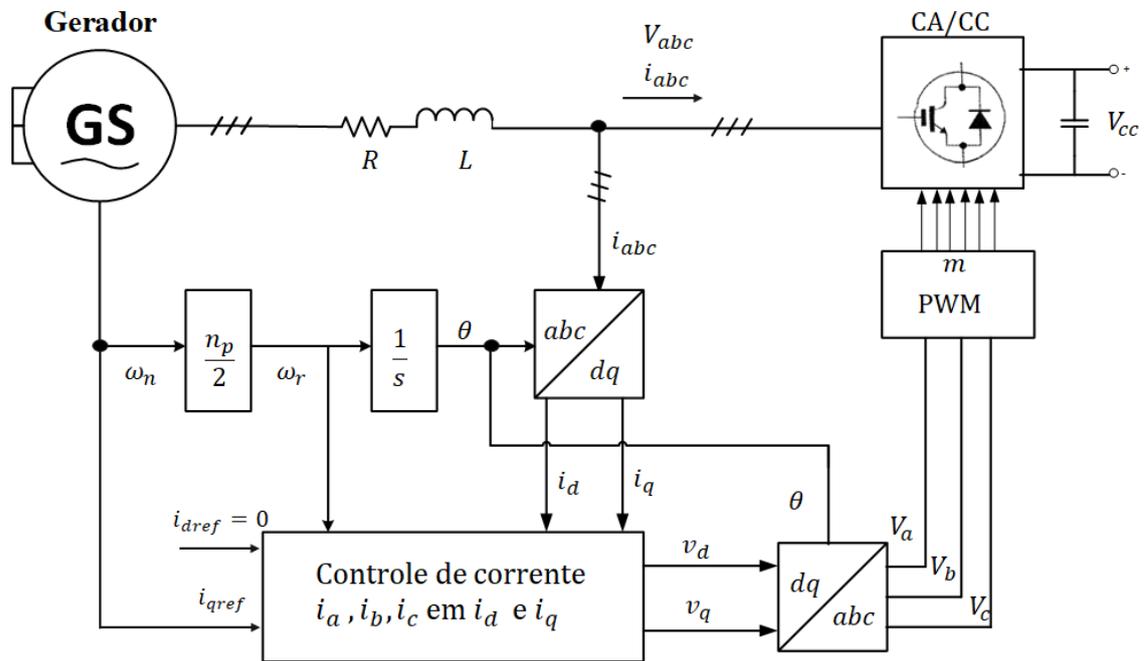
Como visto, a topologia do conversor *back-to-back* permite o controle distinto entre os dois estágios que compõem este conversor, sendo assim a metodologia de controle adotada neste trabalho dará-se da seguinte forma:

3.3.2 Controle do lado máquina

O controle do lado da máquina ocorre no primeiro estágio do conversor *back-to-back*, no qual se realiza o controle da velocidade angular da máquina e o controle da corrente para otimizar a da potência ativa proveniente do gerador, e assim manter o fluxo de potência ativa entre a máquina e o barramento CC.

O sistema de controle do lado máquina tem como finalidade o controle de velocidade da máquina e a regulação do fluxo de potência através do controle de corrente. A regulação do fluxo de potência irá ser feito através da metodologia do controle das correntes coordenadas síncronas dq. Para realizar a sincronia dos parâmetros de tensão e frequência se utilizará a transformada de *Park* das correntes i_d e i_q a serem injetados no retificador por meio do ângulo elétrico, convertido do ângulo mecânico proveniente da rotação do rotor da máquina, o esquema de controle no lado da máquina pode ser visto no Diagrama 7:

Diagrama 7 - Sistema de controle do lado da máquina



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Analisando o diagrama de blocos (DB) contido no Diagrama 7, certifica-se que este representa a configuração do sistema de controle das grandezas do lado da máquina.

Para o controle de corrente do lado da máquina, a corrente de eixo direito de referência deve ser nula ($i_{dref} = 0$) para que o torque/Ampère seja máximo conforme proposto em (WANG *et al.*, 2005).

3.3.3 Controle de velocidade da máquina síncrona

Para implementar o sistema de controle de velocidade da máquina analisa-se as características mecânicas do conjunto motor/gerador, onde se relaciona a velocidade angular do GSIP com torque elétrico, cuja função matemática que relaciona esses parâmetros é dada pela Equação (3.20):

$$T_e = J\omega_n \quad (3.20)$$

em que T_e é o torque elétrico da máquina ($N \cdot m$), J é o momento de inércia da máquina ($kg \cdot m^2$) e ω_n a velocidade angular da máquina em (rad/s).

Considerando somente o torque do ímã, negligenciando o torque da carga e ponderando a velocidade mecânica da máquina, é possível por meio relações matemáticas que representa estas variáveis, estipular a função de transferência que modela o sistema de

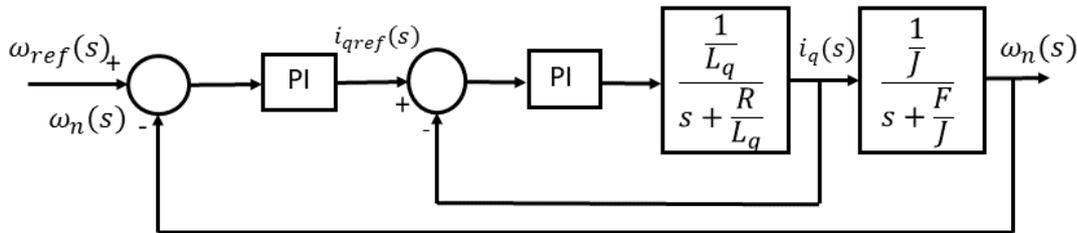
controle de velocidade (WANG *et al.*, 2005), como é apresentado na Equação (3.21):

$$\frac{\omega_n(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{Js + F} \quad (3.21)$$

onde F é o fator de atrito da máquina dado em $(N \cdot m \cdot s)$.

O controlador de velocidade da máquina é projetado para que a velocidade desta opere em conformidade com a velocidade da microturbina, uma vez que velocidade da máquina é o fator que realimenta o sistema de controle de velocidade da microturbina. O Diagrama 8 apresenta a malha de controle de velocidade da máquina.

Diagrama 8 - Controle de velocidade da máquina



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Observando o Diagrama 8, verifica que o esquema de controle é composta por duas malhas: a malha externa que controla a velocidade da máquina gerando o sinal de corrente de eixo de quadratura (i_{qref}), que é a referência para o controle da malha interna, que efetuará o controle de corrente que será injetada no conversor CA/CC. Desse modo ao fazer a análise da relação da velocidade mecânica e da corrente de quadratura obtém-se a seguinte Equação (3.22):

$$\frac{\omega_n(s)}{i_q(s)} = \frac{3p^2\phi}{2J} \frac{1}{s + \frac{F}{J}} \quad (3.22)$$

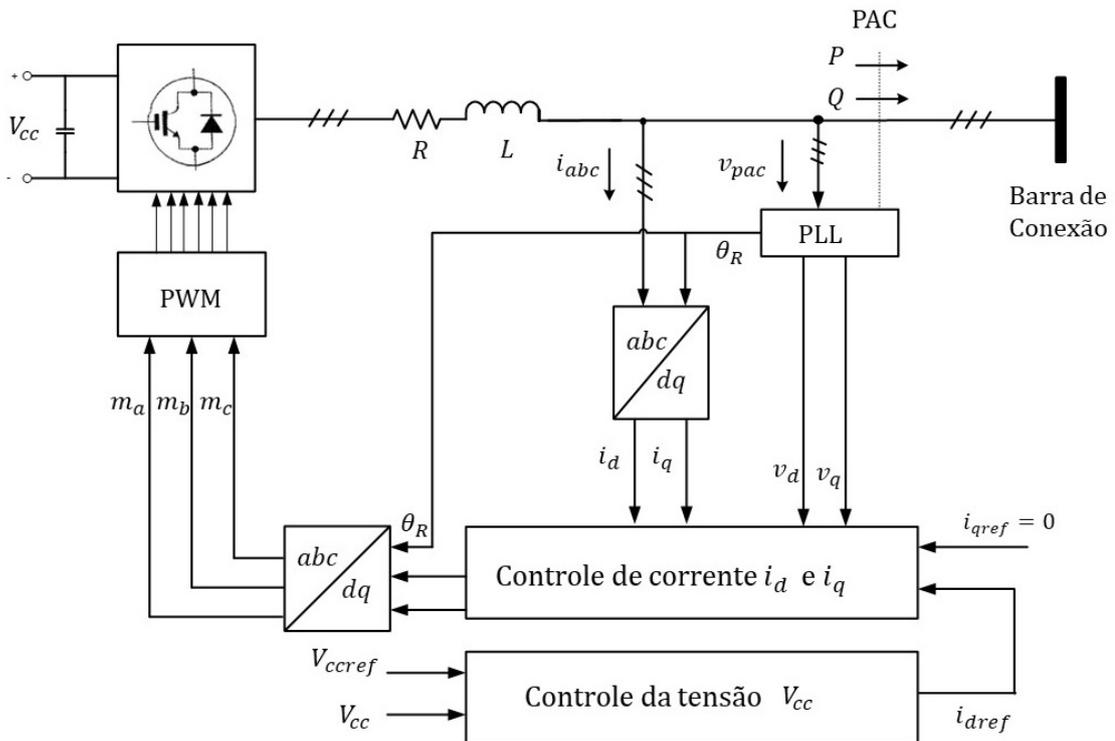
onde, T_e é o torque elétrico em $(N \cdot m)$, J é o momento de inércia em $(kg \cdot m^2)$, ω_n é a velocidade angular em (rad/s) , ϕ é o fluxo magnético em $(V \cdot s)$ e F é fator atrito viscoso da máquina em $(N \cdot m \cdot s)$ e p representa o número de pares de polos da máquina.

3.3.4 Controle do lado da rede

O controle do lado da rede é caracterizado pelo controle no segundo estágio do conversor *back-to-back*, no qual será realizado o controle da tensão do barramento CC e o controle da corrente no ponto de acoplamento comum (PAC), também por meio da

metodologia do controle das correntes coordenadas síncronas dq. O Diagrama 9 apresenta o diagrama de blocos (DB) que representa a configuração do sistema de controle da grandezas do lado da rede.

Diagrama 9 - Controle do lado da rede



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Este controle é estruturado de forma similar ao proposto no primeiro estágio do conversor no que refere ao controle de corrente conforme o estudo de (YAZDANI; BAKHSHAI; JAIN, 2010). O ângulo de sincronismo das correntes é dado pelo circuito *Phase-Locked Loop*-PLL.

Dada a delimitação da estruturação do controle em cada estágio do conversor, nas seções seguintes será apresentado a sistematização dos projetos de controle que compõem o conversor *back-to-back* que são: controle das correntes de eixo direto e de eixo de quadratura e controle da tensão do barramento CC.

3.4 CONTROLE DE CORRENTE DAS COORDENADAS SÍNCRONAS

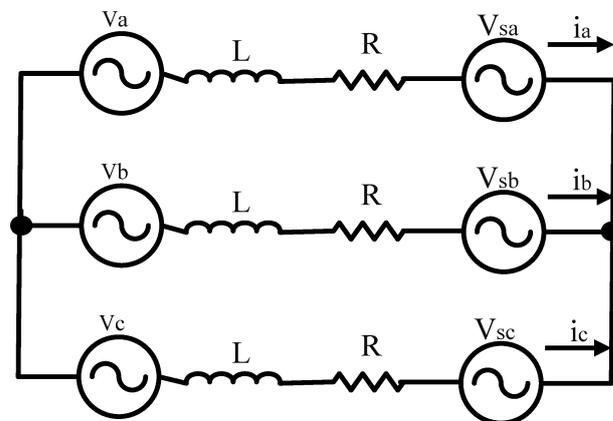
O controle de corrente tem como um dos objetivos gerar a energia de qualidade ao sistema no qual está inserido, nesse caso para aplicações de sistemas GD, garantindo que o sistema de controle atue na compensação dos harmônicos e tenha resposta dinâmica rápida. Para realizar o controle de corrente é possível utilizar diferentes tipos de metodologias de

controle tais como: controle por histerese, controles preditivos, controles lineares, controles não lineares, técnicas de inteligência artificial entre outros métodos.

O conversor *back-to-back* é conectado à máquina e à rede por meio de indutores de acoplamento. Para analisar a corrente elétrica que passa pelo conversor, deve considerar que do lado da máquina a corrente sai do gerador e passa pelo indutor de acoplamento e entra no retificador, já para análise da corrente lado da rede as correntes saem do inversor e passam pelo filtro indutivo para serem injetadas na rede, apresentando comportamento dinâmico similar.

A análise matemática da dinâmica da corrente nos conjuntos máquina-conversor e conversor-rede são análogas, diferindo apenas no sentido do deslocamento da corrente e da corrente de referência. Assim o equacionamento que representa a dinâmica da corrente elétrica do conversor *back-to-back* tanto para o lado máquina. Portanto, diante dessas considerações e uma vez que a dinâmica nos lados apresenta comportamento similares, optou-se por analisar o conjunto conversor-rede conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Circuito equivalente conversor do lado da rede



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 10, a rede elétrica é representada por fontes de tensão na frequência fundamental da rede, e entre as fontes do inversor e da rede tem-se o filtro indutivo. E as tensões sintetizadas pelo conversor serão representadas por fontes de tensão equivalentes (SANTOS, 2015).

Dessa forma, analisando a Figura 10 aplicando-se a *Lei de Kirchhoff* para tensão obtêm-se as Equações das tensões do circuito (3.23):

$$\begin{cases} V_a(t) = L \frac{d}{dt} i_a + R i_a(t) + V_{sa}(t) \\ V_b(t) = L \frac{d}{dt} i_b + R i_b(t) + V_{sb}(t) \\ V_c(t) = L \frac{d}{dt} i_c + R i_c(t) + V_{sc}(t) \end{cases} \quad (3.23)$$

As Equações (3.23) representam as relações entre as tensões e as correntes instantâneas do circuito em análise. Onde V_a, V_b, V_c são as tensões trifásicas de saída do inversor em suas respectivas fases a, b e c, V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} são as tensões trifásicas da rede em suas respectivas fases a, b e c, e R e L se referem à resistência equivalente e à indutância do filtro de interface entre o inversor e a rede elétrica.

Aplicando as transformações de coordenadas de Park ao sistema de Equações (3.23) obtém-se as seguintes Equações (3.24):

$$\begin{cases} v_d(t) = L \frac{d}{dt} i_d + R i_d(t) + v_{sd}(t) - \omega L i_q(t) \\ v_q(t) = L \frac{d}{dt} i_q + R i_q(t) + v_{sq}(t) + \omega L i_d(t) \end{cases} \quad (3.24)$$

onde, ω (rad/s) a frequência angular dada por $2\pi f$, onde f é a frequência elétrica (Hz), neste caso a frequência de operação da rede; já na análise da máquina-retificador utiliza-se a frequência elétrica de operação da máquina.

