UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

BRUNA RAMOS ATHAYDES

SIMULAÇÃO DE UMA MICROTURBINA SUBMETIDA A CARGAS PARAMETRIZADAS COM DADOS REAIS

VITÓRIA
2022

BRUNA RAMOS ATHAYDES

SIMULAÇÃO DE UMA MICROTURBINA SUBMETIDA A CARGAS PARAMETRIZADAS COM DADOS REAIS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Bruna Ramos Athaydes**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

_____

Prof. Dr. Danilo de Paula e Silva
Orientador

_____

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Coorientadora

VITÓRIA
2022

BRUNA RAMOS ATHAYDES

SIMULAÇÃO DE UMA MICROTURBINA SUBMETIDA A CARGAS PARAMETRIZADAS COM DADOS REAIS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Bruna Ramos Athaydes**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Aprovada em 15 de agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
DANILO DE PAULA E SILVA
Data: 19/08/2022 09:15:30-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Danilo de Paula e Silva
Instituto Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
JUSSARA FARIAS FARDIN
Data: 19/08/2022 19:10:30-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Documento assinado digitalmente
FLAVIO BARCELOS BRAZ DA SILVA
Data: 19/08/2022 15:00:23-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Flávio Barcelos Braz da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

Documento assinado digitalmente
DANIEL CARLETTI
Data: 19/08/2022 13:58:06-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Daniel Carletti
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico este trabalho à minha família, que foi meu alicerce durante toda a graduação e aos alunos e professores do curso de Engenharia Elétrica da UFES.

RESUMO

As formas de geração de energia e seus respectivos impactos ambientais se tornaram tema recorrente de estudos e pesquisas ao redor do mundo. O desafio atual se concentra na busca por sistemas de geração de energia de alta eficiência e baixa poluição. O uso da microturbina como meio de geração destaca-se por se tratar de uma tecnologia de geração limpa que, associada a outras fontes, pode aproveitar o calor produzido para aumentar a eficiência e produção de energia elétrica. Portanto, este Projeto de Graduação tem como finalidade a pesquisa, modelagem e implementação computacional de um modelo de geração que inclui uma microturbina a gás acoplada a uma máquina síncrona a ímãs permanentes, usada como gerador e um conversor, capaz de diminuir a frequência elevada que é gerada por esse tipo fonte de geração. Uma carga variável será aplicada ao sistema, a fim de validar o funcionamento em cargas parametrizadas com dados reais. O estudo possibilita uma futura aplicação do modelo desenvolvido à microrredes instaladas na UFES, visto que serão utilizados dados de carga referentes à demanda dos prédios da própria universidade, a fim de comprovar a viabilidade da uma futura execução prática. Para desenvolvimento e simulação da proposta foi utilizada a plataforma do *Matlab/Simulink*, pois trata-se de um *software* muito conhecido e bastante utilizado no meio acadêmico.

Palavras-chave: Geração distribuída. Microturbina. Máquina síncrona a ímãs permanentes. Modelagem. Dados reais.

ABSTRACT

The forms of energy generation and their respective environmental impacts have become a recurring theme of studies and research around the world. The current challenge focuses on the search for high-efficiency and low-pollution power generation systems. The use of microturbine as a means of generation stands out because it is a clean generation technology that, associated with other sources, can take advantage of the heat produced to increase efficiency and production of electric energy. Therefore, this Graduation Project aims at research, modeling and computational implementation of a generation model that includes a gas microturbine coupled to a permanent magnet synchronous machine, used as a generator and a converter, capable of reducing the high frequency that is generated by this type of generation source. A variable load will be applied to the system in order to validate operation under real loads. The study enables a future application of the model developed to microgrids installed at UFES, since load data referring to the demand of the university's own buildings will be used, in order to prove the feasibility of a future practical implementation. For the development and simulation of the proposal, the Matlab/Simulink platform was used, as it is a well-known software that is widely used in academia.

Keywords: Distributed generation. Microturbine. Permanent magnet synchronous machine. Modeling. Real data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção média anual de gás natural no Brasil por ano 15
Figura 2 – Esquema das partes de uma microturbina 19
Figura 3 – Esquema de funcionamento de uma microturbina 20
Figura 4 – Modelo da Microturbina 27
Figura 5 – Microturbina com Máquina Síncrona a Ímãs Permanentes 29
Figura 6 – Parâmetros do Bloco Máquina Síncrona em pu 29
Figura 7 – Esquema Equivalente da Máquina Síncrona 30
Figura 8 – Subsistema Controle da Tensão de Campo 32
Figura 9 – Transformada de Clarke 32
Figura 10 – Parâmetros do Bloco Filtro Passa-baixa Discreto 33
Figura 11 – Parâmetros do Bloco de Controle PI 34
Figura 12 – Modelagem do Conversor 35
Figura 13 – Esquemático do Bloco Retificador 35
Figura 14 – Parâmetros do Bloco Retificador 36
Figura 15 – Esquemático do Bloco Inversor 37
Figura 16 – Parâmetros do Bloco Inversor 37
Figura 17 – Subsistema Filtro LC 38
Figura 18 – Subsistema Controle Ressonante de Referência 38
Figura 19 – Parâmetros Internos dos Blocos de Referência Alpha e Beta 39
Figura 20 – Parâmetros do Bloco Gerador PWM 41
Figura 21 – Subsistema de Carga 42
Figura 22 – Ligação da Carga e Medições 43
Figura 23 – Fluxograma do Algoritmo de Variação da Carga 44
Figura 24 – Configurações do Solver do Sistema 45
Figura 25 – Potências Ativa e Reativa para Carga de 50 kW e 20 kVAr 47
Figura 26 – Tensão e Corrente para Carga de 50 kW e 20 kVAr 47
Figura 27 – Potências Ativa e Reativa para Carga de 100 kW e 50 kVAr 48
Figura 28 – Tensão e Corrente para Carga de 100kW e 50kVAr 49
Figura 29– Potências Ativa e Reativa da Primeira Simulação de Carga Variável 50
Figura 30 – Tensão e Corrente da Primeira Simulação de Carga Variável 51
Figura 31 – Potências Ativa e Reativa da Segunda Simulação de Carga Variável 52

Figura 32 – Tensão e Corrente da Segunda Simulação de Carga Variável 52
Figura 33 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 5 Medições..... 53
Figura 34 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 5 Medições 54
Figura 35 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 5 Medições para Dois Edifícios..... 55
Figura 36 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 5 Medições para Dois Edifícios..... 55
Figura 37 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 10 Medições..... 56
Figura 38 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 10 Medições 57
Figura 39 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 61 Medições..... 59
Figura 40 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 61 Medições 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese dos dados de carga do CTXII.....42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros do modelo da microturbina 28
Quadro 2 – Valores da Primeira Simulação de Carga Variável 50
Quadro 3 – Valores da Segunda Simulação de Carga Variável 51
Quadro 4 – Valores da Simulação de Dados Reais com 5 Medições 53
Quadro 5 – Valores da Simulação de Dados Reais com 5 Medições para Dois Edifícios 54
Quadro 6 – Valores da Simulação de Dados Reais com 10 Medições 56
Quadro 7 – Valores da Simulação de Dados Reais com 61 Medições 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CTXII	Centro Tecnológico XII
FT	Função de Transferência
GD	Geração Distribuída
GE	*General Electric*
IEA	*International Energy Agency*
MG	*MicroGrid*
MT	Microturbina
MTG	Microturbina a Gás
PI	Proporcional Integral
PMSG	*Permanent Magnet Synchronous Generator*
PR	Proporcional Ressonante
PU	Por Unidade
PWM	*Pulse Width Modulation*
RAM	*Random Access Memory*
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSD	*Solid-State Drive*
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivos 15
1.1.1 Objetivo Geral 15
1.1.2 Objetivos Específicos 16
1.2 Organização do Trabalho 16

2 REFERENCIAL TEÓRICO 18
2.1 Funcionamento das Microturbinas 18
2.2 Tipos de Microturbinas 20
2.3 Aplicações do Uso de Microturbinas 21
2.4 Modelagem das Microturbinas 22
2.5 Escolha do Gerador 24

3 METODOLOGIA 26
3.1 Modelagem da Microturbina 27
3.2 Modelagem do Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes 28
3.2.1 Controle da Tensão de Campo 31
3.3 Modelagem do Conversor 34
3.4 Modelagem da Carga 41
3.5 Medições Finais do Sistema 43
3.6 Critérios de Operação do Sistema 45

4 RESULTADOS 46
4.1 Simulações com Carga Fixa 46
4.2 Simulações com Carga Variável 49
4.3 Simulações com Cargas Parametrizadas com Dados Reais 53

5 CONCLUSÕES 62

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

APÊNDICE A - DIAGRAMA COMPLETO DE SIMULAÇÃO 67

APÊNDICE B – ALGORITMO DE VARIAÇÃO DA CARGA 68

1 INTRODUÇÃO

O uso de energias renováveis se tornou comum nos últimos anos em decorrência do desenvolvimento tecnológico e sua demanda crescente de energia elétrica. A tônica mundial da sustentabilidade mudou as formas de fornecimento de energia, incentivando pesquisas e otimização do uso de fontes renováveis. De acordo com perspectivas futuras, até 2025 a utilização de energias renováveis corresponderá a 95% do aumento líquido da capacidade global de produção energética (IEA, 2020).