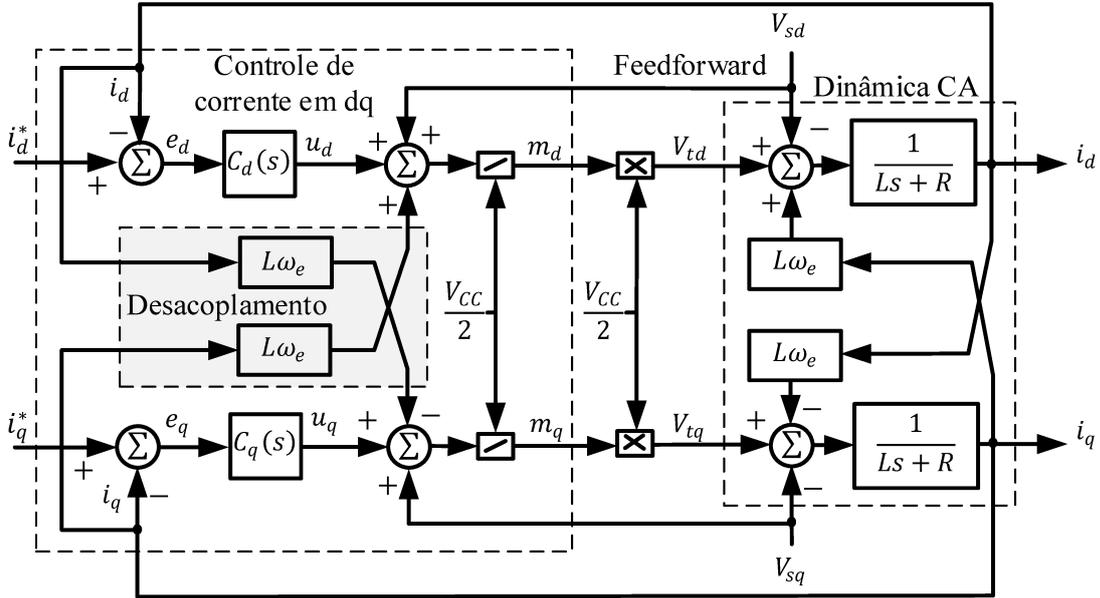
Como pode ser observado, no conjunto de Equações (3.24), ao realizar a transformação do sistema trifásico para sistema de coordenadas síncronas gerou-se os elementos $\omega L i_d(s)$ e $\omega L i_q(s)$ designado como acoplamento, que relaciona as variáveis dos eixos direto e de quadratura.

Fazendo-se a análise Equações (3.24) pela Transformada de Laplace obtém-se as Equações (3.25):

$$\begin{cases} v_d(s) = s L i_d + R i_d(s) + v_{sd}(s) - \omega L i_q(s) \\ v_q(s) = s L i_q + R i_q(s) + v_{sq}(s) + \omega L i_d(s) \end{cases} \quad (3.25)$$

Assim, por meio das Equações (3.25) no domínio da frequência é possível obter a Função de Transferência (FT) que relaciona as correntes no PAC e a tensões de saída do conversor. No entanto, para gerar a FT é necessário considerar o sistema desacoplado, pois o acoplamento de variáveis não permite controlar de modo independente as variáveis dos eixos d e q. Para realizar o desacoplamento deve-se acrescentar dois termos cruzados, calculados por meio das correntes i_d e i_q , e as tensões de referência v_d e v_q (VILLALVA, 2010), conforme pode ser visto no Diagrama 10.

Diagrama 10 - Controle das coordenadas síncronas



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Assim, por meio do desacoplamento torna-se possível analisar as variáveis, para assim, efetuar o controle. Dessa forma, as Equações (3.25) são reescritas sem o termos de acoplamento:

$$\begin{cases} v_d(s) = sLi_d + Ri_d(s) + v_{sd}(s) - \omega Li_q(s) \\ v_q(s) = sLi_q + Ri_q(s) + v_{sq}(s) + \omega Li_d(s) \end{cases} \quad (3.26)$$

Ao analisar o conjunto de Equações (3.26), ponderar que as tensões de saída do conversor (v_d e v_q) atuam como variáveis de processo juntamente com as correntes no PAC (i_d e i_q) e as tensões do PAC (v_{sd} e v_{sq}) atuam como perturbações (VILLALVA, 2010).

Desprezando-se as perturbações é possível definir a função de transferência que relaciona a corrente no PAC i_d e i_q e as tensões provenientes do conversor v_d e v_q . Portanto, quando as variáveis de eixo d e q são desacopladas, o sistema terá um comportamento dinâmico de primeira ordem.

A função transferência representada nas Equações (3.27) e (3.28), caracteriza a modelagem da dinâmica da corrente de eixo direto e de quadratura para este sistema:

$$G_d(s) = \frac{i_d(s)}{v_d(s)} = \frac{1}{L_d s + R} \quad (3.27)$$

$$G_q(s) = \frac{i_q(s)}{v_q(s)} = \frac{1}{L_q s + R} \quad (3.28)$$

Como para esta aplicação $L_d = L_q$, então tem-se a função de transferência representada na Equação (3.29).

$$G_i(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (3.29)$$

Neste tipo de controle, aborda-se a metodologia das correntes de eixo direto (i_d) e do eixo de quadratura (i_q), que fazem o controle da potência ativa e reativa respectivamente. O intuito desse controle é que não se tenha componentes reativas no PAC, ou seja, a corrente i_{qref} deverá ser igual a zero ($i_{qref} = 0$). O valor da corrente id referência, i_{dref} , determinará a amplitude da corrente desejada no lado CA da rede trifásica.

O sistema analisado possui característica estacionária, portanto o controlador do tipo PI garante que o sistema opere sem erro de regime permanente. Para a sintonia do controlador do proposto, utilizou-se a metodologia proposta por (YAZDANI; BAKHSHAI; JAIN, 2010), que sugere que os parâmetros de K_p e K_i sejam obtidos através da relação dos valores da resistência, indutância e da constante de tempo do sistema compensado que é apresentado nas Equações (3.30) e (3.31):

$$K_{p,i} = \frac{L}{\tau_i} \quad (3.30)$$

$$K_{i,i} = \frac{R}{\tau_i} \quad (3.31)$$

Para determinar o valor da constante de tempo τ_i , que deve ser pequena suficiente para garantir uma resposta rápida da planta, o valor $\frac{1}{\tau_i}$ deve ser no mínimo 10 vezes menor que a frequência de chaveamento do conversor, a constante de tempo deve está dentro da faixa de 0,5 ms e 5 ms (ALMEIDA *et al.*, 2012; YAZDANI; BAKHSHAI; JAIN, 2010).

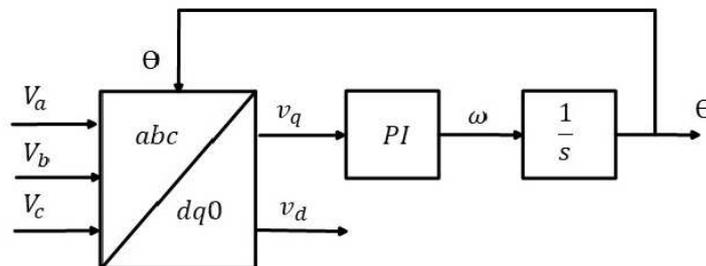
O projeto de controle definido nessa seção é válido tanto para o controle das correntes injetadas na rede proveniente do conjunto Inversor-Rede, como para o conjunto máquina-retificador, cujas correntes são injetadas no retificador, apenas deve ser levado em consideração os termos já discutidos e considerados neste capítulo.

Como visto na metodologia optou-se por realizar o controle pela estratégia das coordenadas síncronas. Esse tipo de controle apresenta vantagens, pois é possível realizar abordagem de controle em sinais contínuos, o que possibilita a implementação do controlador do tipo proporcional integral (PI) convencional (ALMEIDA, 2011; VILLALVA, 2010). No entanto, ao utilizar essa topologia de controle, torna-se necessária a implementação de um circuito de sincronismo, uma vez que para realizar o controle das correntes a serem injetadas na rede é necessário que se informe o ângulo da mesma, para que as correntes estejam em conformidade com as características de tensão e frequência da rede.

A diferença do controle das coordenadas síncronas dq do retificador para o inversor está no ângulo de sincronismo. Como visto, para realizar o controle das correntes do retificador utilizou-se o ângulo proveniente da máquina elétrica. Já no caso controle das correntes do inversor, as correntes trifásicas para serem injetadas na rede devem estar sincronizadas com a tensão e a frequência da mesma, a técnica utilizada nessa estrutura de controle é designada como *Phase-Locked Loop*-PLL. O PLL fornecerá o ângulo de fase da tensão, necessário para as transformações de Park.

O algoritmo de sincronismo deve ser capaz de rejeitar distúrbios indesejados, como harmônicos e desequilíbrios de tensão além de ter uma estrutura relativamente simples (VILLALVA, 2010). Dentre as estruturas de sincronismo apresentadas na literatura, a mais utilizada é o (*Synchronous Reference Frame-Phase-Locked Loop*) (SRF-PLL). Nesta configuração proposta por (ALMEIDA, 2011), as tensões em coordenadas trifásicas (abc) são transformadas para o sistema dq utilizando a transformada de Park. O ângulo e a frequência são estimados por uma estrutura em malha fechada que anula a tensão no eixo de quadratura, a configuração do SRF-PLL é apresentada no Diagrama 11.

Diagrama 11 - Estrutura do SRF-PLL.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Uma vez definido o ângulo de sincronismo, é possível estabelecer a relação de sincronismo entre as correntes trifásicas e as correntes de coordenadas síncronas e projetar o controle das mesmas.

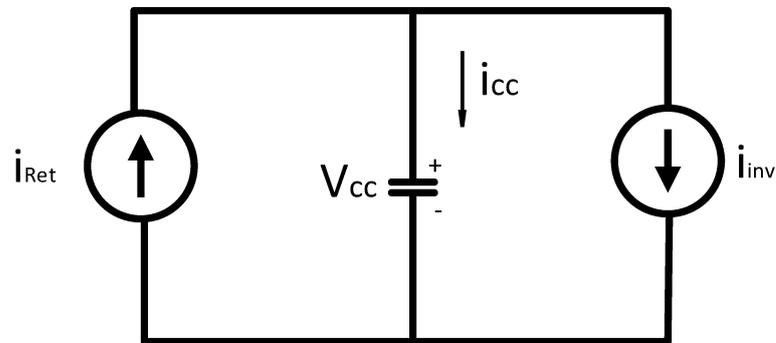
3.4.1 Controle de tensão do barramento CC

O controlador da tensão no barramento CC tem como aplicabilidade ocasionar o balanceamento do fluxo de potência entre a microturbina e a rede, pleiteando a estabilidade do sistema. A tensão do barramento CC pode ser controlada regulando a corrente i_q e i_d , baseando-se no balanço de potência ativa do sistema, dado que a potência entregue ao capacitor está relacionada com a potência entregue à rede (ARRAIS, 2014). A corrente que circula no barramento é definida pela diferença entre a corrente proveniente do retificador e a corrente de entrada do inversor, tendo que possuir média nula, desprezando-se as perdas.

Desse modo, a tensão do barramento CC apresentará valor médio constante (VILLALVA, 2010).

Para realizar o controle do barramento CC deve-se analisar o comportamento dinâmico da corrente e da tensão no mesmo. Para isso, considera-se o barramento CC conectado por duas fontes de corrente, uma fonte de corrente é proveniente do retificador que injetará corrente no barramento e a segunda drenará corrente do barramento para o inversor (VILLALVA, 2010), conforme representado no circuito equivalente da Figura 11.

Figura 11 - Circuito equivalente do barramento CC



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Analisando a Figura 11, o balanço de corrente no barramento CC tem a Equação (3.32):

$$i_{inv} = i_{cc}(t) - i_{Ret}(t) \quad (3.32)$$

onde a corrente no capacitor i_{cc} é dada pela Equação (3.33):

$$i_{cc}(t) = C \frac{d}{dt} V_{cc} \quad (3.33)$$

Assim, reescrevendo a Equação (3.32):

$$i_{inv} = C \frac{d}{dt} V_{cc} - i_{Ret}(t) \quad (3.34)$$

O controlador de tensão do barramento deve ser projetado para balancear o fluxo de potência do sistema. O fluxo de potência entre a saída CC (barramento) e a saída CA (inversor) é dada pela Equação (3.35)

$$p_{cc}(t) = v_{cc}(t) i_{inv}(t) \quad (3.35)$$

Como para projetar o controle linear deve-se fazer a análise pela coordenadas síncronas, logo a Equação 3.35 que representa o fluxo de potência ao longo do eixo direto (potência ativa-P) e do eixo de quadratura (potência reativa-Q), então tem a Equação (3.36):

$$p_{pq}(t) = \frac{3}{2}(v_d(t)i_d(t) + v_q(t)i_q(t)) \quad (3.36)$$

O intuito é que apenas a potência ativa seja injetada no PAC, ou seja, a potência reativa deverá ser nula. Assim a Equação (3.36) terá apenas a componente de eixo direto conforme a Equação (3.37):

$$p_{pq}(t) = \frac{3}{2}v_d(t)i_d(t) \quad (3.37)$$

Para realizar o sistema de controle de tensão no barramento CC e determinar a função de transferência que o caracteriza, foi feita a análise proposta em (ALMEIDA *et al.*, 2012). Para tal, estabeleceu-se a relação potência ativa nos terminais do capacitor CC, que é dada diferença da potência ativa do gerador e a potência ativa nos terminais do conversor, cuja Equação (3.38):

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{cc}^2 = p_g(t) - p_{pq}(t) \quad (3.38)$$

onde, $p_g(t)$ é a potência ativa da máquina, C é o capacitor do barramento CC em Faraday (F).

Como se pode observar na Equação 3.38, V_{cc} possui comportamento não-linear, desse modo, para aplicar o controle linear a este sistema, é necessário linearizá-lo em torno de um determinado ponto de operação em regime permanente.

Assumindo que a tensão da rede não varia, é possível determinar a relação linear para pequenas variações observadas em relação ao valor quadrático da tensão sobre o capacitor CC do barramento do conversor (ALMEIDA *et al.*, 2012), estabelecida na Equação (3.39).

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{cc}^2(t) = \Delta p_g(t) - \frac{3}{2}(\Delta v_{sdo}(t)\Delta i_{do}(t)) \quad (3.39)$$

onde: Δ representa pequenas variações em torno do ponto de operação em regime permanente, e o índice "o" acrescido nas variáveis analisadas indica a leitura destas no ponto de operação.

Aplicando-se a transformada de Laplace na Equação (3.39), pode-se obter a seguinte Equação (3.40) no domínio da frequência:

$$sC \frac{V_{cc}^2}{2}(t) = \Delta P_g(s) - \frac{3}{2}(\Delta v_{sdo}(s)\Delta i_{do}(s)) \quad (3.40)$$

Ponderando as variáveis da Equação 3.40 é possível obter a função de transferência que relaciona as pequenas variações da tensão quadrática no barramento CC e a corrente de eixo direto do conversor, considerando a variável $P_g(s)$ como perturbação e desconsiderando-a, tem que a Equação (3.41) que representa a FT é:

$$F(s) = \frac{\Delta V_{cc}^2(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{-3}{2} \frac{v_{sd0}}{V_{ccref}} \frac{1}{s} \quad (3.41)$$

Análogo ao comportamento dinâmico da corrente, esse sistema também possui característica estacionária. Então, para que o sistema opere da maneira esperada, utilizou-se um controlador do tipo PI. A metodologia adotada para a sintonia do controlador do barramento CC foi a proposta por Almeida *et al.* (2012), que sugeriu que os parâmetros de K_p e K_i fossem obtidos através da comparação da função de transferência de malha fechada da tensão do barramento CC ao quadrado (Equação (3.42)) à função canônica (Equação (3.43)):

$$\frac{\Delta V_{ccref}^2}{\Delta V_{cc}^2} = \frac{\frac{3k_{p,v}V_{sd0}}{C}s + \frac{3k_{i,v}V_{sd0}}{C}}{s^2 + \frac{3k_{p,v}V_{sd0}}{C}s + \frac{3k_{i,v}V_{sd0}}{C}} \quad (3.42)$$

$$H_s = \frac{2\zeta\omega_n + \omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega^2} \quad (3.43)$$

Da comparação entre as Equações (3.42) e (3.43) pode-se determinar os ganhos do controlador $K_{p,v}$ e $K_{i,v}$ conforme descrito nas Equações (3.44) e (3.45).

$$K_{p,v} = \frac{2\zeta\omega_n C}{3v_{sdo}} \quad (3.44)$$

$$K_{i,v} = \frac{\omega_n^2 C}{3v_{sdo}} \quad (3.45)$$

Para determinar os parâmetros $K_{p,v}$ e $K_{i,v}$ de acordo com as Equações (3.44) e (3.45) a frequência de corte deve ser em torno de 10 vezes mais lenta que a resposta da malha interna do sistema.

Os conceitos teóricos abordados nesse capítulo serão implementados para o projeto de dimensionamento e controle do sistema de eletrônica de potência integrado a MGT e a rede. A aplicação desses fundamentos permitirá que a microturbina conectada à rede opere de maneira contundente e satisfatória.

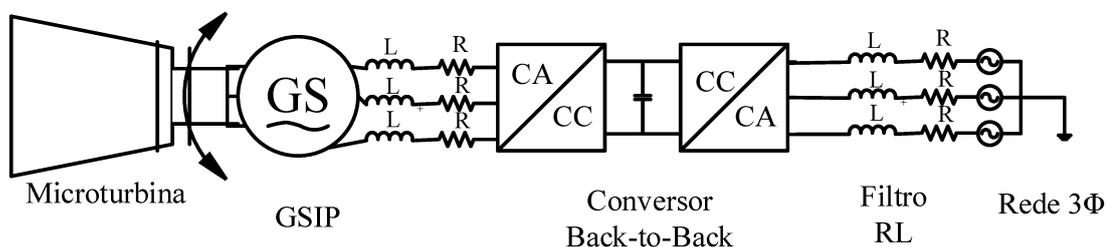
4 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta a aplicação proposta de um algoritmo de otimização para definição dos parâmetros funcionais de um controlador para a potência mecânica de uma microturbina, visando aumento de sua eficiência de geração, aplicada em sistemas de geração distribuída. O capítulo apresenta ainda um modelo simplificado do sistema da microturbina para flexibilizar a aplicação do algoritmo SIA. Os desenvolvimentos propostos dividem-se nas seguintes etapas:

- Estudo do comportamento dinâmico da microturbina a gás de eixo-único modelo C30 da Capstone;
- Aplicação dos fundamentos teóricos no sistema de controle do conversor *back-to-back*;
- Estudo do comportamento dinâmico da velocidade do gerador síncrono de ímãs permanentes de realimentação da microturbina;
- Aplicação do algoritmo de otimização, neste caso em questão, o SIA, para otimizar os parâmetros da microturbina;
- Validação do modelo simplificado de microturbina para execução do algoritmo SIA;
- Comparação de desempenho do modelo simplificado com o modelo completo do sistema.

A topologia proposta para aplicação descrita é apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Sistema de geração de uma microturbina conectada à rede



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 12 apresenta o sistema a ser implementado no *software* Simulink-MATLAB® para as análises propostas neste estudo. As características de operação da rede elétrica será trifásica operando em 220 V na frequência de 60 Hz.

A fim de se obter as características desejadas para o sistema projetado, em concomitância com seus objetivos, para que apenas haja a transferência de potência ativa,

mensurou-se os parâmetros e as funcionalidades de operação dos elementos constituintes do sistema. Os dados de funcionalidade são obtidos em conformidade com a teoria apresentada nos capítulos anteriores.

Para realizar a simulação do sistema foi utilizando o *Simulink - MATLAB*[®], usando a biblioteca *SIMPOWER* para elaboração do conjunto proposto. Nas seções seguintes serão apresentados os passos realizados para efetivação da proposta deste trabalho.

4.1 MICROTURBINA CAPSTONE C30

A microturbina em análise no presente estudo é do fabricante Capstone, modelo C30, que gera uma potência nominal em torno de 30 kW, com uma eficiência elétrica de 26%. Para realizar a simulação em *software* da microturbina utilizou-se os parâmetros que representam a microturbina a gás Capstone C30 no modelo de Rowen (1983), de forma adaptada para a aplicação proposta. Abaixo estão listadas as principais características da ficha técnica do modelo analisado, de acordo com as especificações técnicas do fabricante (CAPSTONE, 2019).

- a) Tensão Nominal: 30 kW;
- b) Performance De Cogeração: até 90%;
- c) Tensão: 400-480 VAC;
- d) Desempenho Elétrico, PCI: 26,00%;
- e) Temperatura De Exaustão: 275°C (530°F)
- f) Fluxo De Gases De Escape: 0,31 kg/s (0,68 lbm/s);
- g) Combustíveis Compatíveis: gás natural, combustível líquido (querosene, combustível de aviação, diesel n° 2 de muito baixo teor de enxofre), biogás (residual, digestor), gás associado, gás ácido, propano.

A Figura 13 ilustra a microturbina do fabricante *Capstone* modelo C30, ilustrando os seus principais componentes.

Figura 13 - Componentes da microturbina C30



Fonte: Datasheet Capstone (2019).

Tabela 1 – Parâmetros operacionais da microturbina.

Parâmetro	Descrição	Valor
K	Ganho do controlador de velocidade	25
T_1	Constante de avanço do controlador de velocidade	0,40 s
T_2	Constante de atraso do controlador de velocidade	0,05 s
K_1	Parâmetro associado à equação do torque	1,4455
K_2	Parâmetro associado à equação do torque	0,50
K_3	Vazão mínima de combustível para operação sem carga	0,3082
T_V	Constante de tempo associada ao posicionador da válvula	0,04 s
T_C	Constante de tempo associada ao controlador de combustível	0,6675 s
V_{CEMAX}	Limitador superior do sinal da demanda de combustível	1,5
V_{CEMIN}	Limitador inferior do sinal da demanda de combustível	-0,10
T_{CR}	Tempo de atraso associado à reação de combustão	0,005 s
T_{CD}	Tempo de atraso associado à descarga dos gases do compressor	0,0341 s
T_{TD}	Tempo de atraso associado à exaustão dos gases	0,04 s
K_4	Parâmetro associado ao escudo de radiação do termopar	0,85
K_5	Parâmetro associado ao escudo de radiação do termopar	0,15
T_3	Constante de tempo associado ao escudo de radiação do termopar	15 s
T_4	Constante de tempo associado ao termopar	2,50 s
T_5	Parâmetro do controlador de temperatura	3,30
T_6	Constante de Integração do Controle de temperatura	250
T_R	Temperatura de referência da exaustão dos gases da microturbina	275° C
K_{T1}	Parâmetro associado à equação da temperatura	454
K_{T2}	Parâmetro associado à equação da temperatura	165
ω_r	Velocidade nominal de operação da microturbina	96000 rpm
ω_{ref}	Velocidade de referência da microturbina	1 p.u
P_r	Potência nominal de operação da microturbina	30 kW
P_{ref}	Potência de referência da microturbina	1 p.u

Fonte: Dados extraídos de Casptone (2005, 2019), Rauber (2016) e Rowen (1983, 1922).

Por meio da análise dos principais dados operacionais da microturbina C30, foi possível adaptá-la para representação em simulação, para então implementar a representação do modelo em *software*. Assim, os parâmetros da Tabela 1 representam os dados da microturbina Capstone C30 aplicada ao modelo proposto por Rowen (1983). Esta tabela é baseada na metodologia do trabalho Rauber (2016) e nos manuais de operação da turbina.

Os dados da Tabela 1 representam os principais dados operacionais da microturbina simulada neste estudo, estes foram adaptados para análise da MGT no modelo proposto por Rowen (1983). Os parâmetros do modelo desenvolvido no *software* e os descritos na Tabela 1 estão descritos ‘por unidade’ (p.u), cujos valores de base são os valores nominais de operação da microturbina.

Cabe ressaltar, que para realizar a extração dos parâmetros de diferentes modelos de turbinas a gás a fim de analisar seu comportamento dinâmico para diferentes aplicações, um das metodologias é se baseia no estudo de operação do ciclo termodinâmico, analisando-se o ciclo de operação das válvulas do sistema de combustível, da dinâmica da turbina, dos atrasos nas reações químicas e físicas, das medições de temperatura entre outras variáveis de interesse. Seguindo-se essa abordagem a análise desse estudo foi baseada no trabalho de Tavakoli, Vahidi e Gawlik (2009) que desenvolveu um guia educacional para extrair os parâmetros de turbinas a gás baseados nas equações termodinâmicas da máquina térmica analisada.

Assim, a partir de um dos dados operacionais dado pelo *Data sheet* (CAPSTONE, 2019) e o manual do fabricante da turbina C30 (CAPSTONE, 2005), e por meio da análise dos equações e dos ciclos termodinâmicos e possível estimar os principais dados e adaptá-los para desenvolvimento da simulação da MGT. A montagem do sistema foi baseada no modelo proposto por Rowen (1983) e Rowen (1992) e adaptada para a microturbina modelo C30 para aplicações de sistemas de geração distribuída, podendo ser utilizado tanto para aplicações conectadas à rede, como em sistemas isolados.

Para elaboração MGT, foi empregada uma abordagem do tipo “caixa cinza”, partindo de modelos dinâmicos simplificados de microturbina para geração de energia. A Figura 14 apresenta a modelagem da microturbina a gás, delineando os controles e o sistema de operação tais como: o controle de velocidade, o controle de temperatura, o sistema de combustível e a dinâmica da microturbina, que foram apresentados no capítulo 2.

Diante do estudo da modelagem matemática e do funcionamento do sistema, obteve-se a representação em diagrama de blocos (DB) da turbina a gás em *software*, a qual foi utilizada para o desenvolvimento das simulações, sendo a representação em DB apresentada na Figura 14. Conforme dito anteriormente, a montagem do sistema foi baseada no modelo proposto por Rowen (1983) e adaptada para a microturbina modelo C30 para aplicações de sistemas de sistema conectados à rede.

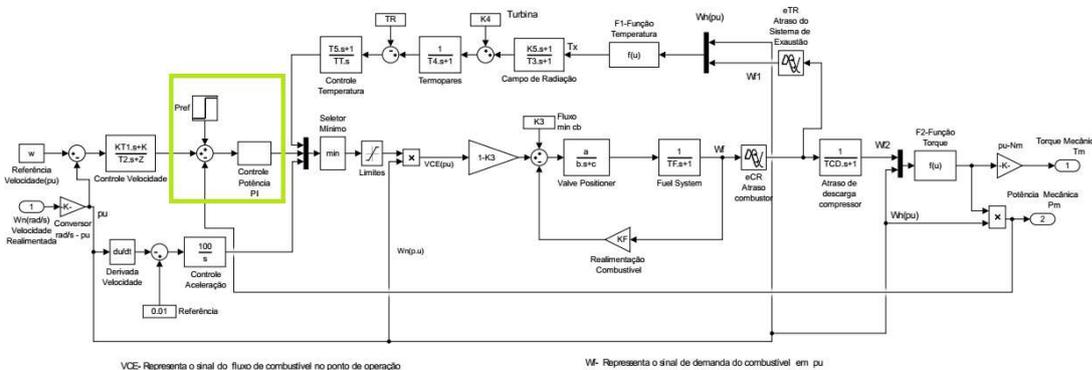
Ainda analisando a Figura 14, apresenta a configuração do conjunto compressor-turbina-gerador elétrico fixados no mesmo eixo, o torque mecânico (representado por T_m) dado pela dinâmica do compressor-câmara-turbina, irá acionar o gerador elétrico, que gerará como uma de suas saídas a velocidade angular em rad/s (ω_n). Esta será realimentada ao sistema para o controle de velocidade da microturbina.

4.1.1 Controle de potência da microturbina a gás

Um dos objetivos deste trabalho é traçar uma estratégia de controle por meio de um algoritmo de otimização para que a microturbina a gás aumente a capacidade de resposta à demanda de potência a ser gerada. Para tal, neste estudo, um controle de potência realimentado foi introduzido na modelagem da microturbina para melhoria da capacidade de resposta à demanda, conforme proposto nos trabalhos de Mohamadi e Ghadimi (2013) e Zhu *et al.* (2019). Os respectivos autores propuseram a inserção de um controlador de potência realimentado ao sistema. Mohamadi e Ghadimi (2013) utilizou um controlador do tipo PID, cuja sintonia foi obtida por meio do algoritmo de programação evolutiva. Já o autor Zhu *et al.* (2019) utilizou um controlador do tipo PI e um limitador de vazão da válvula de combustível. O algoritmo utilizado para sintonia do regulador foi o algoritmo de otimização de baleias aprimorado. Ambos autores utilizaram o mesmo modelo da MGT, proposto por Rowen (1983).

Para realizar a aplicação da proposta deste trabalho, foi feita a inserção de um controlador do tipo PI ao modelo de microturbina C30, cuja sintonia será obtida por meio do algoritmo de otimização (SIA). Diferindo dos autores em questão, em relação ao método de otimização proposto e ao modelo da MGT aqui apresentado, C30. A inserção do controlador de potência proposto pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 - Modelo da microturbina com controle de potência



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Conforme visto na Figura 15, introduziu-se no sistema um controle de potência

em malha fechada integrado à saída do sinal de controle de velocidade, representado pela parte destacada.

A aplicação da melhoria proposta é fundamentada na análise do comportamento dinâmico da microturbina. Como visto nas seções anteriores, o sistema de controle da velocidade é aplicado para que não ocorra oscilação de potência diante das mudanças de carga e de possíveis instabilidades na velocidade da turbina. No entanto, o sistema de MGT com o controle de velocidade puro, que é inerentemente um tipo de controle *droop*, utilizados para sistemas conectados à rede, geralmente terá um erro de estado estacionário (ZHU *et al.*, 2019).

Dessa forma, ao aplicar a estratégia de controle de potência, espera-se que haja um aumento da eficiência do sistema diminuindo o erro de estado estacionário. Portanto, ao realizar a inserção do sistema de controle aplicado à resposta da demanda de potência espera-se que o sistema de geração MGT responda ao controle de forma rápida e eficaz, reduzindo as perdas no processo a um nível mínimo.