Nesse sentido, surgiu a geração descentralizada ou distribuída (GD), conceito que tem aumentado cada vez mais sua participação na matriz energética mundial, definida pela existência de poucas unidades geradoras produzindo energia para uma grande quantidade de pessoas (ANEEL, 2015). A nova forma de geração permite que cada consumidor possa gerar sua própria energia e se conectar com a rede de distribuição, podendo fornecer ou consumir energia. Esse cenário se tornou possível devido ao aumento do desenvolvimento das energias renováveis e sua maior acessibilidade aos consumidores finais, como o uso de painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, células a combustível e microturbinas aplicadas ao conceito de cogeração, processo que aproveita a liberação de calor para produção de mais energia, aumentando a eficiência da geração (BARJA, 2006).

Com a difusão da GD, surgiram as chamadas microrredes (MGs), redes locais de distribuição e consumo de energia elétrica compostas por uma ou mais fontes de geração, que podem operar de forma isolada e/ou conectada à concessionária local (SILVA, 2020). Em relação ao contexto da sustentabilidade, as fontes renováveis na integração de MGs se tornaram prioritárias devido à diversos incentivos governamentais. No Brasil, o sistema de compensação de energia elétrica, regulamenta o uso da microgeração distribuída aos consumidores concedendo permissão para instalação de geradores próprios (ANEEL, 2016), atenuando a demanda da concessionária e reduzindo o preço da fatura do consumidor.

Uma das fontes de geração que está sendo muito utilizada atualmente é a Microturbina (MT). Trata-se de um recurso de geração distribuída relativamente novo e de rápido crescimento, apropriada para geração em pequena escala devido ao tamanho compacto e início rápido. Suas vantagens incluem durabilidade, baixos custos iniciais e de manutenção, baixo nível de emissão

e capacidade de operação com combustíveis alternativos, incluindo gás natural, biogás e diesel (ASGHARIAN e NOROOZIAN, 2017). Além disso, as microturbinas possuem grande capacidade de potência se comparada ao seu tamanho e quando alimentadas a gás podem emitir baixas quantidades de gases poluentes. Sua geração é instantânea, tornando-a excelente para atender cargas de ponta, emergências, bem como necessidades básicas de energia em regiões remotas.

Um grande exemplo do uso desse tipo de tecnologia é encontrado na ArcelorMittal, siderúrgica multinacional produtora de aço (*CREEK, 2014*). Desde 2010, a Arcelor desenvolve um projeto de cogeração de energia em um sistema que utiliza gases provenientes da pirólise da madeira, além de biomassa residual obtida a partir de material descartado, como folhas, galhos, raízes e cascas. Os gases e o material residual são transportados para um queimador e sua combustão ativa uma turbina para produção de energia elétrica. Segundo a equipe técnica responsável pelo projeto, a maioria do potencial energético da madeira é lançado na atmosfera na forma de gases no processo de carbonização. Dessa forma, por meio das microturbinas tem sido estudado o aproveitamento do potencial energético para geração de energia elétrica e a consequente redução dos gases de efeito estufa.

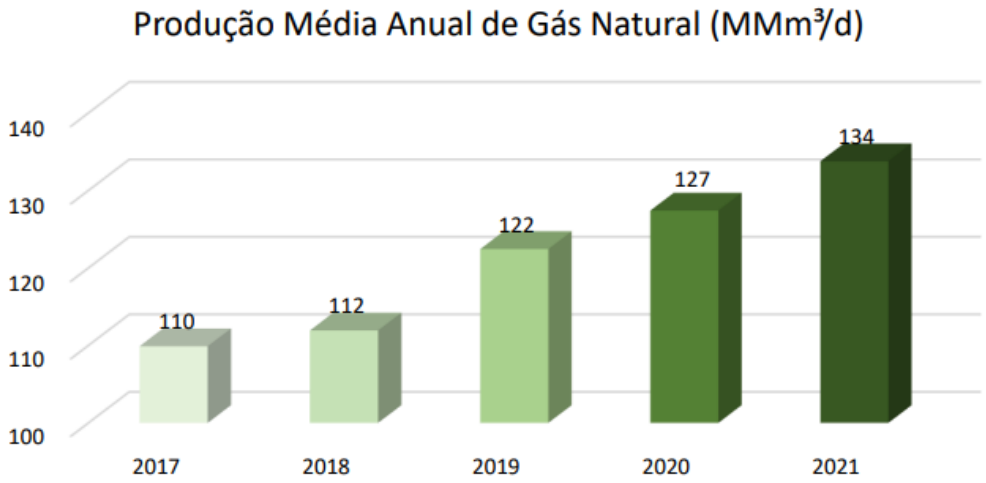
Como pode ser observado, a microgeração de energia se tornou uma alternativa para o aumento da eficiência, confiabilidade do sistema elétrico e incentivo à sustentabilidade. Porém, as fontes de microgeração necessitam de um combustível versátil, com alto potencial energético e com baixa emissão de poluentes, o que auxilia na preservação da natureza. Um combustível acessível, abundante e viável economicamente, capaz de atender a essas características, é o gás natural.

Um desafio considerável da aplicação do gás natural é a utilização de gasodutos para fazer todo o transporte e abastecimento do gás, devido à limitação de infraestrutura em algumas regiões do país e do alto investimento inicial necessário para essa implementação. Apesar disso, a produção de gás natural no Brasil tem apresentado um relevante crescimento, indicando o uso de Microturbinas a gás (MTG) como fonte promissora de energia.

Possuidor de importantes reservas de combustíveis fósseis, o país tem aumentado consideravelmente o volume de extração desse combustível ao longo dos anos, atingindo uma

produção média anual recorde de 134 milhões de m³/dia em 2021, superando em 5% o registro feito no ano anterior (ANP, 2021). A Figura 1, a seguir, mostra o considerável crescimento da produção de gás natural no Brasil nos últimos cinco anos.

Figura 1 – Produção média anual de gás natural no Brasil por ano



Fonte: ANP/SIGEP (2021).

Portanto, dando continuidade ao estudo emergente das fontes alternativas de energia elétrica, este projeto de graduação procura compreender o funcionamento das microturbinas, para desenvolvimento da modelagem de uma microgeração para aplicação em cargas parametrizadas com dados reais. A simulação deste sistema contribuirá para comprovação da aplicabilidade e eficiência desse tipo microgeração para funcionamento em microrredes instaladas em prédios universitários localizados na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é o estudo e modelagem computacional de uma microturbina a gás, utilizando uma máquina síncrona a ímãs permanentes como gerador, com simulação de seu funcionamento para aplicação em cargas parametrizadas com dados reais, em ambiente *Matlab/Simulink*.

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Estudo, modelagem e simulação de uma microturbina a gás;
b) Integração de uma máquina síncrona a ímãs permanentes usada como gerador;
c) Adaptação e controle do sistema para operação de forma isolada da rede elétrica;
d) Aplicação de cargas elétricas reais, que refletem a demanda de potência de prédios universitários da UFES;
e) Obtenção de resultados da simulação para avaliar o desempenho do sistema microturbina-gerador síncrono com carga variável.

1.2 Organização do Trabalho

Este projeto está dividido em 5 seções, incluindo introdução, referencial teórico, metodologia, resultados e conclusões.

A seção 1 apresenta uma introdução a respeito dos assuntos abordados pelo trabalho, como os conceitos básicos da geração distribuída, a definição das microrredes e a utilização das microturbinas como fonte promissora de geração. Nesta seção também estão incluídos os objetivos gerais e específicos para a realização deste trabalho.

Na seção 2 é apresentada a literatura de referência de onde foram retirados os embasamentos teóricos de todas as técnicas empregadas durante o projeto. São mostradas as etapas de funcionamento das microturbinas, assim como os tipos de microturbinas existentes e suas aplicações, além da bibliografia sobre a modelagem da microturbina e os artigos que justificam a escolha do tipo de gerador.

A seção 3 explica detalhadamente a metodologia empregada durante o desenvolvimento deste projeto, apresentando a descrição da modelagem de todas as partes do modelo que inclui, principalmente, a microturbina, o gerador, o conversor e a carga. Também é apresentado o diagrama produzido no *Simulink* com a descrição de todos os blocos, ajustes e parâmetros utilizados para seu correto funcionamento, assim como os critérios de operação do sistema.

A seção 4 exibe os resultados obtidos através da simulação do diagrama para diferentes tipos de carga. São realizadas simulações com valores de carga fixa, carga variável e, finalmente, valores de medições de cargas parametrizadas com dados reais. Com isso, é possível comparar os gráficos resultantes e validar a operação do modelo desenvolvido.

Finalmente, a seção 5 possui a conclusão do projeto, onde são apresentadas algumas considerações a respeito do resultado das simulações efetuadas, verificando a viabilidade e legitimidade do uso de microturbinas como forma de contribuição para a geração de energia elétrica no Brasil. Também são expostas sugestões de trabalhos futuros que podem incrementar o que foi desenvolvido, a fim de auxiliar na obtenção de melhores resultados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A pesquisa desenvolvida nesta monografia está relacionada a um tema atual em nível acadêmico e tecnológico. A bibliografia foi baseada em assuntos relacionados a microturbinas em processos de geração de energia elétrica, bem como sua aplicação para cargas parametrizadas com dados reais. Neste tópico, serão apresentadas sínteses de artigos e estudos relacionados às microturbinas e as respectivas contribuições para o atual projeto.

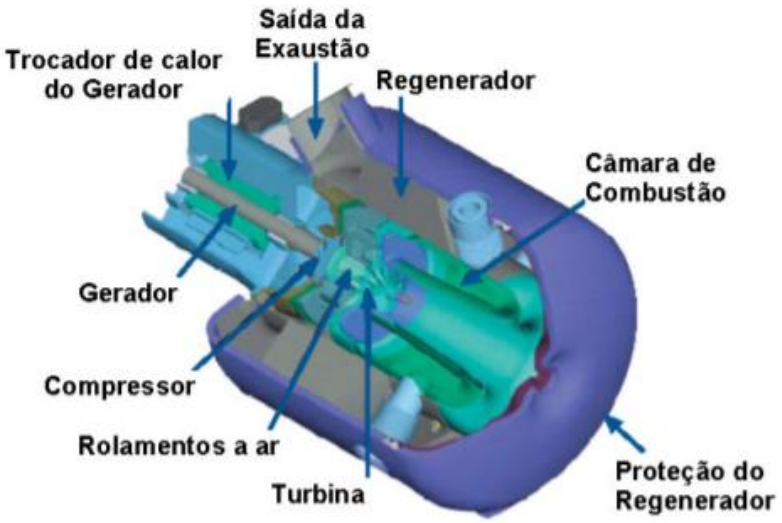
2.1 Funcionamento das Microturbinas

As microturbinas são turbinas a gás de pequeno porte, que possuem baixos custos de manutenção e baixa emissão de gases poluentes, com capacidade de geração entre 30 kW e 500 kW e altas velocidades de rotação, podendo alcançar 120000 rpm (CRUZ, 2006). Surgiram, inicialmente, com o objetivo principal de utilização em aeronaves e helicópteros e, posteriormente, foram adaptadas para uso doméstico.

Delgado (2016) define as microturbinas com características próprias, apesar de seu princípio de funcionamento ser semelhante ao das turbinas convencionais. Entre as principais características, destacam-se o tamanho reduzido, a possibilidade de apresentar eixo único (que representa certa simplicidade de fabricação e manutenção), rolamentos a ar (fator que evita a contaminação de lubrificantes com produtos da combustão e garante uma maior vida útil do equipamento, além de reduzir os custos de manutenção), alta velocidade (rotação nominal na faixa de 30.000 e 120.000 rpm), necessidade do uso de conversores CC/CA para conversão da frequência e possibilidade do uso de um recuperador de calor para alcançar níveis maiores de eficiência.

De maneira semelhante, Barja (2006) destaca que a principal característica das microturbinas é o arranjo de um compressor radial simples com uma turbina radial e um gerador montado sob um eixo, com a utilização de um recuperador para pré-aquecer o ar de combustão e aumentar a eficiência do sistema. Os componentes da microturbina são: compressor, câmara de combustão, turbina, gerador elétrico, trocador de calor, regenerador e rolamentos a ar. A seguir, pode-se observar, na Figura 2, a ilustração de uma microturbina e seus principais elementos.

Figura 2 – Esquema das partes de uma microturbina

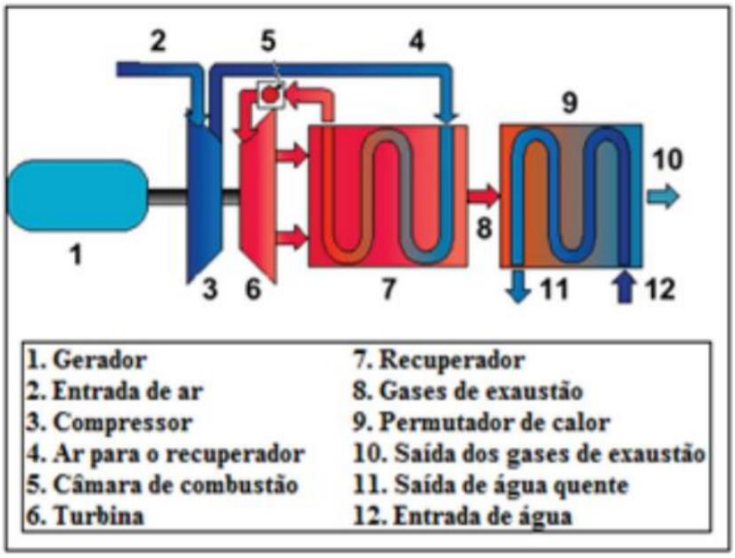


Fonte: Barja (2006).

As microturbinas possuem o princípio de funcionamento baseado no Ciclo de Brayton aberto. Nesse sistema, de acordo com Delgado (2016), o ar é recebido e conduzido até o compressor, onde ocorre o aumento da pressão. A utilização de um recuperador de calor, também conhecido como regenerador, é muito comum para realizar o aproveitamento da energia presente nos gases de escape, a fim de aquecer o novo ar proveniente da entrada. Esse processo é chamado de pré-aquecimento e é utilizado para elevar a eficiência do sistema, pois aquece o ar antes que chegue na câmara de combustão.

Em seguida, ocorre a mistura do ar com o combustível dentro da própria câmara de combustão e o calor liberado pelo processo provoca o aumento da temperatura e da pressão interna. A mistura ar-combustível passa pela turbina, onde ocorre sua expansão e, consequentemente, a transmissão de energia mecânica para o alternador, permitindo o acionamento do compressor e do gerador. A água inserida no permutador de calor tem como objetivo auxiliar no resfriamento do sistema e pode ser reaproveitada em outros processos ou equipamentos. Todo o processo de funcionamento que foi descrito pode ser melhor observado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de funcionamento de uma microturbina



Fonte: Delgado (2016).

Diversos benefícios são encontrados no uso das microturbinas, fato que induz o aumento do volume de estudos e aplicações. Esses benefícios foram listados por Guerra (2017) e são mencionados a seguir:

- Baixos níveis de ruídos e vibrações;
- Baixo custo e pequena necessidade de manutenção;
- Baixos níveis de emissões de poluentes;
- Modularidade (as conexões da microturbina com a rede/carga são feitas de modo "*plug-and-play*", podendo se conectar diretamente em paralelo até 20 microturbinas sem necessidade de equipamentos adicionais);
- Flexibilidade de combustível;
- Boa eficiência: entre 30 a 33%;
- Dimensões reduzidas e simplicidade de instalação.

2.2 Tipos de Microturbinas

Existem dois tipos de microturbinas mais conhecidas e comercializadas atualmente, uma delas é chamada de *Single-shaft*, do inglês: turbina de eixo único, e a outra é conhecida por *Split-shaft*, que significa turbina de eixo partido.

A configuração *Single-shaft* possui um único eixo que integra o compressor, a turbina e o gerador, e possui capacidade de girar em altas velocidades, como 50000 a 120000 rpm. Sabe-se que, durante a partida, o gerador opera como motor, portanto, é necessário que exista uma alimentação externa vinda da própria rede ou de baterias, para atuar no momento da partida. Esse modelo de microturbina possui menor quantidade de peças móveis em decorrência do uso de um único eixo, sendo assim, gera menos ruídos e não requer o uso de caixa redutora de velocidades (VIEIRA, 2012).

Por outro lado, a configuração *Split-shaft* possui o compressor e o gerador acoplados a diferentes eixos e cada um desses componentes possui uma turbina associada. Este modelo de microturbina possui operação em torno de 3000 rpm, o que caracteriza menor velocidade em relação ao outro modelo. Além disso, possui vida útil mais longa e realiza menos esforços mecânicos. Porém, gera maior poluição sonora, causada pela maior quantidade de peças móveis e possui maior custo, quando comparada à *Single-shaft* (VIEIRA, 2012).

2.3 Aplicações do Uso de Microturbinas

Em 1970, estudos trouxeram a possibilidade de utilização de microturbinas em automóveis, a fim de substituir os motores de combustão interna. Segundo Matos e Almeida (2012), no início da década de 80, o interesse pela geração de energia estacionária aumentou e trouxe consigo outras ideias de aplicações para as microturbinas. A partir da década de 90, com o surgimento das novas tecnologias para veículos híbridos e geração distribuída, houve a validação do uso das microturbinas no cenário de geração de energia elétrica.

Um relevante exemplo de aplicação foi empregado no aterro de Lopez Canyon, em Los Angeles. Neste caso, o gás proveniente da decomposição do lixo passa por um tratamento para ser utilizado na alimentação de 50 microturbinas de 30 kW, que operam em paralelo. Essa é uma instalação reconhecida no mundo por sua grande dimensão (HAMILTON, 2003).

Outro exemplo de aplicação destacado por Hamilton (2003), trata da utilização da microturbina para aumento da produtividade em estufas. Além da geração de energias elétrica e térmica que podem ser utilizadas nas instalações, um dos produtos gerados pela microturbina possui alta

concentração de CO_2 e baixa taxa de contaminação, fato que permite o uso desse gás no interior da estufa, resultando no aumento da produção de até 40% na plantação.

Dessa forma, as microturbinas podem ser utilizadas conectadas junto à rede para melhoria da confiabilidade da energia elétrica, atendimento de cargas em horário de pico e, também, podem ser usadas em sistemas de cogeração. Devido ao desenvolvimento tecnológico, as microturbinas podem usar uma ampla variedade de combustíveis em seu funcionamento, facilitando a conexão com outras fontes de energia, para aumento da eficiência de geração. São muito adequadas para aplicações comerciais como restaurantes, hotéis, hospitais ou condomínios residenciais, pois são capazes de gerar, além da energia elétrica, água quente para ser utilizada em banheiros, piscinas, cozinhas, entre outros.