4.2 SISTEMA DE GERAÇÃO

Nesta seção, designada como sistema de geração, são apresentadas as considerações essenciais sobre o sistema de geração projetado para realizar a conexão da MGT à rede de forma coesa. Estas premissas serão denotadas nas subseções seguintes, abordando os dados técnicos do gerador elétrico, os aspectos considerados para o projeto de dimensionamento e de controle do conversor *back-to-back*.

4.2.1 Gerador elétrico

A escolha do tipo da máquina elétrica que na maior parte da aplicação operará como gerador elétrico está condicionada ao tipo de aplicação e a configuração da microturbina. A configuração de análise neste trabalho é a microturbina *Single-Shaft*, cujo conjunto compressor-turbina e o gerador estão dispostos no mesmo eixo, sendo necessário para essa aplicação um gerador com alta velocidade de rotação. Os terminais do gerador estão conectados aos terminais do conversor *back-to-back* através de um filtro passa-baixa de primeira ordem.

Para a configuração da microturbina adotada neste trabalho, e de acordo com os parâmetros de operação da microturbina C30, foi escolhido um gerador que possuísse características análogas a da microturbina C30 para realizar a conexão. O gerador adotado é do tipo síncrono de ímãs permanentes (GSIP), como já discutido no capítulo 3, cujos principais parâmetros de operação foram obtidos por meio do trabalho de Gaonkar (2006). As características do modelo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros GSIP

Parâmetros	Valores
Número de Polos (n_p)	2
Tensão no Linha-a-Linha- (V_{ll})	480 V
Potência Nominal (P_r)	30kW
Indutância do eixo direto (L_d)	0,6875 mH
Indutância do eixo de quadratura (L_q)	0,6875 mH
Resistência dos enrolamentos do estator (R_s)	0,25 Ω
Fluxo magnético (λ)	0,0534 V·s
Frequência Elétrica (f)	1600 Hz
Velocidade Nominal (ω_n)	96000 rpm

Fonte: Dados extraídos de Gaonkar (2006).

4.2.2 Parâmetros do conversor back-to-back

Como visto na seção 3.3, para realizar o projeto de controle do conversor *back-to-back* é necessário definir alguns parâmetros. Essas informações estão definidas a seguir:

- A frequência de chaveamento (f_{sw}) dos conversores CA-CC e CC-CA escolhida foi de 20 kHz;
- Considerando as premissas do item 3.2.3 designou-se a tensão no barramento como $V_{CC_{min}} = 760V$;
- Para estipular os ganhos do controlador de velocidade do GSIP analisado no item 3.3.4 utilizou-se a função de transferência 3.22 na ferramenta sisotool *Simulink-MATLAB*[®] para sintonia do mesmo;
- Para realizar o controle de corrente dos conversores, apresentado no item 3.3.5, definiu-se $\tau_i = 0.5$ ms;
- Para determinar os parâmetros $K_{p,v}$ $K_{i,v}$ de acordo com as Equações 3.44 e 3.45, apresentadas na seção 3.3.6, definiu-se um $\zeta = 0,80$ e uma frequência de corte em torno de 10 vezes mais lenta que a resposta da malha interna do sistema.

Por meio dessas considerações foi possível determinar a sintonia dos controladores e ponderar os valores dos componentes do conversor *back-to-back*. De posse desses valores, realiza-se a modelagem do sistema em diagrama de blocos no *software* Simulink-MATLAB[®] para completar o modelo. Na seção seguinte é apresentado o passo a passo das simulações.

4.3 ALGORITMO PROPOSTO PARA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA

Nesta seção, é apresentado o algoritmo proposto para otimização da sintonia do controlador do sistema de potência para que a regulação de potência da microturbina a

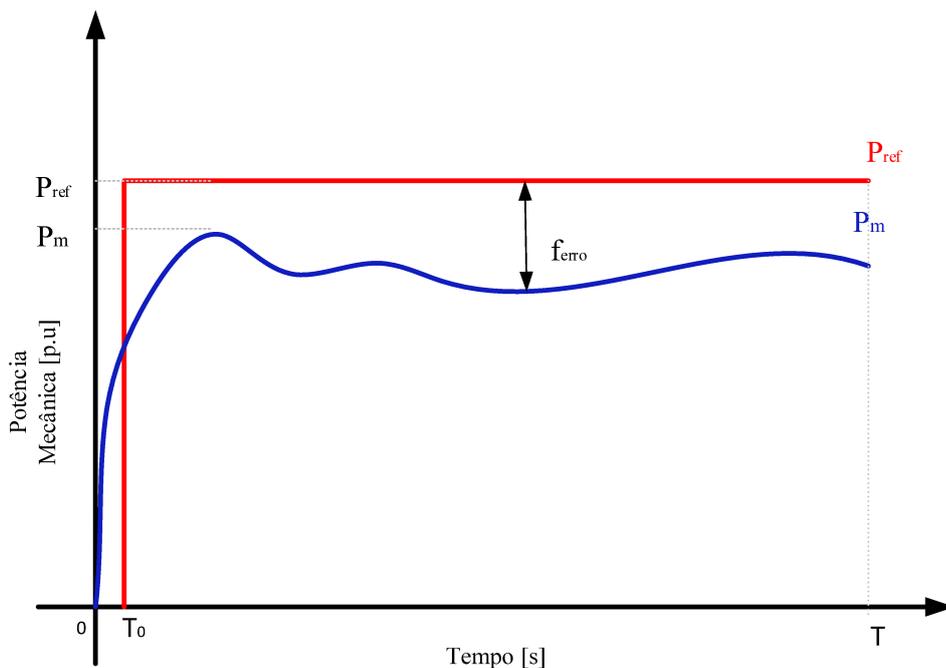
gás propicie aumento de capacidade de resposta à demanda. O método de otimização é aplicado para identificar os parâmetros de sintonia do controlador do tipo Proporcional-Integral (PI), adicionado ao sistema conforme apresentado na Figura 26. Como os parâmetros de controle têm um impacto decisivo no desempenho do controlador, optou-se pela utilização do algoritmo de otimização em função da complexidade de sintonia por métodos tradicionais, uma vez que o controlador em questão contempla toda dinâmica de funcionamento da microturbina.

4.3.1 Função objetivo

A função objetivo (FOB) do modelo matemático do problema de otimização deve refletir as principais propriedades de interesse e de impacto na temática de geração de energia pela microturbina. Sendo assim, a potência mecânica desenvolvida pela MGT durante o tempo de operação foi escolhida como variável de controle no presente trabalho.

A análise de eficiência energética da microturbina é ponderada pela potência mecânica que a turbina transfere efetivamente ao eixo do gerador elétrico, função de seu rendimento, e pela relação entre a potência ativa ou útil gerada pelo gerador e absorvida pela rede. Desta forma, a função objetivo proposta tem o propósito de minimizar o erro de potência útil entre um valor correspondente de referência e o valor real desenvolvido pela microturbina, conforme pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Análise gráfica para determinação da FOB



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em que P_{ref} é a referência de potência, em p.u, P_m é a potência desenvolvida pela turbina, em p.u, e T é o tempo de operação, em segundos. Portanto, a partir destas considerações, a função objetivo é dada pela Equação (4.1):

$$FOB = \min(f_{erro}) \quad (4.1)$$

em que a função f_{erro} é definida pela Equação (4.2).

$$f_{erro} = (P_{ref} - P_m) \quad (4.2)$$

Definida a função objetivo, que caracteriza o comportamento esperado para a potência da microturbina, implementou-se o algoritmo de otimização para a definição dos parâmetros da MGT, visando à minimização do erro entre a potência desenvolvida pela mesma e o valor esperado de referência. Portanto, o objetivo da aplicação do algoritmo de otimização SIA e a sintonia do controlador com este propósito.

A função objetivo descrita e formulada é sujeita a restrições operativas. Estas restrições incluem os valores limites, máximo e mínimo, dos parâmetros que o controlador pode assumir, de modo a prover uma solução realista para o problema. Estas são formuladas na Equação (4.3):

$$\begin{aligned} \text{Restrições : } s.a : k_{p_{min}} < k_p < k_{p_{max}} \\ k_{i_{min}} < k_i < k_{i_{max}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que $k_{p_{min}}$ e $k_{p_{max}}$, $k_{i_{min}}$ e $k_{i_{max}}$ representam os intervalos de operação para os parâmetros K_p e K_i . Para definição desses parâmetros limites deve analisar a faixa de valores de operação do sistema em análise.

4.3.2 Sistemas imunológicos artificiais (SIA)

O SIA é uma técnica inteligente baseada na computação evolucionária, sendo inspirado no princípio de funcionamento do sistema imunológico natural adaptativo de animais vertebrados, para a busca de resolução de diferentes tipos de problemas. Para entender melhor a estrutura do sistema imunológico artificial serão abordados, de modo sucinto, os princípios de funcionamento do sistema imunológico e da seleção clonal.

O sistema imunológico, ao detectar a presença de um antígeno (patógeno), pode provocar a atuação de diferentes mecanismos de regulação e defesa espalhados em vários níveis, tais como: barreiras físicas, barreiras bioquímicas, sistema imune inato, sistema imune adaptativo. O algoritmo do SIA é baseado no princípio de funcionamento do sistema imune adaptativo, portanto a ênfase será nesse sistema.

O organismo dos animais vertebrados possui um sistema de defesa, sendo apto a se prevenir de qualquer tipo de ataque de antígeno que pode ser encontrado ou sintetizado pelo corpo. Na análise do sistema imune adaptativo, tem-se que as principais células desse sistema são os linfócitos, que são produzidos na medula óssea e no timo. Os linfócitos são as células que fazem o reconhecimento dos antígenos, sendo divididos em duas subclasses principais, definidas como linfócito B e linfócito T (MESQUISTA, 2010).

Os linfócitos B, também designadas como células B, têm como principal função a formação de anticorpos para combate aos antígenos. Já os linfócitos T, ou células T são divididas em duas classes. A primeira delas é designada como linfócitos T CD4+ ou células auxiliares, que atuam na ativação de outras células, como os linfócitos B e os macrófagos, além de coordenarem a resposta imunológica. O outro tipo em questão são os linfócitos T CD8+ ou células citotóxicas, cujo papel é exterminar as células infectadas. Para cada célula do tipo B e T tem-se um receptor, que é específico para um determinado antígeno particular, existindo uma grande variedade de receptores diferentes em ambas as células B e T (OLIVEIRA, 2019; SILVA, 2001).

Após a maturação dos linfócitos no timo, estes são lançados na corrente circulatória, e ainda não estão ativados com antígenos para realizar o mecanismo de defesa. Assim, o processo para realizar a defesa contra os antígenos tem um processo similar à seleção natural dos indivíduos. Dando-se da seguinte forma: esses linfócitos são portadores de receptores de um antígeno com uma única especificidade, desse modo aqueles que encontram um antígeno com o qual seu receptor possa interagir serão então ativados para proliferarem e se diferenciarem em células efetoras. Após a ligação do anticorpo de superfície ao antígeno, a célula é ativada para proliferar e produzir uma numerosa prole, conhecida como clone. Essas células secretam anticorpos com uma especificidade idêntica à do receptor de superfície. Esse princípio é definido como seleção clonal, e constitui a parte fundamental da imunidade adaptativa (ALMEIDA; YAMAKAMI; TAKAHASHI, 2007; SILVA, 2001).

O princípio de seleção clonal se dá da seguinte maneira: a célula possuirá um modelo distinto do receptor antigênico, conforme visto; um determinado número de linfócitos irão se ligar a um determinado tipo antígeno, de modo a gerar células que sejam eficazes em quantidade suficiente para combater o antígeno invasor. Assim, o linfócito é ativado de modo a se multiplicar antes que sua prole se diferencie em células efetoras. O princípio da seleção clonal portanto, estabelece que apenas aquelas células capazes de codificar um determinado estímulo antigênico irá se proliferar, sendo, portanto, selecionada em virtude da superioridade apresentada em relação ao conjunto a qual pertenciam, e assim sendo reproduzida (ALMEIDA; YAMAKAMI; TAKAHASHI, 2007).

Ainda, do ponto de vista dos processos entre os linfócitos e os antígenos na produção dos anticorpos, tem-se processos como hipermutação somática, que é o mecanismo de

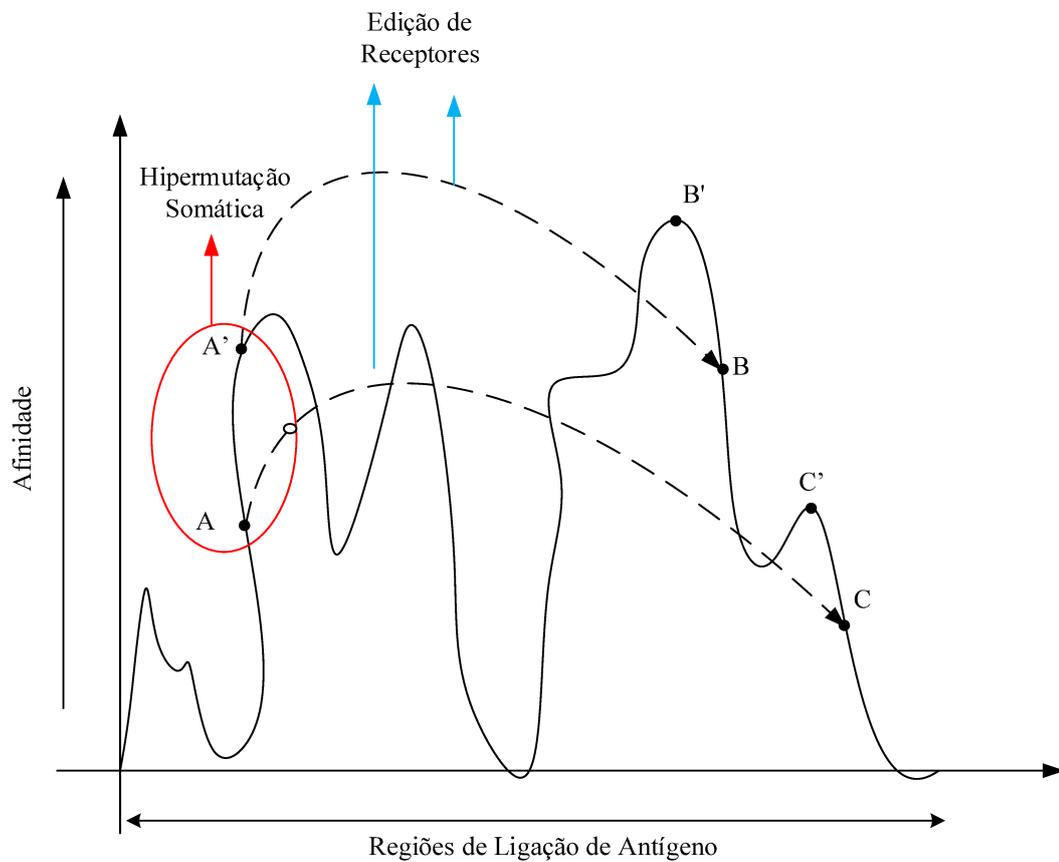
mutação das células para que o sistema imunológico se adapte a novos elementos invasores; a edição de receptores, que é o processo no qual as células do tipo B deletam seus receptores auto-reativos e desenvolvem receptores completamente novos através da recombinação genética; tem-se ainda a seleção negativa, que promove a eliminação de células que atacam o próprio organismo.

Dessa forma, com base nas premissas consideradas da fundamentação teórica do sistema imune, é possível realizar um paralelo entre a teoria da ciência aqui analisada e o princípio dos algoritmos do sistema imunológico artificial, o SIA. De acordo com Almeida *et al.* (2004), a ideologia do algoritmo dará pela geração dos anticorpos que são representados pelas soluções factíveis ou infactíveis, que pelo princípio da seleção clonal gerará novos indivíduos herdeiros das características dos anticorpos (clones) que evoluirão por meio de operadores de maturação, que irá buscar um subconjunto de soluções baseado na função objetivo (também chamada de função *fitness*), a qual será usada como parâmetro de avaliação e para a reprodução dos indivíduos mais adaptados ao ambiente (seleção clonal).

Para realizar o princípio de seleção negativa faz-se a penalização função *fitness* cada vez que não se encontrar a solução factível, para assim buscar eliminar as soluções infactíveis. Assim, à medida que conjunto de anticorpos vai sendo gerado, de acordo com um número finito de gerações estipulado previamente, espera-se obter um conjunto de anticorpos que gerem a solução factível para o problema analisado.

Buscando a melhoria nos resultados do algoritmo projetado, faz-se a utilização simultânea dos processos de hipermutação e seleção clonal, a fim de se obter respostas mais satisfatórias quanto aos anticorpos já existentes. Esse princípio é dado por meio da exploração local do espaço de região de soluções, onde ocorrem pequenas variações nas soluções candidatas em direção a pontos ótimos. Além de utilização desses mecanismos, faz-se o uso do método da edição de receptores para que haja diversidade no conjunto de anticorpos gerados, evitando que a resposta imunológica saia de ótimos locais. Esse recurso é estabelecido por meio da interposição de um número reduzido de soluções candidatas aleatórias (MARTINS, 2017). Este processos são representados na Figura 17.

Figura 17 - Representação dos processos decorrentes dos mecanismos do SIA

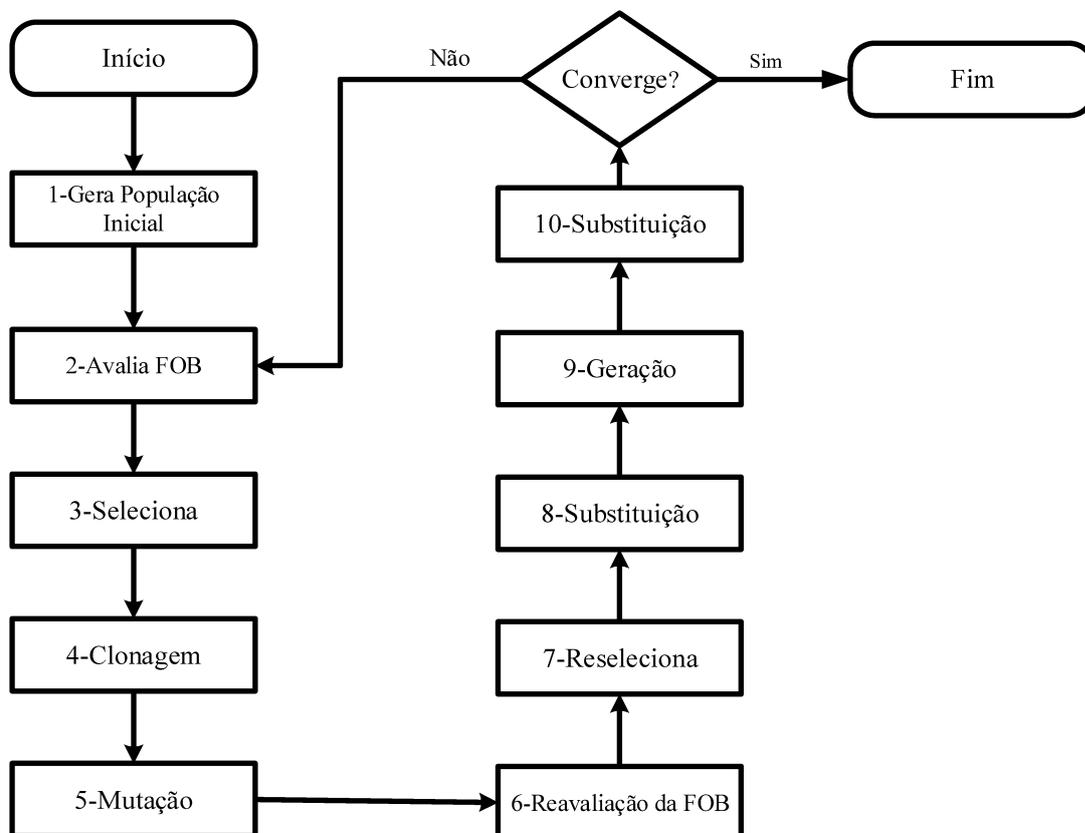


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 17 ilustra a maturação de afinidade dos anticorpos mostrando a relação entre a região de ligação do antígeno e o grau de afinidade para geração dos anticorpos diante um conjunto provável de soluções factíveis. Assim, a hipermutação e a seleção clonal fazem com que o algoritmo de otimização tenha como uma das prováveis soluções a evolução do ponto A para o ponto A', na região delimitada. Essa etapa do algoritmo é denominada busca local, também sendo executada pela lógica da edição de receptores, viabilizando a busca de outros locais dentro do conjunto de soluções caracterizando a mudança do local para B ou C (ROCHA, 2018).

A estrutura lógica do algoritmo SIA referido será apresentado por meio de um fluxograma, apresentado no Fluxograma 1 que é composto por 10 etapas, as quais serão apresentadas a seguir.

Fluxograma 1 - Operação do algoritmo SIA



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A primeira etapa é caracterizada por gerar a população inicial dos anticorpos (linfócitos B), que serão as soluções candidatas para resposta ótima do sistema, a população é gerada, inicialmente, de modo randômico. Na etapa 2 a população de soluções candidatas geradas na etapa 1 será apresentada a função objetivo de modo a serem avaliadas. Essa avaliação é dada em consoante com objetivo da FOB que é de minimização e as restrições do problema.

Na etapa 3, os melhores indivíduos serão selecionados para evolução do conjunto das soluções candidatas. Definida a seleção dos anticorpos, estes serão clonados na etapa 4. Os clones passam para Etapa 5, onde ocorre o método de mutação (hipermutação somática). Após essa etapa, o novo conjunto de anticorpos é avaliado novamente na etapa 6, para constatar a afinidade da população de anticorpos mutantes.

A etapa 7 irá selecionar as melhores soluções candidatas proveniente da Etapa 6 e, em seguida, os direcionará para Etapa 8, que realiza a substituição do conjunto de anticorpos com menor desempenho, provenientes da etapa 3. Assim, após a seleção dos melhores anticorpos, haverá uma nova geração na etapa 9 para que se tenha um conjunto

maior de soluções factíveis dentro do espaço de soluções. E por fim, as soluções candidatas são destinadas a etapa 10 que é caracterizada novamente pela substituição das soluções de pior performance da etapa anterior.

Ainda na etapa 10, é verificado se os anticorpos selecionados na substituição convergem para solução ótima do problema, finalizando o processo. Caso o conjunto ainda não apresente uma resolução concisa do problema, a última geração obtida na etapa 10 é percorrida novamente pelas etapas descritas anteriormente, a partir da etapa 2. Esse processo se repete até que se encontre uma solução factível, ou até que o algoritmo atinja parâmetros previamente determinados, como o número de gerações sem alteração da solução, finalizando o processo.

4.3.3 Algoritmo SIA

O SIA consiste em um algoritmo meta-heurístico bioinspirado, proposto na presente dissertação para otimização do sistema de geração da microturbina, a fim de obter as variáveis discretas de decisão para os parâmetros do controlador. Para aplicação deste algoritmo, é necessário definir os parâmetros de ajuste, que serão calibrados de modo a otimizar a potência mecânica de saída da MGT, em p.u., conforme valor de referência. Para tanto, estabelece-se as seguintes diretrizes:

- a) Número de anticorpos do repertório definido como N_{Ab} , que representa o número de soluções candidatas para sintonia do controlador. Primeiramente estipulou-se o valor 100 soluções, analisou-se ainda a eficiência do algoritmo com repertórios de 50, 30 e 25 soluções candidatas;
- b) Número máximo de gerações ou iterações do SIA para convergência, $N_{max_{ger}}$, variando-o nos valores de 100, 50, 30 e 25 iterações;
- c) Número de gerações sem mudança na solução ótima definido como $gest$, definido como critério de convergência por estagnação do algoritmo sem aprimoramento da melhor solução encontrada, definido como 10.

As combinações dos valores dos parâmetros N_{Ab} , $N_{max_{ger}}$ e $gest$ é realizada para verificar qual implica na melhor relação de custo-benefício entre esforço computacional e qualidade da solução. São realizadas 200 simulações, divididas em 50 simulações para cada combinação de parâmetros da Tabela 3.

Executado o algoritmo de otimização conforme os parâmetros da Tabela 3, os valores de k_{po} e k_{io} para sintonia do controlador de potência são armazenados para cada combinação, a fim de serem testados e avaliados segundo sua eficácia de controle.

Tabela 3 – Parâmetros do algoritmo SIA

Parâmetros	1	2	3	4
N_{Ab}	100	50	30	25
$N_{max_{ger}}$	100	50	30	25

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.3.4 Modelo simplificado para simulação

A fim de executar, de forma computacionalmente eficiente, o algoritmo SIA, um modelo simplificado do sistema da microturbina a gás é proposto, uma vez que a cada uma das iterações do algoritmo SIA até a convergência, um conjunto de N_{Ab} soluções candidatas deve ser avaliado, implicando em N_{Ab} resoluções do modelo a cada iteração. Com isto, utilizar o modelo completo da MGT neste cenário tornaria-se computacionalmente dispendioso e inviável para os requisitos de tempo de análise de soluções alternativas ao problema.

O modelo simplificado envolve apenas a microturbina a gás, onde a velocidade realimentada ao sistema é representada por uma fonte de entrada do tipo degrau, que emula a forma correlata ao comportamento dinâmico da velocidade angular proveniente da máquina. Assim, o modelo simplificado pode ser submetido ao conjuntos de simulações do SIA. Após obtidos os valores de k_{po} e k_{io} , o modelo completo do sistema da microturbina é executado a fim de avaliar o comportamento do sistema e validar o modelo simplificado proposto na otimização.

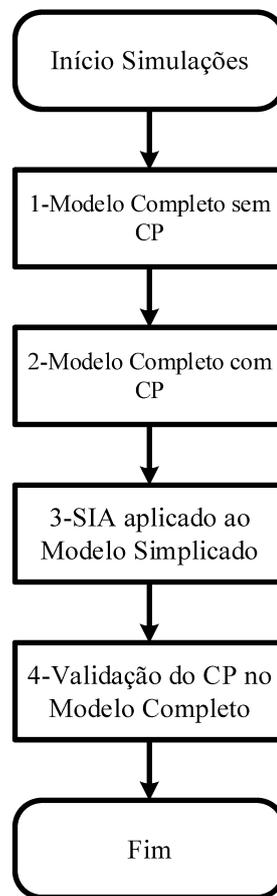
O índice "o" dos ganhos dos controladores k_{po} e k_{io} , refere-se ao ganho proporcional e integral otimizado.

4.3.5 Metodologia de simulação

A metodologia proposta para ajuste dos parâmetros da microturbina a gás com sistema de controle de potência conectado à rede é apresentada na Fluxograma 2, em que o termo "CP" refere-se ao controle de potência. Os passos são descritos na sequência.

- a) Inicialmente, são estabelecidos os parâmetros dos controlares do conversor de potência (*back-to-back*) e os valores dos parâmetros dimensionados por meio de formulação teórica;
- b) A primeira análise é realizada por meio da simulação do sistema completo para verificar qual é o comportamento dinâmico da potência mecânica da microturbina conectada à rede, para atestar como o sistema opera sem o controlador proposto;

Fluxograma 2 - Simulações



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

- c) Na sequência, define-se o modo de operação do algoritmo de otimização SIA para sintonia do controlador de potência da microturbina. Para isso, o conjunto será submetido a diferentes modos de simulação do algoritmo;
- d) Após verificação do comportamento do sistema sem o controlador de potência, será inserido o regulador da potência mecânica nos sistema dinâmico da microturbina a gás, conforme exibido na Figura 26. Ainda, averiguará-se como a sintonia proveniente do SIA impacta o sistema;
- e) Analisado o comportamento do sistema completo junto ao controle de potência definido pelo SIA, será apresentado um modelo simplificado para a microturbina a gás, que será utilizado no algoritmo de otimização, no intuito de atingir um controle satisfatório, porém com tempo computacional significativamente menor para realizar as simulações;
- f) Após a avaliação do modelo simplificado, serão comparados com os dados obtidos

da sintonia do controlador no sistema completo, para corroborar a funcionalidade de operação do sistema simplificado;

- g) Após realizadas as simulações do sistema otimizado, será realizado um breve estudo com a MGT conectada à rede, para avaliar a viabilidade técnica de operação do sistema proposto.

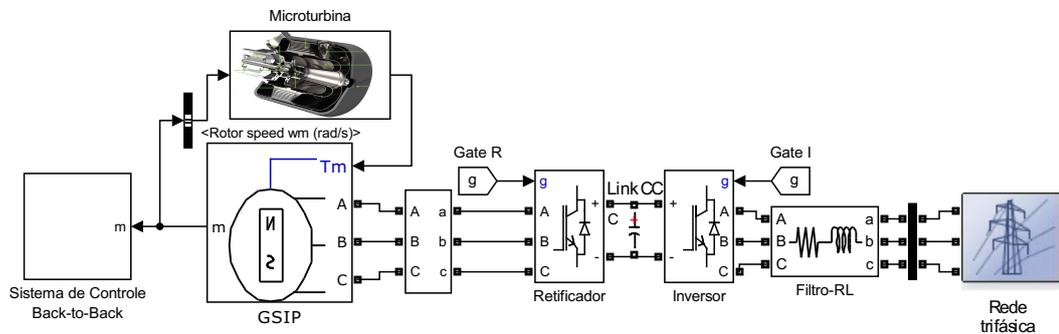
As metodologias propostas nesta seção foram delineadas de modo a obter uma resposta satisfatória para assegurar um comportamento desejável do sistema, cujos resultados obtidos serão apresentados no próximo capítulo.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos por meio da execução das simulações do sistema projetado, que foi desenvolvido em conformidade com as premissas obtidas das análises abordadas nos capítulos anteriores.