2.4 Modelagem das Microturbinas

O primeiro modelo de turbina a gás foi desenvolvido e patenteado por Rowen (1983) e, desde então, outros autores procuram fazer melhorias e desenvolver novas aplicações baseadas no modelo por ele proposto. Como é o caso de Al-Hinai e Feliachi (2002), que criaram um modelo dinâmico e simplificado de uma microturbina a gás, do tipo *single-shaft*, operando de forma isolada para utilização em geração distribuída, desenvolvido na plataforma *Matlab/Simulink*. O modelo inclui um controle de velocidade e de combustível da microturbina acoplada a um gerador síncrono a ímãs permanentes (PMSG), e um conversor CA/CC, utilizado com objetivo de diminuir a frequência elevada que é gerada pelas microturbinas a gás desse tipo.

Outro artigo baseado no modelo de Rowen (1983) é apresentado por Guda et al. (2005), que produz o modelo de uma microturbina de eixo único acoplada a um PMSG, com a regulagem da potência de saída do sistema, podendo ser usado de forma isolada ou conectada à rede. A simulação foi feita no *Matlab/Simulink*, os componentes da microturbina incluem controles de velocidade, controle de temperatura e controle de aceleração. A fim de validar o modelo, foram aplicadas diferentes condições de carga sobre o sistema.

Por outro lado, Gaonkar e Patel (2006) apresentam um modelo simplificado de um sistema MTG-PMSG, que opera de forma isolada da rede. A simulação utiliza os componentes disponíveis na biblioteca *simpowersystems* do *Matlab/Simulink* e pode ser usado como

ferramenta para entendimento dos aspectos operacionais das microturbinas. O sistema ainda apresenta um retificador não controlado, um inversor modulado por PWM e os harmônicos gerados pelo inversor são filtrados por um filtro LC. São aplicadas cargas isoladas ao sistema e o desempenho da MTG pode ser observado nos resultados da simulação.

Dentre estudos mais recentes, encontrou-se a modelagem e simulação da geração de microturbinas tanto para conexão com a rede, quanto para operação em ilhamento (ASGHARIAN; NOROOZIAN, 2016). Nesse estudo, a modelagem de um sistema de microturbinas inclui uma nova topologia de filtro passivo chamada RRC, usada para obter ondulações livres de saída. A simulação é feita em ambiente *Matlab/Simulink*, onde é utilizado um PMSG, juntamente com um retificador CA/CC, um conversor *boost* e um inversor CC/CA. No modo isolado há uma carga não linear e no modo conectado à rede há uma carga variável. Os resultados mostram o desempenho satisfatório de operação do sistema.

Para o desenvolvimento da MTG deste estudo, o artigo de Zhu (2002) foi de extrema importância, pois apresenta um modelo simplificado de dinâmica lenta para microturbinas, a fim de analisar seu comportamento em operação isolada. O estudo considera condições normais de operação, onde não são incluídos fatores como: partida, desligamento, falhas e perda de potência. O modelo não inclui o recuperador, pois trata-se apenas um trocador de calor para elevar a eficiência do motor. Os controles de temperatura e desaceleração da MTG podem ser omitidos do modelo, pois sob condições normais do sistema eles não são relevantes e, como a maioria das microturbinas não possui reguladores, não é considerado um modelo de regulador. Para Zhu (2002), as microturbinas de eixo dividido (*split-shaft*) podem ser modeladas como uma turbina a gás de eixo único de ciclo simples. Portanto, a microturbina é modelada como modelo GAST, produzida pela *General Electric*, e os sistemas de controle são simplificados como uma função de controle de potência do tipo proporcional-integral (PI).

Além das referências já citadas, este trabalho de graduação foi principalmente baseado no modelo desenvolvido em uma dissertação (DILL, 2008) que implementa, através do software *Matlab/Simulink*, uma microrrede composta por células combustíveis e microturbinas a gás e utiliza versões com um gerador síncrono a ímãs permanentes e um gerador assíncrono, a fim de comparar os diferentes resultados. Uma das configurações propostas trata-se de um sistema MTG-PMSG de 300 kVA, onde o combustível empregado é o gás natural. Primeiramente, foi

feito um estudo das fontes operando de forma isolada, a fim de avaliar o comportamento do perfil da tensão e, posteriormente, o sistema é conectado a uma rede de distribuição de energia para serem feitas análises dinâmica e transitória. A MTG utilizado nessa dissertação é do tipo GAST, desenvolvido pela *General Electric*, e baseado no modelo simplificado citado anteriormente (ZHU, 2002), com uma diferença na escolha dos modelos de geradores, pois a dissertação faz uso dos blocos de máquinas síncrona e assíncrona extraídos da biblioteca *SimPowerSystems*, disponível no *Matlab/Simulink*.

Portanto, o artigo de Zhu (2002) e a dissertação de Dill (2008) foram as principais referências utilizadas para análise e comparação dos modelos desenvolvidos nesta monografia, sendo tomados como base para validar o modelo e os resultados da microturbina a gás integrada ao gerador síncrono a ímãs permanentes.

2.5 Escolha do Gerador

A escolha do tipo de gerador para ser conectado à microturbina foi baseada no estudo das referências sobre o assunto, que em sua maioria utilizam uma máquina síncrona a ímãs permanentes para atuar como gerador. A seguir são apresentadas algumas citações de artigos que analisam o comportamento e o desempenho das fontes de GD, capazes de justificar a escolha realizada.

De acordo com Zhu (2002), a escolha da máquina elétrica associada depende do tipo de microturbina escolhida. Segundo o artigo, geralmente são utilizados geradores de imãs permanentes para microturbinas do tipo *single-shaft* e alternadores convencionais (geradores síncronos e assíncronos) para as microturbinas do tipo *split-shaft*.

Além disso, um estudo realizou a comparação do funcionamento de máquinas síncronas e assíncronas utilizadas em sistemas de geração distribuída, a fim de analisar os impactos dos geradores quando conectados à rede de distribuição. Características como a tensão em regime permanente, a estabilidade da tensão, as perdas elétricas e o comportamento da tensão em casos de curto-circuito foram os principais levados em consideração. Assim, os resultados mostraram que os geradores síncronos controlados por tensão geram melhor desempenho da rede e permitem a elevação da capacidade máxima permissível de geração distribuída. Além disso, o

estudo mostrou que durante a ocorrência de curto-circuito as fontes associadas a um gerador assíncrono não conseguem fornecer corrente de falta de forma sustentada, sendo melhor utilizados nos casos de redes com restrições da capacidade de curto (FREITAS et al, 2005).

Diversos outros autores utilizam a máquina síncrona a ímãs permanentes em seus estudos de microturbinas, como é o caso de Al-Hinai e Feliachi (2002), que desenvolveram um modelo MTG-PMSG, em ambiente *Matlab/Simulink*, em conjunto com um conversor CA/CC e um inversor CC/CA, utilizados para reduzir o alto valor de frequência gerado pela microturbina a gás utilizada. Assim como é o caso de Azmy (2003), que modela uma MT composta por um gerador a imãs permanentes em conjunto com um cicloconversor, que é responsável pela regulação da frequência e da tensão da máquina.

Portanto, o gerador elétrico utilizado para ser conectado ao eixo da microturbina modelada no atual projeto é um gerador síncrono a imãs permanentes, pois geralmente é o modelo utilizado pela literatura. Apesar desse tipo de gerador apresentar desvantagens quanto à necessidade do uso de uma malha de controle e um conversor para regular a frequência e os parâmetros de saída, seu uso se torna o mais apropriado para este trabalho, devido à extensa quantidade de estudos já realizados nessa área que utilizam o mesmo.

3 METODOLOGIA

Toda a modelagem desenvolvida neste trabalho foi feita no SIMULINK, pois trata-se de uma ferramenta gráfica composta por blocos customizáveis que facilitam a simulação e a análise de sistemas dinâmicos. A ferramenta também permite total integração com o resto do ambiente *Matlab*, que é um *software* de programação amigável, muito conhecido e bastante utilizado no meio acadêmico.

Primeiramente, foi montado o modelo da microturbina do tipo *split-shaft* e acoplado a ela uma máquina síncrona retirada da biblioteca do *Simpowersystems*, disponível no *Matlab/Simulink*. Os parâmetros do bloco da máquina síncrona foram ajustados devidamente para que funcionasse como um gerador síncrono a ímãs permanentes.

Então, conectou-se uma carga trifásica na saída do gerador e foram feitos testes com valores variados, a fim de observar o comportamento do sistema funcionando em modo "*stand alone*", ou seja, quando conectado com a carga isoladamente. Porém, a variação dos valores de carga provocou oscilações na tensão de saída e variações na velocidade do gerador. Dessa forma, viu-se a necessidade de implementar um sistema de controle de tensão para evitar esse tipo de variação ocasionado pela alteração do valor de carga.

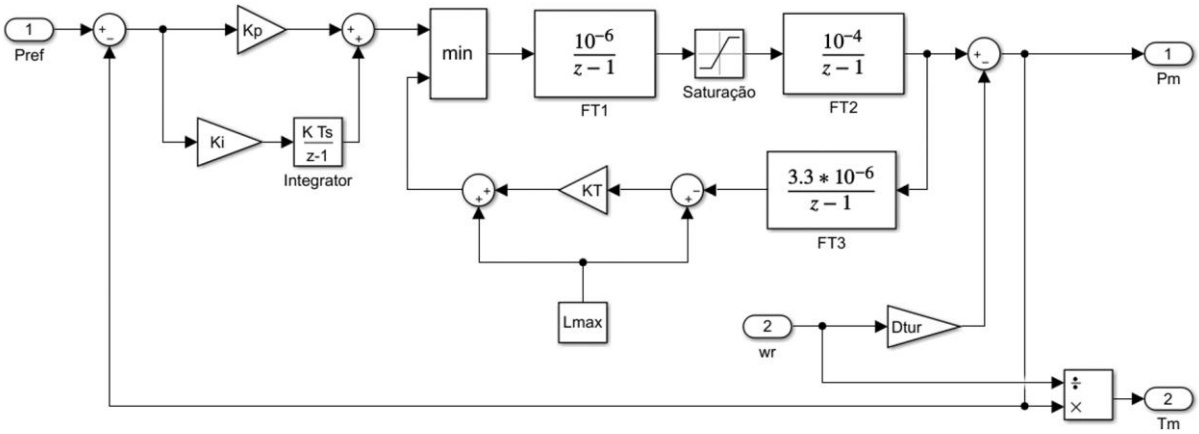
Para isso, foi modelado um conversor utilizando as ferramentas retiradas da biblioteca *Simpowersystems*. Como a microturbina fornece energia na forma alternada em seus terminais, o conversor inclui a implementação de um retificador, que transforma a tensão alternada em tensão contínua, porém essa tensão na saída do retificador precisa voltar novamente a forma senoidal. Portanto, é utilizado um inversor para desempenhar esta função, assim como para ajustar a frequência de saída necessária para atender as condições da carga, definida em 60 Hz.

Finalmente, com a modelagem de todas as etapas envolvidas no sistema de geração, foram feitas simulações com um valor de carga fixa e com a variação da carga através de medições coletadas de um prédio universitário, a fim de validar o funcionamento da microturbina submetida a cargas parametrizadas com dados reais. O diagrama de blocos completo do sistema proposto neste projeto está disposto no Apêndice A.

3.1 Modelagem da Microturbina

A microturbina utilizada neste projeto de graduação é um modelo simplificado, como é geralmente usado em estudos na área de sistemas de potência, dadas as limitações computacionais e de implementação de simulação. Trata-se de uma microturbina a gás, do tipo *split-shaft*, que utiliza o modelo GAST desenvolvido pela *General Electric* (GE). Como o principal interesse é na função de controle de potência, então os sistemas de controle da microturbina são simplificados como uma função de controle de potência real do tipo proporcional-integral (PI) (ZHU, 2002). A figura a seguir mostra o modelo utilizado da microturbina baseado na literatura (DILL, 2008; ZHU, 2002).

Figura 4 – Modelo da Microturbina



Fonte: Produção do próprio autor.

O modelo apresentado na Figura 4 possui como entradas a potência de referência *Pref* e velocidade *wr*. Na entrada de potência foi aplicado um degrau unitário e na entrada da velocidade foi inserida uma realimentação da velocidade de saída do gerador, conforme será mostrado mais adiante.

O controlador PI disposto no início do modelo, com ganho proporcional *Kp* e integral *Ki*, faz a compensação do desvio da potência gerada em relação a potência medida. O bloco *min* seleciona o menor valor entre as entradas e o entrega como saída, fato que permite a atuação do limitador de carga em casos necessários.

As funções de transferência FT1 e FT2 representam o funcionamento das válvulas do sistema de alimentação de combustível e o bloco de Saturação limita a posição da válvula entre valores

mínimo e máximo. FT3 é a função de transferência da malha de controle de carga e KT é o ganho desta malha. As constantes Lmax e Dtur correspondem respectivamente ao limite de carga e a constante de amortecimento (coeficiente de atrito).

O diagrama possui duas saídas que representam a potência e o torque mecânicos. A saída em potência (*Pm*) será injetada no gerador síncrono a imãs permanentes, detalhado na próxima seção. A seguir, o Quadro 1 indica os valores dos parâmetros presentes no modelo da microturbina.

Quadro 1 – Parâmetros do modelo da microturbina

Parâmetro	Representação	Valor
Kp	Ganho Proporcional do PI	1,0
Ki	Ganho Integral do PI	1,08
K	Ganho do Integrador	1,0
Ts	Tempo de Amostragem	10 µs
Vmax	Valor máximo de Saturação	1,5
Vmin	Valor Mínimo de Saturação	-0,1
KT	Ganho da malha de controle de Carga	1,0
Lmax	Limite de Carga	1,2
Dtur	Constante de Amortecimento	0,03

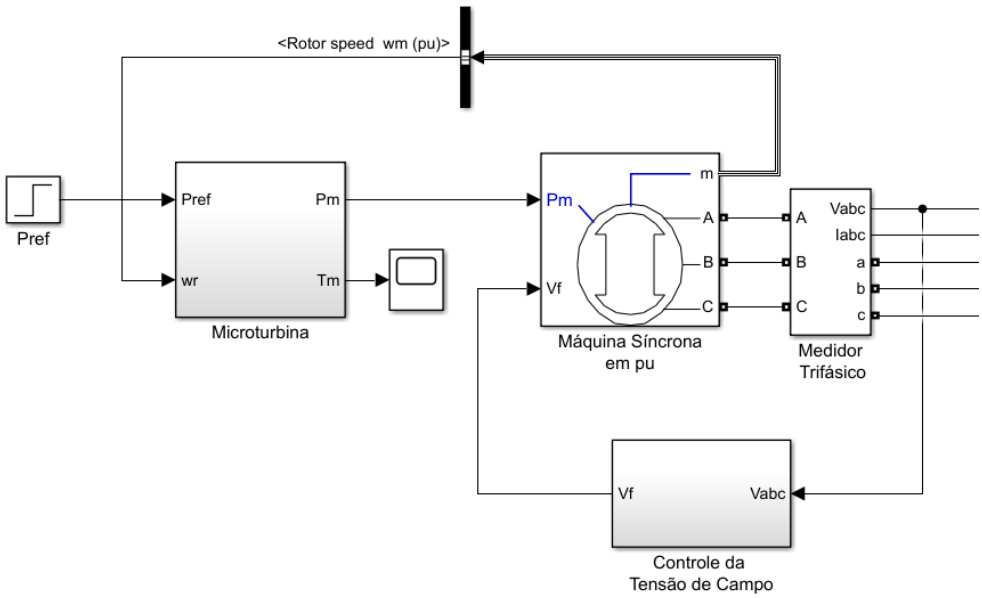
Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 Modelagem do Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes

O gerador síncrono a imãs permanentes foi representado por um bloco de uma máquina síncrona tradicional com parâmetros em pu (por unidade), obtido da caixa de ferramentas do *SimPowerSystems*. Para modelar este bloco como uma máquina síncrona a imãs permanentes, foi necessário reduzir os parâmetros da máquina síncrona convencional em um terço, visto que o entreferro das máquinas síncronas a imãs permanentes é maior que os das máquinas síncronas tradicionais (DILL, 2008).

A Figura 5 mostra o modelo da máquina síncrona, que possui como entrada a potência mecânica (*Pm*) proveniente da saída da microturbina e um controle da tensão de campo (*Vf*). As saídas são injetadas em um medidor trifásico, que determina as tensões e correntes trifásicas instantâneas do sistema e a velocidade do gerador (*wm*) é realimentada na microturbina, representada por um subsistema contendo os blocos da Figura 4. Todos os valores de potência de referência do modelo são positivos e a velocidade inicial é ajustada para 1 pu.

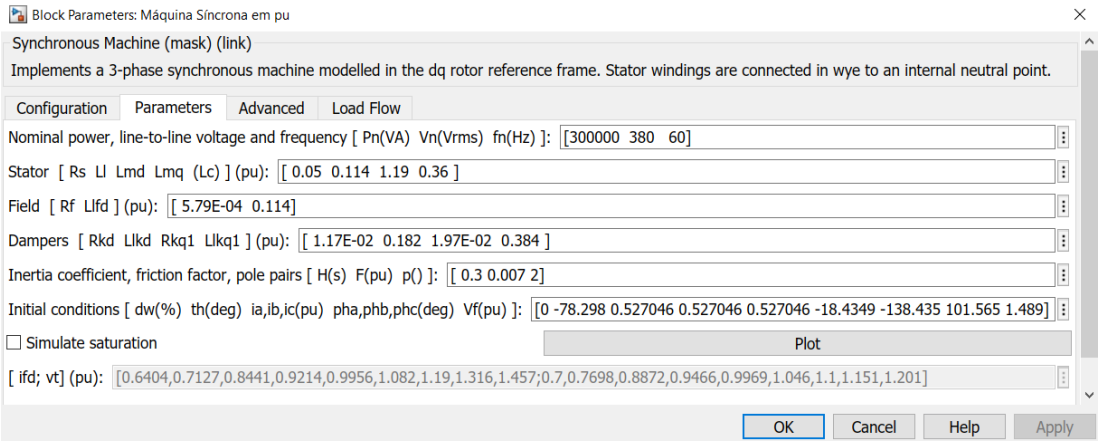
Figura 5 – Microturbina com Máquina Síncrona a Ímãs Permanentes



Fonte: Produção do próprio autor.

A máquina síncrona a imãs permanentes foi modelada para operar em 380 V e 60 Hz, com capacidade de gerar até 300 kW, a velocidade nominal é 1800 rpm e possui 4 polos. Os parâmetros usados para a configuração da máquina encontram-se detalhados na Figura 6.

Figura 6 – Parâmetros do Bloco Máquina Síncrona em pu



Fonte: Produção do próprio autor.