A Figura 18 apresenta a estrutura simplificada do sistema implementado no *software Simulink - MATLAB®* para estudo de desempenho da operação do sistema de microturbinas no modo conectado à rede, com o sistema de controle de potência proposto.

Figura 18 - Representação da microturbina conectada à rede para simulação



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Esse conjunto foi submetido a diferentes metodologias propostas, tanto para análise do sistema sem o controle de potência, como para o projeto de otimização proposto neste trabalho.

5.1 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

Nesta seção são apresentados os dados obtidos por meio do desenvolvimento dos projetos de controle do conversor e do dimensionamento do sistema de eletrônica de potência. Os parâmetros obtidos são expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Sistema de eletrônica de potência.

Parâmetros	Valores
Frequência de Chaveamento dos conversores (f_{sw})	20 kHz
Tensão no Barramento VCC (V_{CC})	760 V
Capacitância do Barramento (C)	9200 μF
Indutância do Filtro RL (L)	96 μH
Resistência do Filtro RL (R)	3,6 m Ω
Sample Time de Simulação (Ts)	1 μs

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Cabe ressaltar que os valores de indutância (L) e resistência (R) pertencentes na Tabela 4 são referentes ao filtro indutivo de conexão à rede. Para o projetos de controladores do sistema retificador-máquina utilizou-se os parâmetros de indutância e (L_d, L_q) e resistência (R) da máquina apresentado na Tabela 2, pois estes valores estão dentro da faixa dos valores obtidos e dessa forma, também operarão no sistema como filtro indutivo entre máquina e o retificador.

Já para o projeto dos sistemas de controle ponderado para o conversor *back-to-back*, os ganhos obtidos por meio dos cálculos referidos nos capítulos anteriores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Ganhos do controlador

Parâmetros	Valores
$K_{p,r}$	1,3750 V/A
$K_{i,r}$	500 Vs/A
$K_{p,i}$	0,1901 V/A
$K_{i,i}$	7,2 Vs/A
$K_{p,dc}$	0,6866 A/V
$K_{i,dc}$	$1,0785 \cdot 10^4$ As/V

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

em que: $K_{p,r}$, $K_{i,r}$, $K_{p,i}$, $K_{i,i}$, $K_{p,dc}$ e $K_{i,dc}$ são os ganhos proporcional e integral dos controladores do retificador, do inversor e do barramento CC, respectivamente, que compõem o conversor *back-to-back*.

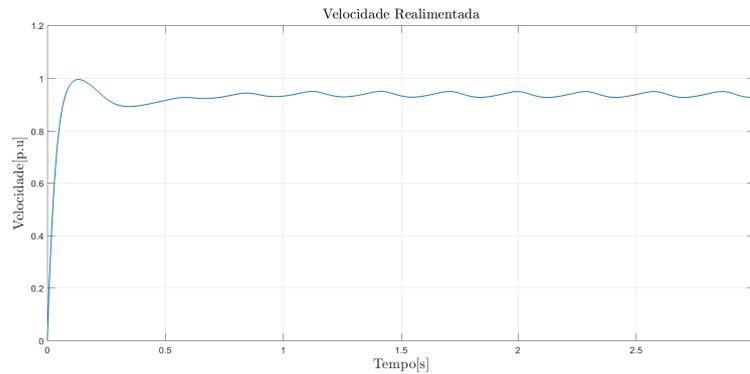
Através da metodologia aplicada, descrita no capítulo anterior, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 4 e 5. Assim, por meio da aplicação destes parâmetros foram realizadas as simulações propostas descritas e analisadas nas seções seguintes.

5.2 ANÁLISE DA MICROTURBINA CONECTADA À REDE

Antes de aplicar o sistema de controle de potência proposto neste estudo, foram feitas as principais considerações do funcionamento da microturbina a gás conectada à rede para que fosse possível constatar as modificações com o sistema de controle de potência proposto, e então corroborar a sua eficácia.

A primeira análise a ser considerada é a velocidade angular de realimentação da microturbina. Pois, de acordo com o Gráfico 1 as premissas apresentadas no capítulo 3, a velocidade angular realimentada proveniente do gerador elétrico compõe o sistema dinâmico de operação da microturbina. Portanto, esta deve atuar de modo constante e em torno de 1 p.u (96000 rpm) para que o conjunto tenha uma melhor performance para geração de energia.

Gráfico 1 - Controle de velocidade

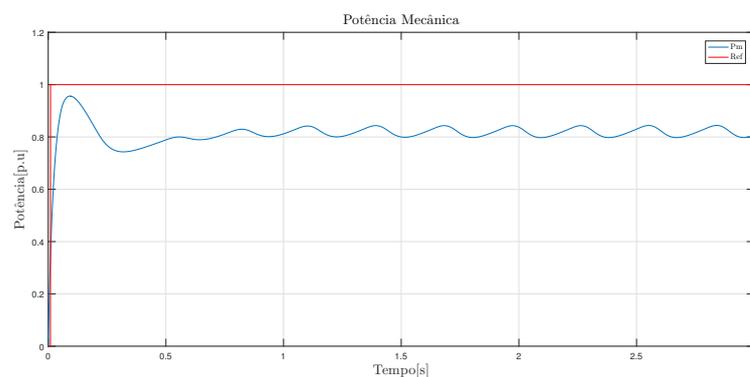


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O Gráfico 1 mostra a comparação da velocidade realimentada proveniente do sistema dinâmico do GSIP em relação a velocidade nominal da microturbina. É possível notar que a operação da velocidade realimentada oriunda do GSIP está em torno 80% do valor nominal, constatando a premissa que no sistema de MGT com o controle de velocidade puro, para sistemas conectados à rede, existe um erro de estado estacionário conforme referido por (ZHU *et al.*, 2019).

A segunda análise do sistema da microturbina a gás conectada à rede sem controle de potência mecânica, verificou-se o comportamento dinâmico da potência mecânica. A forma de onda da variável sem o controle é apresentada no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Potência mecânica da MGT (sistema sem controle)



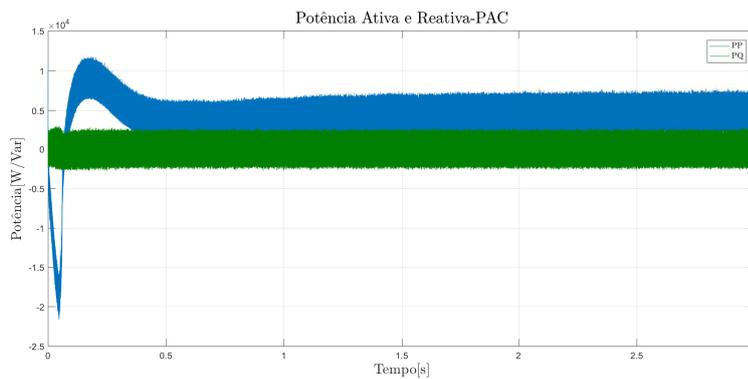
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Como pode ser observado, a resposta dinâmica da potência mecânica possui um forma de onda com perfil oscilatório com uma geração em torno de 0,80 p.u., como esperado para sistema de MGT, ao fazer a análise do sistema controle de velocidade puro, uma vez que a potência mecânica é proveniente do produto da velocidade angular pelo

torque mecânico. Sendo, portanto, possível otimizar a sua operação para que aumente o desempenho do sistema, já que seu comportamento influencia toda a dinâmica do projeto.

O terceiro item a ser analisado foi a potência elétrica entregue à rede elétrica, que está ilustrada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Potência elétrica no PAC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

É possível constatar que a potência ativa obtida é aproximadamente 4 KW, estando na faixa de 50% da capacidade de geração de energia elétrica da microturbina C30. Já a potência reativa é nula conforme projetado. Ainda pelo Gráfico 3, observa-se que nos primeiros segundos o sistema é alimentado pela rede conforme dito anteriormente, pois a máquina opera como motor.

5.3 OTIMIZAÇÃO ALGORITMO SIA

Nesta seção serão apresentados os resultados do algoritmo SIA, que foi executado conforme discutido no capítulo anterior. As simulações foram realizadas no Notebook do fabricante Dell modelo Inspiron 5570, cujas principais especificações são: Intel® Core™ i5-8250U (8ª geração, 8 GB, 2 TB, placa de vídeo AMD Radeon™ 530, os resultados provenientes das simulações são apresentados na seção seguinte.

5.3.1 Simulação do algoritmo SIA-(principais resultados)

Para analisar a viabilidade do modelo simplificado, como proposto na metodologia na subseção 4.3.3, foram realizadas 200 simulações no mesmo. Estas foram divididas igualmente nos subgrupos de análises considerados. Os resultados estatísticos provenientes da simulação do algoritmo SIA no sistema simplificado estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados algoritmo SIA

Parâmetros	25	30	50	100
Convergiu	50%	62%	64%	70%
Não Convergiu	50%	38%	36%	30%
$Tempo_{min}$	72,840 s	89,86 s	130,245s	295,737 s
$Tempo_{max}$	78,129s	98,011 s	199,703 s	360,132 s

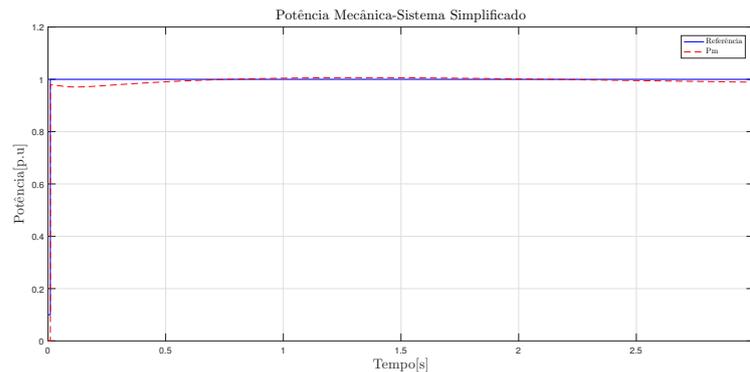
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Pela Tabela 6 é observado o percentual de simulações em que o algoritmo convergiu e o tempo mínimo e máximo de execução do programa em cada um dos grupos considerados. Em todos os casos em que o algoritmo convergiu, as respostas foram testadas e se mostraram efetivas em relação a sintonia do controlador no processo de geração.

Analisando os resultados obtidos na simulação do algoritmo SIA ao modelo simplificado nas diferentes condições de operação, verifica-se que o grupo em que o algoritmo convergiu em maior percentual foi o grupo de $N_{Ab} = 100$, $N_{max_{ger}} = 100$ e $gest=10$, com um tempo considerável de simulação.

Para ilustrar, os resultados obtidos do sistema simplificado quando este convergiu e quando não convergiu para resposta ótima são apresentados nos Gráficos 4 e 5 respectivamente.

Gráfico 4 - Sistema simplificado-resposta ótima

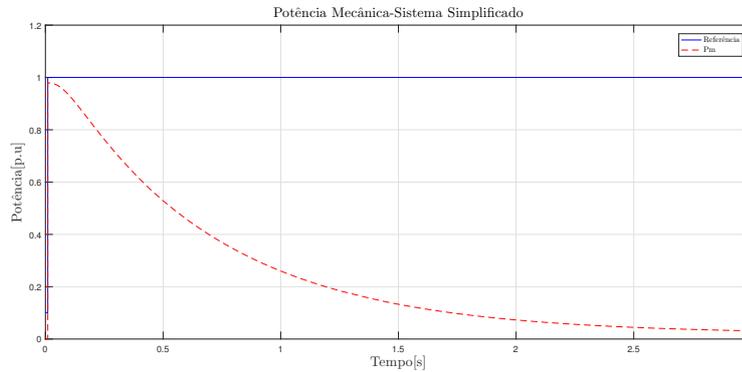


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Como pode ser visto no Gráficos 4, este apresenta a curva quando o sistema convergiu para resposta ótima, a forma de onda obtida seguiu a referência proposta, alcançando-se o objetivo almejado.

Já o Gráfico 5 ilustra a resposta quando o algoritmo não converge, ou seja, o sistema não convergiu e a potência mecânica decaiu até um valor mínimo de operação, não satisfazendo as condições pretendidas.

Gráfico 5 - Sistema simplificado - resposta não convergiu



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

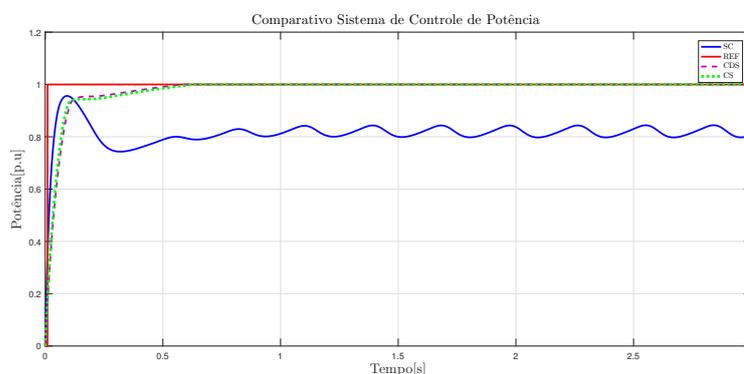
Após testar o algoritmo no modelo SIA ao modelo simplificado de simulação realizou a simulação do sistema completo com o algoritmo, para verificar em quanto tempo o algoritmo SIA é executado e analisar a solução da potência mecânica obtida e compará-la com a da modelo simplificado e então validá-lo.

Para realizar tal simulação utilizou-se os parâmetros $N_{Ab} = 25$, $N_{max_{ger}} = 25$ e $gest=10$. O algoritmo demorou 72 horas para realizar a otimização de sintonia do controlador. A simulação convergiu para solução ótima e os parâmetros encontrados foram: $k_{po} = 13,8$ e $k_{io} = 14,9$.

Como já apresentado, o tempo mínimo de simulação do sistema completo foi de 72 horas, enquanto para o modelo simplificado o menor tempo de execução foi 72,84 segundos. Para realizar a simulação com o grupo que teve o melhor desempenho, o tempo mínimo de simulação é cerca de 290 horas, o que não é viável para prática, desse modo a utilização do modelo simplificado propicia resultados com um tempo considerável de simulação quando comparado ao tempo do sistema completo.

Ainda analisando a potencialidade do modelo simplificado, verificou se os valores k_{po} e k_{io} obtidos por meio da execução do algoritmo no modelo simplificado são capazes de operar conforme os ganhos obtidos na simulação do sistema completo. Para realizar a sintonia do regulador de potência, utilizou-se um dos ganhos que convergiram do grupo quatro. Dentre os valores de sintonia do controlador, foram escolhidos os ganhos $k_{po} = 12,8$ e $k_{io} = 17,7$ para serem inseridos na simulação completa, e dessa forma traçar o comparativo, verificando a potencialidade do modelo simplificado de simulação. Os resultados obtidos da comparação são apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Análise do sistema de controle da potência mecânica



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Analisando o Gráfico 6, a curva em azul é a referência, a curva em vermelho é o sistema sem controle de potência, a curva em roxo tracejada é a implementação do SIA no sistema completo e a curva verde é o resultado da utilização dos ganhos do controlador obtidas por meio do modelo simplificado de otimização, aplicadas ao modelo completo de simulação.