O bloco da máquina síncrona pode funcionar como motor ou como gerador, dependendo do sinal da potência mecânica. Para sinal positivo atua como gerador e para sinal negativo atua como motor. A parte mecânica da máquina é representada por um sistema de segunda ordem e a parte elétrica é representada por um sistema de sexta ordem, que considera o efeito dos

enrolamentos do estator, do sistema de excitação e dos enrolamentos amortecedores no comportamento dinâmico (MATHWORKS, 2018).

O circuito equivalente do modelo é representado por um sistema de eixos *dq0* rodando com a mesma velocidade do rotor. Todos os parâmetros do rotor estão referidos no estator e são representados de acordo com a seguinte notação:

d, *q*: grandezas dos eixos d e q;

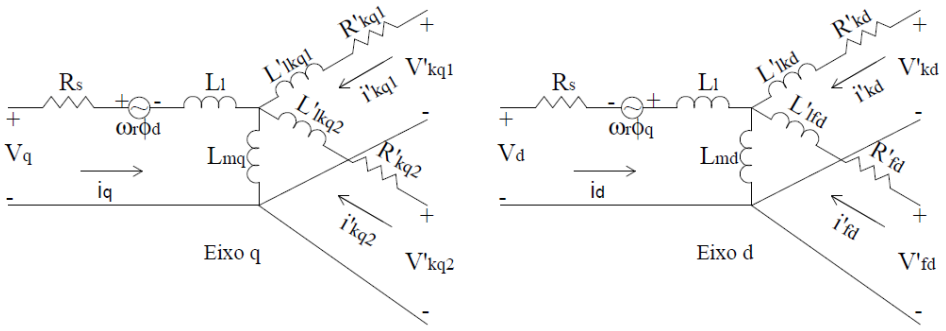
r, *s*: grandezas do rotor e estator;

l, *m*: indutâncias próprias e de magnetização;

f, *k*: grandezas dos enrolamentos de campo e amortecedores.

Dessa forma, o esquema equivalente de cada eixo definido para o modelo da máquina síncrona está representado a seguir:

Figura 7 – Esquema Equivalente da Máquina Síncrona



Fonte: MathWorks (2018).

O esquema da Figura 7 fornece as seguintes equações das tensões:

$$V_d = R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt}\varphi_d - \omega_r \varphi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt}\varphi_q - \omega_r \varphi_d \quad (2)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} \cdot i'_{fd} + \frac{d}{dt}\varphi'_{fd} \quad (3)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} \cdot i'_{kd} + \frac{d}{dt}\varphi'_{kd} \quad (4)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + \frac{d}{dt}\varphi'_{kq1} \quad (5)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + \frac{d}{dt}\varphi'_{kq2} \quad (6)$$

Como no modelo de uma máquina síncrona a imãs permanentes não existem os enrolamentos amortecedores, as equações de tensão (4), (5) e (6) são iguais a zero.

Os respectivos fluxos (φ) das expressões anteriores de (1) a (6), são dados por:

$$\varphi_d = L_d \cdot i_d + L_{md}(i'_{fd} + i'_{kd}) \quad (7)$$
$$\varphi_q = L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i'_{kq} \quad (8)$$
$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} \cdot i'_{fd} + L_{md}(i_d + i'_{kd}) \quad (9)$$
$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} \cdot i'_{kd} + L_{md}(i_d + i'_{fd}) \quad (10)$$
$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + L_{md} \cdot i_q \quad (11)$$
$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + L_{md} \cdot i_q \quad (12)$$

Em resumo, essas equações representam a componente elétrica do modelo da máquina síncrona implementado no *Matlab/Simulink* (MATHWORKS, 2018). A parte mecânica da máquina pode ser representada pela seguinte equação:

$$\frac{d}{dt}\Delta\omega_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_D \cdot \Delta\omega_r) \quad (13)$$

Em que:

$\Delta\omega_r$ é o desvio de velocidade síncrona;

H é a constante de inércia entre o rotor e a carga;

T_m é o torque mecânico;

T_e é o torque elétrico;

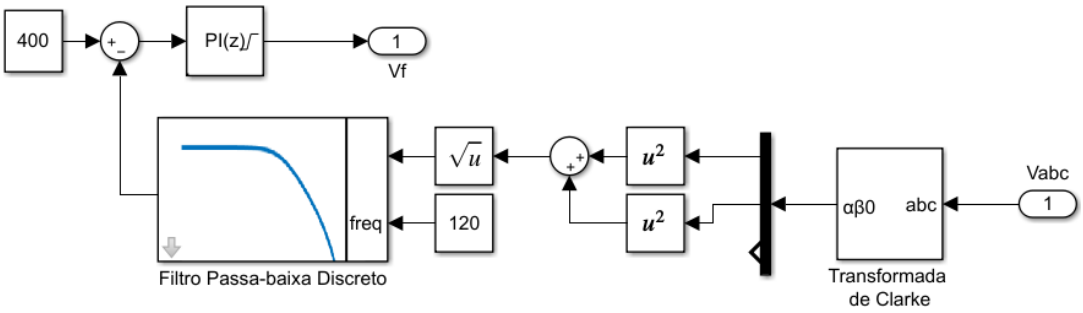
K_D é o coeficiente de atrito ou de amortecimento.

Portanto, a Figura 6 e as equações (1) a (13) descrevem o modelo do bloco da máquina Síncrona em pu utilizada neste projeto.

3.2.1 Controle da Tensão de Campo

Segundo a dissertação de Dill (2008), a tensão de campo para esse modelo poderia ser considerada constante e igual a 1,489 pu, porém os experimentos realizados mostraram que seria necessário implementar uma malha de controle para *Vf*, devido às características do atual projeto e à variação de carga acoplada ao sistema, para simular cargas parametrizadas com dados reais. O subsistema de controle pode ser observado na Figura 8, a seguir.

Figura 8 – Subsistema Controle da Tensão de Campo



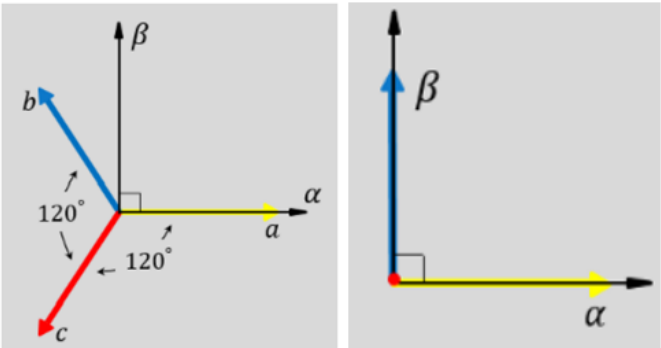
Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que o subsistema recebe como entrada a tensão de realimentação vinda da saída do gerador (*Vabc*) e, para preparar o sinal a ser controlado, deve ser aplicada a transformada de Clarke no mesmo.

O bloco Transformada de *Clarke*, também conhecido como transformada *alpha-beta*, converte os componentes de um sistema trifásico de referencial *abc*, no domínio do tempo, em componentes de referencial *αβ0* estacionário. O bloco preserva as potências ativas e reativas do sistema no referencial *abc* e gera uma versão invariante de potência da transformada de Clarke. Para um sistema equilibrado, o componente zero é igual a zero (MATHWORKS, 2018).

A Figura 9 mostra a direção dos eixos magnéticos dos enrolamentos do estator no referencial *abc* e no referencial estacionário *αβ0*, resultando nos componentes *α*, *β* e zero equivalentes no referencial estacionário.

Figura 9 – Transformada de Clarke



Fonte: MathWorks (2018).

O bloco implementa a transformada através da seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{14}$$

Em que:

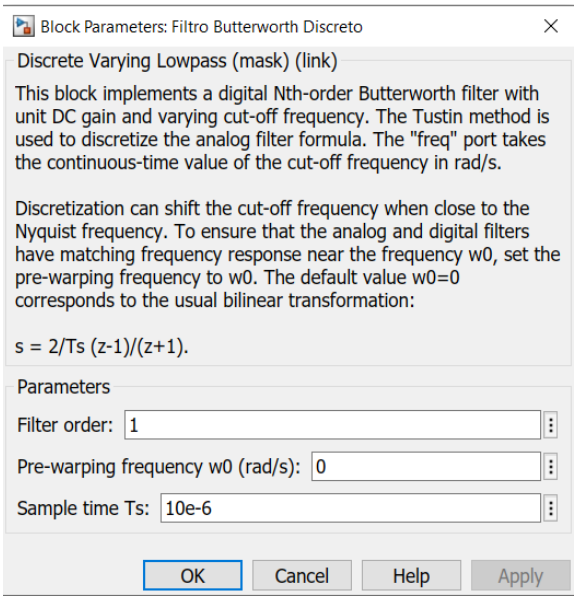
a, b e c são os componentes do sistema trifásico no referencial *abc*;

α e β são os componentes do sistema de dois eixos no referencial estacionário;

0 é o componente zero do sistema de dois eixos no referencial estacionário.

Posteriormente, é calculado o vetor resultante a partir das componentes *alpha* e *beta* do sinal transformado, para que seja devidamente filtrado. O bloco *Filtro Passa-Baixa Discreto* implementa a discretização de um filtro *Butterworth* de ordem *N* de tempo contínuo. O resultado é um filtro digital com ganho CC unitário e frequência de corte variável (MATHWORKS, 2018). As entradas são o sinal proveniente da tensão e a frequência de corte, em rad/s, definida por uma constante de valor 120. Os parâmetros de ordem do filtro passa-baixa, frequência de pré-deformação e tempo de amostragem foram definidos conforma a Figura 10.