Dessa forma, traçando um comparativo, é possível observar que as formas de onda provenientes da sintonia do controlador do sistema completo (cor verde) e forma de onda (cor roxa) advinda dos ganhos do sistema simplificado apresentaram comportamentos bem similares. Assim, é possível verificar que o modelo simplificado proposto é efetivo para o controle desejado.

E ainda, da análise do Gráfico 6 é possível constatar a eficácia do controlador de potência mecânica proposto, ao comparar as formas de onda do sistema sem controle de potência (curva em vermelho) e as curvas proveniente do controle de potência (curva verde e roxo). Verifica-se que o algoritmo SIA conseguiu otimizar a geração de potência mecânica, anulando o erro de estado estacionário, corroborando o controle proposto e a efetividade do algoritmo para realizar a sintonia do controlador.

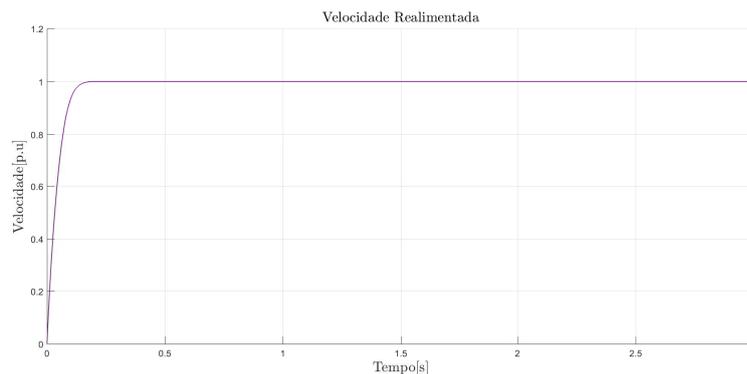
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS

Definido o sistema proposto com o controle de potência pela sintonia por meio do algoritmo de otimização SIA, realizou-se a análise no sistema completo conectado à rede, para verificar a potencialidade para gerar energia. Assim, foi feita a análise de cada uma das variáveis inerentes à geração elétrica proveniente da simulação, as quais descrevem o sistema da MGT conectada à rede, para verificar como o sistema de controle de potência incrementa o conjunto analisado. Os parâmetros averiguados na simulação são aqueles que possuem correlação com a geração elétrica e são descritos a seguir.

5.4.1 Velocidade angular do gerador elétrico.

O primeiro item a analisar foi a velocidade angular proveniente do gerador elétrico, a qual realimenta o controle de velocidade da microturbina a gás e compõe a potência mecânica da mesma. A velocidade angular obtida é ilustrada na Gráfico 7.

Gráfico 7 - Velocidade angular do gerador elétrico



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Como pode ser observado, a velocidade está dentro do valor nominal de operação, em comparação ao sistema sem o controlador de potência, como visto no Gráfico 1. O sistema se comporta sem oscilações e o erro de estado estacionário torna-se praticamente nulo, mostrando a efetividade do controlador proposto.

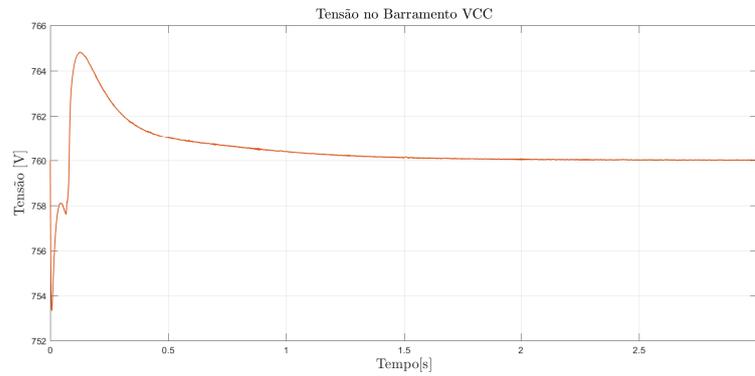
5.4.2 Tensão no barramento CC

O segundo item analisado é o comportamento da tensão do barramento CC, responsável por manter o fluxo de potência do conversor. O seu desempenho é ilustrado no Gráfico 8.

O Gráfico 8 representa a tensão no barramento do conversor *back-to-back*, onde se observa que a forma de onda obtida é uma tensão constante em 760 V, como delineado no projeto de controle do barramento. O *ripple* máximo de tensão é de 1%.

As variações na tensão do barramento acontecerão apenas quando houver um desequilíbrio das potências nos lados CA do conversor. Geralmente ocorrem no regime transitório, quando há diferença entre o valor entregue à rede e o produzido pelo gerador. Como pode observar pelo Gráfico 8 aproximadamente no instante 0,15 segundos ocorre um degrau na curva da tensão do barramento, este fato ocorre ainda no regime transitório quando a máquina está deixando de operar como motor e passando a operar como gerador.

Gráfico 8 - Tensão no barramento CC

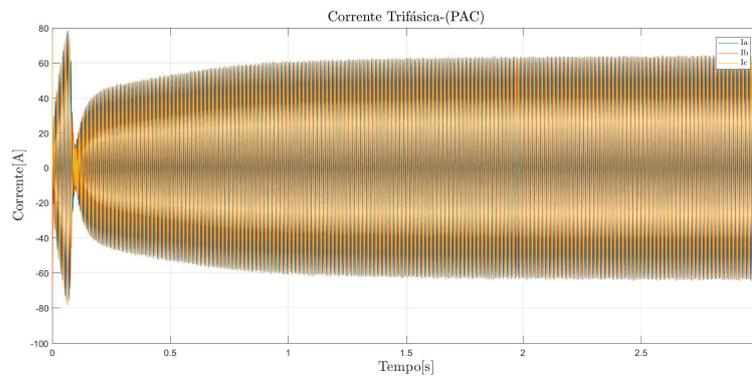


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.4.3 Corrente trifásica injetada no PAC

O terceiro item analisado foi a corrente trifásica no PAC, que apresenta o perfil retratado no Gráfico 9 e 10. O Gráfico 10 exibe a forma de onda da corrente ampliada para uma melhor visualização da mesma.

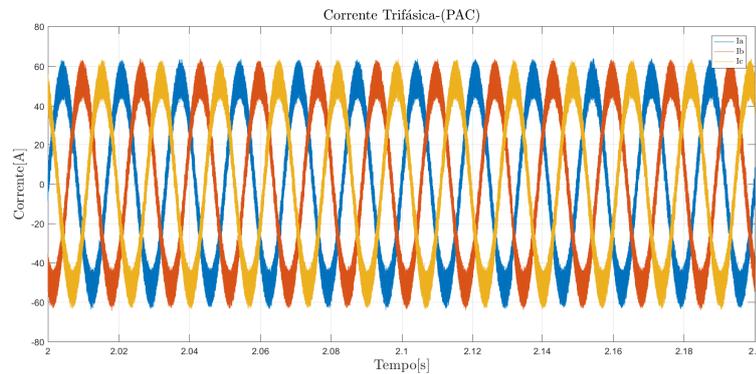
Gráfico 9 - Corrente trifásica no PAC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Analisando o Gráfico 9 é possível observar o comportamento da corrente no transiente inicial do sistema demora cerca de 0,15 segundos no qual a máquina está operando como motor.

Gráfico 10 - Corrente modo ampliado



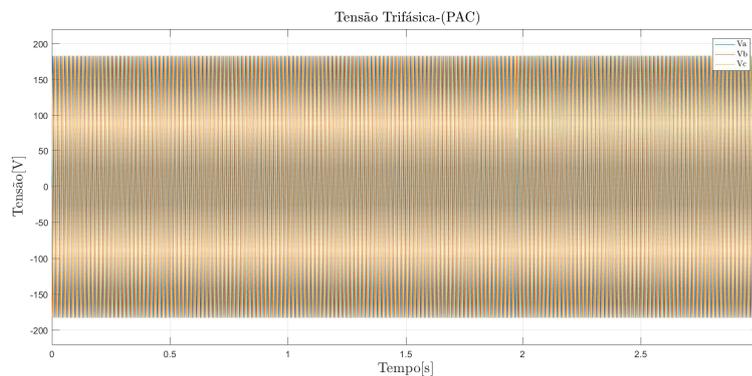
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Já analisando a forma de onda da corrente no PAC por meio do Gráfico 10 no seu modo ampliado e no regime estacionário e possível constatar que a corrente elétrica trifásica está equilibrada, defasada de 120° e com baixa harmônicos, com amplitude igual a 60 A.

5.4.4 Tensão trifásica no PAC

A tensão trifásica no ponto de acoplamento comum (PAC) é o quarto item analisado e apresenta o perfil retratado nos Gráficos 11 e 12, o Gráfico 12 mostra a forma de onda da tensão ampliada.

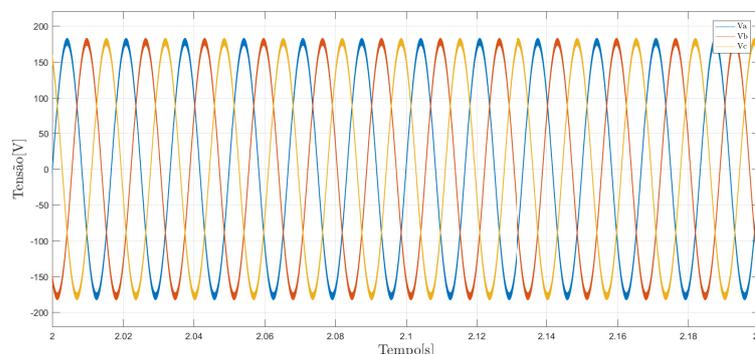
Gráfico 11 - Tensão trifásica no PAC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Como pode ser observado nos Gráficos 11 e 12, a forma de onda da tensão com amplitude igual a 180 V de pico de fase e defasadas em 120° , conforme esperado para o sistema trifásico equilibrado.

Gráfico 12 - Tensão trifásica no PAC - (modo ampliado)

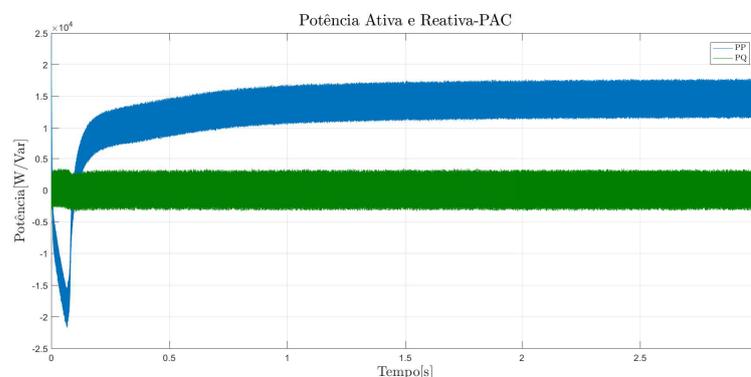


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.4.5 Potência ativa e reativa injetada no PAC

A composição da corrente e da tensão elétrica o ponto de acoplamento comum geram a potência elétrica entregue ao sistema projetado, que está ilustrada no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Potência ativa e reativa no PAC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Pela análise do Gráfico 13 é possível notar que não há componentes reativas sendo injetados na rede, ou seja, a potência reativa é igual a zero como projetado pelo controle do sistema, comprovando a sua eficácia. Já a potência ativa no PAC é aproximadamente igual a 15 KW. O que representa um aumento na eficiência elétrica da microturbina a gás aumentando seu potencial de geração, corroborando a eficácia do controlador proposto.

E ainda, por meio da análise do Gráfico 13 é possível observar como nas outras ilustrações que primeiramente o sistema consome da rede até que a MGT atinga um ciclo completo termodinâmico que seja capaz de alimentar o sistema e assim começar a gerar, conforme foi o objetivo de análise deste estudo.

6 CONCLUSÃO E DISCUSSÕES

Pode-se certificar através dos resultados analisados na seção anterior, que o objetivo almejado nesse estudo foi obtido, os resultados foram contundentes com o que se esperava diante do projeto arquitetado.

Analisando o sistema da microturbina a gás constatou-se que o modelo adotado para modelagem da microturbina proporcionou um resultado satisfatório para geração de energia e que este pode ser adotado para diferentes tipos de microturbina como aferido na literatura. Dessa análise, verificou-se que a dificuldade em adaptar o modelo para outros tipos de microturbina está em correlacionar os parâmetros que representam a dinâmica do protótipo proposto para outro modelo, além de ser necessário aprimorar os sistemas de controles já pré-estabelecidos como foi feito nesse trabalho, no caso do controle de velocidade e de potência mecânica.

A constatação da eficácia do algoritmo proposto se deu por meio da comparação do sistema apenas com os controles de: velocidade, aceleração e temperatura da microturbina, sem a inserção do controle de potência, diante das análises na seção de resultados, foi possível verificar que ao inserir o controle de potência ao sistema o erro de estado estacionário diminuiu, ou seja a potência requerida e a potência gerado tem seu erro minimizado. Dessa forma, há uma redução dos recursos utilizados, como o combustível e ainda torna-se o sistema mais eficaz promovendo uma economia na aplicação do sistema.

O algoritmo SIA projetado para sintonia do controle de potência da MGT, mostrou-se satisfatório quanto a proposta inicial desse trabalho, com a inserção do controlador e a definição adequada dos parâmetros foi possível verificar o comportamento dinâmico da microturbina, que se apresentou estável ao longo do tempo permitindo uma geração mais eficaz e controle mais robusto para o sistema, cumprindo as expectativas pleiteadas.

Da análise dos resultados em relação à resposta do sistema de controle de potência adicional, estes indicam que a estratégia de controle proposta pode atingir os objetivos esperados e é adequada para microturbinas conectadas a sistemas de geração de energia como os sistemas de geração distribuída, principalmente em relação a cogeração qualificada devido ao alto poder calorífico.

E ainda das análises dos resultados desta pesquisa, certificou-se de que o sistema simplificado, no qual foram realizados os testes do algoritmo SIA, apresentou resultados satisfatórios ao ser comparado com o sistema completo, obteve-se respostas similares em um tempo bem melhor de execução.

Em relação ao sistema de eletrônica de potência projetado, foi possível constatar que este foi satisfatório quanto a entrega da energia elétrica nas condições de operação da rede e/ou da carga. A tensão no barramento CC se manteve constante em 760 V e dentro do valor projetado, ou seja, possui o valor mais elevado do que as tensões do lado CA,

permitindo que haja o fluxo bidirecional de potência ativa no sistema.

Em relação ao comportamento da corrente e da tensão entregue à rede, estas atingiram os valores esperados pelo sistema de controle arquitetado. E por meio do fornecimento adequado desses componentes, e alcançou o esperado no que concerne à geração da potência ativa.

Para analisar a geração de energia elétrica entregue à rede elétrica, foi necessário considerar cada parte que compunha o sistema, pois caso uma destas não estivesse em conformidade com o que foi projetado a geração de energia ficaria comprometida.