Figura 10 – Parâmetros do Bloco Filtro Passa-baixa Discreto

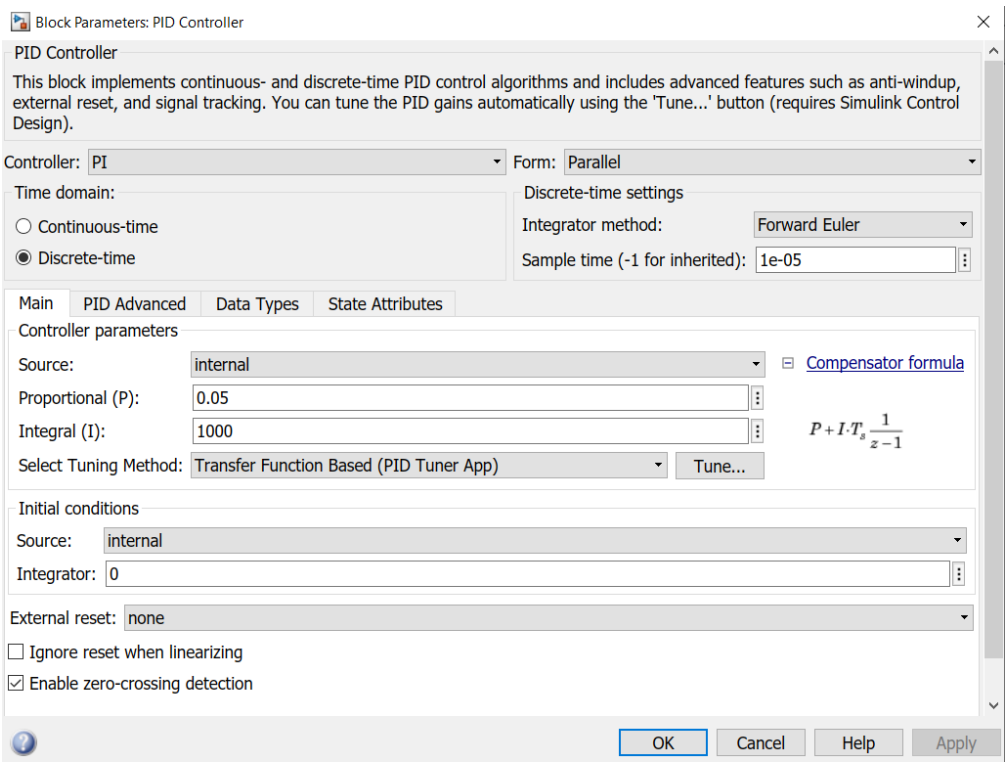


Fonte: Produção do próprio autor.

Em seguida, o sinal de saída proveniente do filtro é aplicado a uma realimentação negativa, em conjunto com uma constante representativa de 400 V. Tal constante foi definida experimentalmente com base na tensão de linha nominal do gerador. Finalmente, a tensão resultante da realimentação é inserida em um controlador PI, gerando a tensão de campo desejada.

O bloco PI é um controlador configurado para atuar como proporcional-integral simulado em tempo discreto, onde os ganhos *Kp* e *Ki* foram ajustados para 0,05 e 1000. A Figura 11 mostra os parâmetros internos do bloco e como foi configurado.

Figura 11 – Parâmetros do Bloco de Controle PI



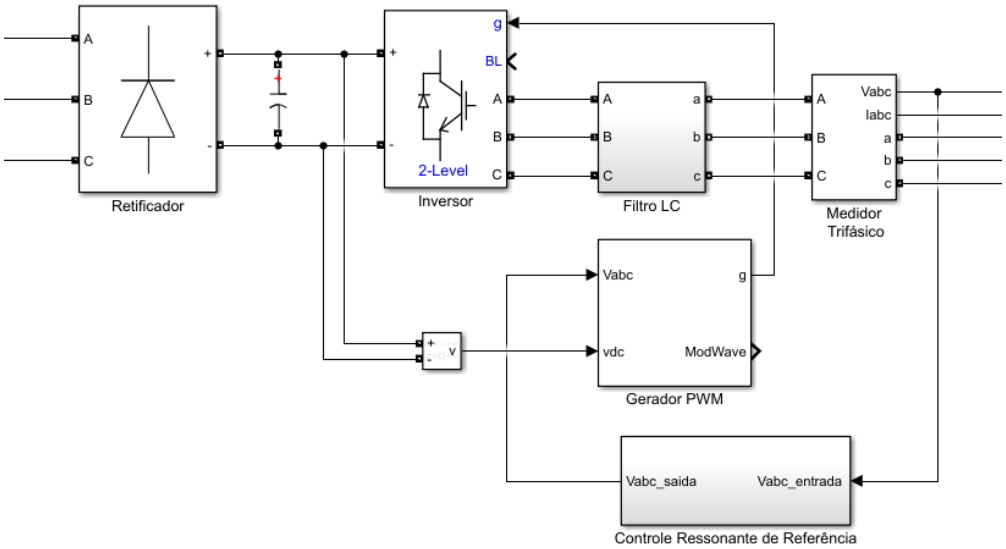
Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 Modelagem do Conversor

A modelagem do conversor inclui uma ponte retificadora a diodo com seis pulsos, um filtro capacitivo que evita flutuações de tensão ajustado com valor de 50 mF, um inversor comutado a IGBT, um filtro LC para eliminação de harmônicos, um controlador Proporcional Ressonante (PR) da tensão de referência e um gerador de sinal PWM. Os blocos Retificador, Inversor e

Gerador PWM foram retirados da caixa de ferramentas do *SimPowerSystems* e a Figura 12 apresenta o modelo do conversor elaborado no SIMULINK.

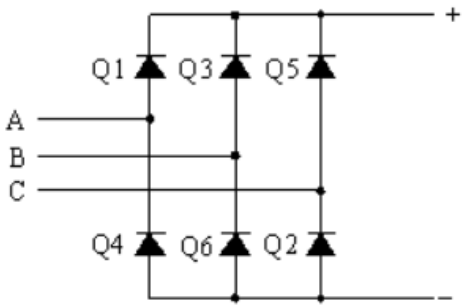
Figura 12 – Modelagem do Conversor



Fonte: Produção do próprio autor.

O modelo do Retificador é representado por um bloco de ponte universal e constitui-se de seis chaves a diodo, que transforma o sinal alternado do gerador em sinal contínuo. O esquemático interno do retificador pode ser representado pela Figura 13, a seguir.

Figura 13 – Esquemático do Bloco Retificador



Fonte: MathWorks (2018).

Com a discretização do sistema, o bloco da ponte universal requer a especificação dos parâmetros de Resistência *Snubber* (*Rs*) e Capacitância *Snubber* (*Cs*), que devem ser calculados com base nas inequações abaixo:

$$Rs > 2 \cdot \frac{Ts}{Cs} \tag{15}$$

$$Cs < \frac{Pn}{1000 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot Vn^2} \tag{16}$$

Onde,

Pn é a Potência nominal (VA);

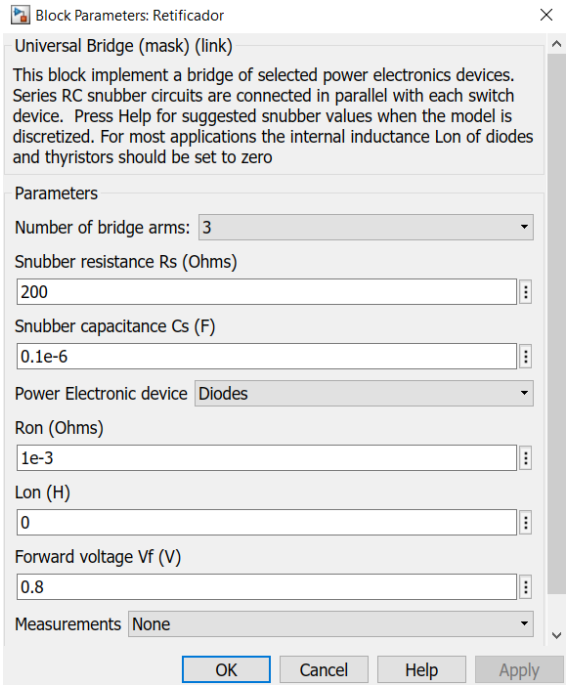
f é a frequência fundamental (Hz);

Vn é a Tensão nominal (Vrms);

Ts é o Tempo de amostragem (s).

Através dos ajustes de *Rs* e *Cs*, a estabilidade numérica da simulação discreta é garantida (MATHWORKS, 2018). O dispositivo de eletrônica de potência seleciona o tipo de comutação realizada pelo conversor, que no caso do retificador, é a diodo. Os parâmetros *Ron* e *Lon* representam, respectivamente, a resistência e a indutância internas do retificador, sendo que o valor de *Lon* foi ajustado para zero porque a simulação é discretizada (MATHWORKS, 2018). E, finalmente, a tensão *Vf* representa a tensão de cada diodo. Todos esses parâmetros podem ser melhor visualizados na Figura 14, abaixo.

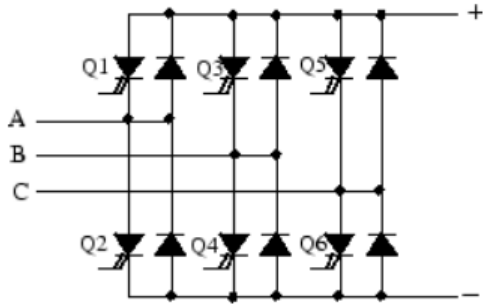
Figura 14 – Parâmetros do Bloco Retificador



Fonte: Produção do próprio autor.