Foi possível constatar pela comparação da velocidade de saída do gerador em relação à velocidade nominal da microturbina, que o controle do sistema de velocidade da microturbina é fundamental, para que a velocidade da microturbina e do gerador operem em concordância, uma vez que estão conectadas no mesmo eixo de forma a garantir que o sistema opera em sincronismo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, são enumeradas as seguintes propostas de aprimoramentos:

- a) Melhoria nos sistemas de projeto do controle da microturbina C30;
- b) Fazer uma simplificação do sistema da microturbina em funções de transferência de forma global, para reduzir ainda mais o tempo computacional na aplicação do algoritmo SIA;
- c) Fazer com que o sistema opere como uma microrrede, realizando modificações no sistema para que o mesmo também opere na forma *off-grid* (isolada) e com inserção de cargas;
- d) Fazer a modelagem do recuperador de calor da turbina para análise mais eficaz do sistema de cogeração, propondo algoritmos de otimização baseados nas equações termodinâmicas que regem o sistema;
- e) Analisar o conjunto proposto sobre a perspectiva de um sistema trifásico desequilibrado;
- f) Utilizar este modelo em aplicação de sistemas híbridos.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, S.; VAHEDI, A. Dynamic modeling of micro-turbine generation systems using matlab/simulink. **Semantic Scholar**, Teerã, Irã, v. 1, n. 3, p. 146–152, 2004. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3c5f/19214565863df3374892f22c042ad42e6714.pdf>. Acesso em: 25/01/2020.
- ABSOLAR. Energia solar fotovoltaica. **Associação Brasileira de Energia Solar**, Bela Vista, São Paulo, Dezembro 2019. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/deixeasolarcrescer/wpcontent/uploads/2019/12/ohvQK.pdf>. Acesso em: 02/02/2020.
- ALMEIDA, M. d. S. S.; MATOS, B. K. **Development of dynamic modeling of a microturbine for use in distributed generation: analysis in a pilot plant**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica/Automação) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2012.
- ALMEIDA, P. M. **Modelagem e controle de conversores fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados a rede elétrica de distribuição**. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2011.
- ALMEIDA, P. M.; FERREIRA, A. A.; BRAGA, H.; BARBOSA, P. G. Projeto dos controladores de um conversor vsc usado para conectar um sistema de geração fotovoltaico a rede elétrica. In: **Congresso Brasileiro de Automação**. Campina Grande, Paraíba: SBA, 2012. p. 3960–3965.
- ALMEIDA, T.; COSTA, J.; DIAS, C.; FERREIRA, H.; USBERTI, F. Algoritmo de colônia de formigas e sistema imunológico artificial aplicado ao problema de designação generalizada. **Research Gate**, ., Berlim, Alemanha, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication>. Acesso em: 24/01/2020.
- ALMEIDA, T. A.; YAMAKAMI, A.; TAKAHASHI, M. T. Sistema imunológico artificial para resolver o problema da árvore geradora mínima com parâmetros fuzzy. **Pesquisa Operacional**, SciELO Brasil, São Paulo, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 131–154, 2007.
- ANDREOS, R. **Estudo de viabilidade técnica econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo**. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica/Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2013.
- ANEEL. Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. **Agência Nacional de Engenharia Elétrica**, Brasília, Distrito Federal, Abril 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 24/01/2020.
- ANEEL. Geração distribuída. **Agência Nacional de Engenharia Elétrica**, Brasília, Distrito Federal, Setembro 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 23/01/2020.
- ANEEL. Revisão das regras de geração distribuída em consulta pública. **Agência Nacional de Engenharia Elétrica**, Brasília, Distrito Federal, Outubro 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/asset_publicishe/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877. Acesso em: 24/01/2020.

ARRAIS, E. J. **Estratégia de conversor para interligação de sistemas de geração eólica à rede elétrica**. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ASSIS, R.; PILON ANTONIAND DA LUZ, G.; DIAS, L. P.; CITTADIN, T. A.; MADEIRA, T. M.; RAMPNELLI, W. Sistema de cogeração de energia. **Revista Técnico Científica IFSC**, Periódicos IFSC, v. 1, n. 2, p. 474–482, 2012.

BARJA, G. d. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2006.

BENEDETTO, M. D. 5-level e-type back to back power converters a new solution for extreme efficiency and power density. In: IEEE. **2017 13th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)**. Taormina, Itália: IEEE, 2017. p. 341–344.

BERTINOTTI. Guia de cogeração e geração de energia elétrica a gás natural. **GasBrasiliiano**, Araraquara, São Paulo, Abril 2016. Disponível em: <http://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/informacoes-tecnicas/arquivo/guia-de-cogeracao-formatado.pdf>. Acesso em: 23/01/2020.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo, São Paulo: Editora Blucher, 2018. v. 1. 554 p.

CAPSTONE. Capstone microturbines user's manual. **Capstone Turbine Corporation**, Capstone, Fevereiro 2005. Disponível em: https://www.wmrc.edu/projects/BARenergy/manuals/c-30-manuals/400001_C30_C60_MicroTurbine_Users_Manual.pdf. Acesso em: 16/02/2020.

CAPSTONE. Turbine 30. **Capstone Turbine Corporation**, Capstone, Van Nuys, Los Angeles, 2019. Disponível em: <https://www.capstoneturbine.com/products/c30>, Acesso em: 23/01/2020.

CARVALHO, R. C. d. **Análise de uma máquina síncrona de ímã permanente com tensão senoidal**. 76 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CEETA. Tecnologias de micro-geração e sistemas periféricos—tecnologias de aproveitamento de calor. **Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente**, Lisboa, Portugal, Janeiro 2013. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/energProdu/TecAproveitamentoCalor.pdf>. Acesso em: 23/01/2020.

CHAGAS, E. A. **Otimização robusta da confiabilidade de microrredes no modo de operação ilhado**. 110 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, 2018.

COSTA, D. M. **Aspectos técnicos e operacionais do uso de microturbinas conectadas aos sistemas elétricos para geração distribuída de energia**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio grande do Sul, 2010.

CUTRI, R. **Compensação de desequilíbrios de carga empregando conversor estático operando com modulação em largura de pulso**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Energia e Automação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2004.

DALTRO, A. B. V. **Simulação de procedimento de partida de uma turbina a gás operando em ciclo simples**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

EPE. Matriz energética e elétrica. **Empresa de Pesquisa Energética**, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dezembro 2019. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 23/01/2020.

FARIA, V. P. **Modelagem e controle de microturbina a gás do tipo split-shaft**. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2009.

FOGLI, G. A. **Integração de um grupo motor gerador diesel em uma rede secundária de distribuição através de um conversor estático fonte de tensão**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2014.

FORNAZARI FILHO, R. **Otimização de um ciclo Brayton irreversível com regeneração, inter-resfriamento e reaquecimento através de uma função objetivo termoeconômica**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2018.

FRANCA, A. F. R. T.; CASEIRO, L. P. V. d. C. Planejamento e produção de electricidade (cogeração trigeração). **COGEN Portugal**, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/co-trigeracao/Trigeracao.pdf>. Acesso em: 23/01/2020.

GAONKAR, D. N. Performance of microturbine generation system in grid connected and islanding modes of operation. In: **International Conference on Industrial Technology**. National Institute of Technology Karnataka Surathkal India: IEEE, 2006. p. 185–208.

GHADIMI, N.; DANANDEH, A.; GHADIMI, R. Adjustment of pid coefficients in order to control of load power of micro-turbine in island mode using pso. **Research journal of information technology**, Maxwell Science Publishing, v. 3, n. 1, p. 18–22, 2012.

GIVISIEZ, A. G. **Technical and economical evaluation of combined cooling, heat and power technology: a brazilian study case considering different consumers**. 110 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Etétrica) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2018.

GOMES, C. C.; CUPERTINO, A. F.; PEREIRA, H. A. Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on lcl filter. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 81, n. 1, p. 116–135, 2018.

HAUSER, D. **Controle de um sistema fotovoltaico trifásico conectado á rede elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

HEIMER. Microturbina casptone. **Grupo Geradores**, Paulista, Pernambuco, Dezembro 2015. Disponível em:<http://heimer.com.br/v4/br/microturbinas.html>. Acesso em: 23/01/2020.

IVAQUINI, J. **Controle de geradores síncronos com ímã permanentes em aerogeradores sob condições de afundamento de tens ao da rede elétrica**. 146 f. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, Santa Catarina, 2014.

LUCCA, J. d. C. D. **O jardim da minha vida**. São Paulo, São Paulo: Editora Academia, 2017, p.146.

LYSHESKI, S. E. **Electromechanical systems and devices**. United States: CRC Press, 2008. v. 25. 584 p.

MALDONADO, M. A. R. **Modelagem e simulação do sistema de controle de uma micro-turbina a gás**. 149 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica e Computação) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2005.

MARTINS, B. C. E. **Algoritmos bio-inspirado para solução de problemas de otimização**. 194 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2017.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Porto, Portugal: Publindústria, 2006. v. 2. 464 p.

MESQUISTA, D. J. Sistema imuniário-parte ii: fundamentos da resposta imunológica mediada por linfócitos t e b. **Revista Brasileira de Reumatologia**, SciELO Brasil, São Paulo, São Paulo, v. 50, n. 5, p. 552–580, 2010.

MOHAMADI, M.; GHADIMI, N. Designing controller in order to control micro-turbine in island mode using ep algorithm. **Pesquisa Científica e Ensaios**, Citeseer, v. 8, n. 42, p. 2010–2017, 2013.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Sã Paulo, São Paulo: Wiley, 2006. v. 10. 896 p.

MUHAMMAD, H. R. **Electronics handbook: devices, circuits and applications (engineering)**. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2006. v. 10.

NAYAK, S. K.; GAONKAR, D. N. Analysis of microturbine generation system in grid connected-islanding operation. **Renewable Energy Research**, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), Túrquia, v. 2, n. 4, p. 750–757, 2012.

NDIAYE, M. S. **Operação de conversores back-to-back para aproveitamento de energia fotovoltaica**. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

OLIVEIRA, D. C. d. **Diagnóstico de falhas em estruturas isotrópicas utilizando sistemas imunológicos artificiais com seleção negativa e clonal**. 89 f. Tese (Doutorado de Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista de Ilha Solteira, São Paulo, São Paulo, 2019.

OLIVEIRA, J. a. P. J. d. **Geradores síncronos a ímãs permanentes aplicados a aerogeradores: modelagem, obtenção de parâmetros e validação laboratorial**. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Federal de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2018.

PAEPE, W. D.; COPPITERS, D.; ABRAHAM, S.; TSIRIKOGLU, P.; GHORBANIASL, G.; CONTINO, E. Robust operational optimization of a typical micro gas turbine. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 158, n. 1, p. 5795–5803, 2019.

POMÍLIO, J. A. Conversores cc/ca-inversores. **Eletrônica de potência**, Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, Campinas, São Paulo, p. 1–20, 2005. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/%25CAP4.pdf>. Acesso em: 23/01/2020.

RAUBER, J. G. **Avaliação de modelos de microturbina a gás single shaft para estudos de microgeração distribuída com cogeração térmica**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Paraná, 2016.

ROCHA, K. P. **Planejamento de microrredes em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 115 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Juiz De Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2018.

ROWEN, W. I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines. **Journal of Engineering for Power**, IEEE, New York, v. 105, n. 4, p. 865–882, 1983.

ROWEN, W. I. Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME 1992 International gas turbine and aeroengine congress and exposition**. Colônia, Alemanha: IEEE, 1992. p. 1–7.

SALES, L. d. S. **Viabilidade técnico-econômica de sistemas de cogeração para atender a demandas elétrica, térmicas e de refrigeração em aplicações de pequeno e médio porte**. 318 .f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2008.

SANTOS, G. V. **Sistemas de controle aplicado aerogeradores síncronos com conversor back-to-back**. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerai, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2015.

SANTOS, G. V.; CUPERTINO, A. F.; MENDES, V. F.; SELEME, I. Interconnection and damping assignment passivity-based control of a pmsg based wind turbine for maximum power tracking. In: IEEE. **2015 IEEE 24TH International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. Buzios, Rio de Janeiro: IEEE, 2015. p. 306–311.

SANTOS, M. I. C. **Um modelo para a otimização da cogeração de calor e eletricidade em uma planta industrial**. 98 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014.

SCALABRIN, C. R. **Estudo do gerador síncrono de imãs permanentes para uso em geração eólica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, Jonville, Santa Catarina, 2016.

SILVA, A. V. d.; COSTA, P. M. P. Cogeração e trigerção: um caso prático. **ISEP - DEE - Neutro á Terra - Revista técnico-científica**, Periódicos Instituto Superior de Engenharia do Porto, v. 1, n. 9, p. 47–54, 2012.

SILVA, L.; OLIVEIRA, M. M.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, P. M.; TOMIN, M. A. Modeling and digital simulation of a back-to-back converter to integrate a variable speed generator using the open modelica platform. In: IEEE. **Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. Niterói, Rio de Janeiro: IEEE, 2018. p. 1–6.

SILVA, L. N. d. C. **Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais**. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2001.

SOARES, L. T.; PIMENTA, C. M.; JUNIOR, S. I.; SILVA, S. R. Modelagem e controle de um conversor back-to-back para aplicação em geração de energia eólica. In: IEEE. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. Niterói, Rio de Janeiro: IEEE, 2012. v. 4, p. 1–6.

SOARES, L. T. a. F. **Contribuição ao controle de um conversor reversível aplicado a um aerogerador síncrono a imãs permanentes**. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2012.

SUN, T.; LU, J.; LI, Z. L. D. L.; LU, N. Modeling combined heat and power systems for microgrid applications. **Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 9, n. 5, p. 4172–4180, 2017.

TAVAKOLI, M. R. B.; VAHIDI, B.; GAWLIK, W. An educational guide to extract the parameters of heavy duty gas turbines model in dynamic studies based on operational data. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, Teerã, Irã, v. 24, n. 3, p. 1366 – 1374, Agosto 2009.

VELHO, I. M. d. O.; PARISE, J. A. d. R.; PINO, M. F. F. Sistemas de produção simultânea de calor, frio e eletricidade. **Departamento de Engenharia Mecânica**, PUC, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Janeiro 2020. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/pibic/relato&/relatorio/mec/igor.pdf>. Acesso em: 23/01/2020.

VILLALVA, M. G. **Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado á rede elétrica**. 292 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, São Paulo, 2010.

WANG, L.; CHAI, S.; YOO, D.; GAN, L. e. N.; KI. **PID and predictive control of electrical drives and power converters using MATLAB/simulink**. Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2005. v. 10.

WU, B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. **Power conversion and control of wind energy systems**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. v. 76.

WU, M. **Análise teórico-experimental do gerador de indução trifásico diretamente conectado á rede de distribuição elétrica**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2009.

YARAMASU, V.; WU, B. **Model predictive control of wind energy conversion systems**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. v. 76. 464 p.

YAZDANI, D.; BAKHSHAI, A.; JAIN, P. K. G. **Voltage-sourced converters in power systems**. Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2010. v. 34.

ZHU, J.; WANG, X.; XIE, D.; GU, C. Control strategy for mgt generation system optimized by improved woa to enhance demand response capability. **Issue Operation and Control of Power Distribution Systems**, Energies, v. 12, n. 16, p. 3101–3121, 2019.