Por outro lado, para a modelagem do Inversor foi utilizado um bloco de conversor de energia trifásico de dois níveis, ajustado para atuar no modo *switching devices*, que representa o modelo de um dispositivo de comutação, formado com seis chaves de potência conectadas em ponte trifásica com comutação forçada a IGBT/Diodo e controladas por pulsos de disparo produzidos por um gerador PWM. Este modelo fornece os resultados de simulação mais precisos (MATHWORKS, 2018). O esquemático interno do Inversor está representado pela Figura 15.

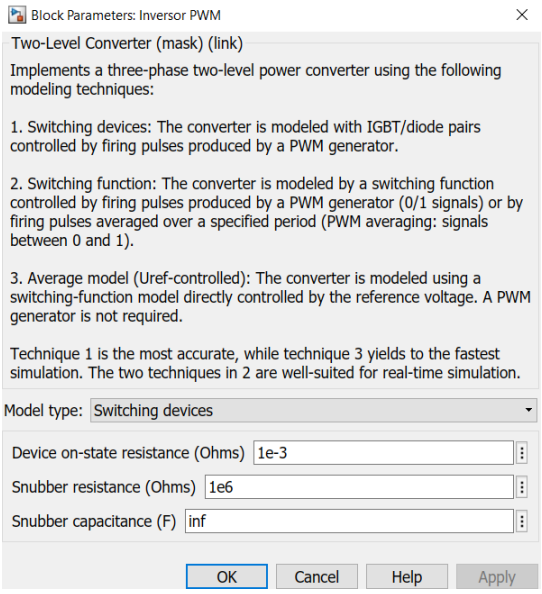
Figura 15 – Esquemático do Bloco Inversor



Fonte: MathWorks (2018).

Assim como no modelo do Retificador, o Inversor possui os parâmetros *Rs* e *Cs*, definidos pelas inequações (15) e (16). Porém, o valor de *Cs* foi ajustado para infinito, a fim de eliminar os transitórios elétricos do modelo (DILL, 2008). A resistência interna dos dispositivos de comutação foi mantida com o valor padrão definido pela documentação do MathWorks. A seguir, todos os parâmetros do bloco do Inversor estão dispostos na Figura 16.

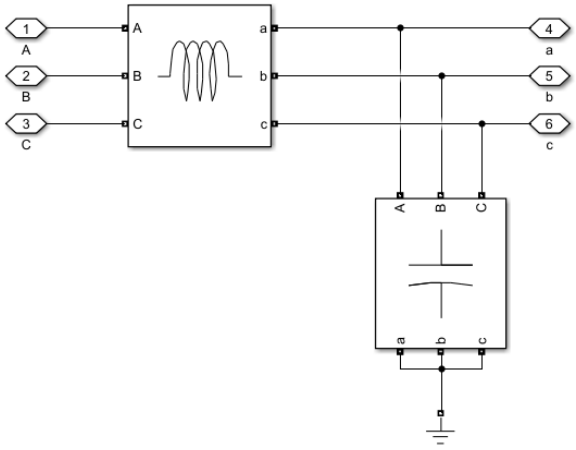
Figura 16 – Parâmetros do Bloco Inversor



Fonte: Produção do próprio autor.

O subsistema do filtro LC foi representado pelo diagrama mostrado na Figura 17 e seus parâmetros definidos por meio de uma indutância de 1 mH e uma capacitância de 100 µF.

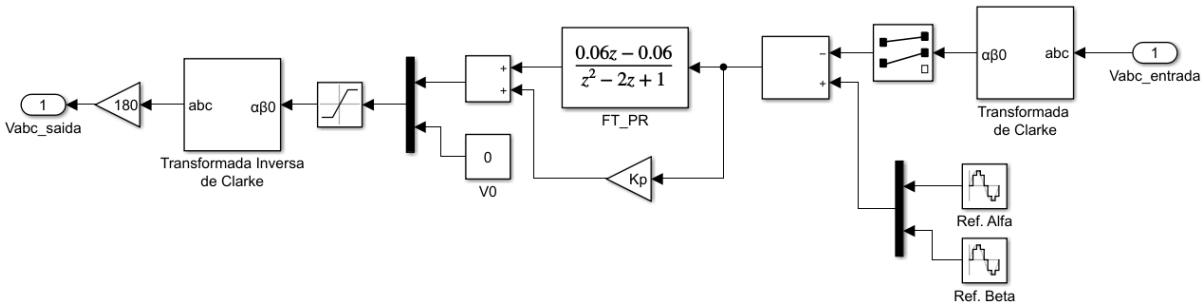
Figura 17 – Subsistema Filtro LC



Fonte: Produção do próprio autor.

O subsistema do Controle Ressonante de Referência possui como entrada o sinal da tensão trifásica em pu (*Vabc_entrada*), proveniente da saída do controlador e medido pelo bloco Medidor Trifásico da Figura 12. O diagrama de blocos referente a este subsistema está exibido na Figura 18, a seguir.

Figura 18 – Subsistema Controle Ressonante de Referência

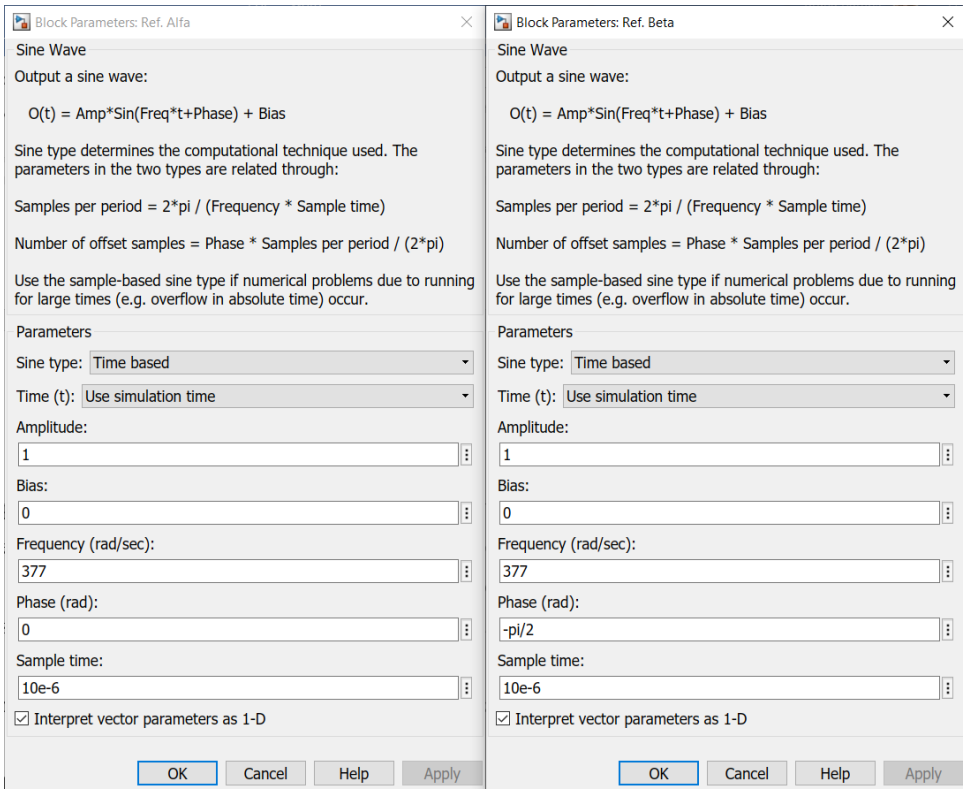


Fonte: Produção do próprio autor.

Então, o sinal de entrada de tensão trifásica é transformado em um sistema de eixo *Vαβ0*, por meio do bloco de Transformada de Clarke, que também foi utilizado no subsistema de Controle da Tensão de Campo, com funcionamento explicado anteriormente. As componentes *Vα* e *Vβ* do sinal são selecionadas e comparadas com seus valores de referência representados pelos blocos de geração de onda senoidal *Ref. Alpha* e *Ref. Beta*. Ambos blocos possuem as mesmas

configurações, diferenciando-se apenas do ângulo de fase da onda, como pode ser visto na Figura 19, a seguir.

Figura 19 – Parâmetros Internos dos Blocos de Referência *Alpha* e *Beta*



Fonte: Produção do próprio autor.

Posteriormente, o erro gerado pela diferença de tensão na comparação, é corrigido por um controlador do tipo PR, correspondente à função de transferência (*FT_PR*) e ao ganho *Kp*. O uso deste tipo de controlador quando comparado ao controle PI convencional, pode superar duas desvantagens bem conhecidas do controle PI, que incluem a incapacidade de rastrear uma referência senoidal com erro de estado estacionário zero e a baixa capacidade de rejeição de perturbação.

Devido a um ganho infinito na frequência fundamental, o controlador PR pode atingir alto desempenho tanto no rastreamento de referência senoidal quanto na rejeição de distúrbios (CHA et al, 2009). Um controlador PR ideal aproximado é dado por:

$$G_s(s) = K_p + \frac{2K_i\omega_{cut}s}{s^2+2\omega_{cut}s+\omega_0^2} \quad (17)$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot 60rad/s \quad (18)$$

Onde,

Kp e *Ki* são as constantes de ganho;

ω_{cut} é a frequência de corte;

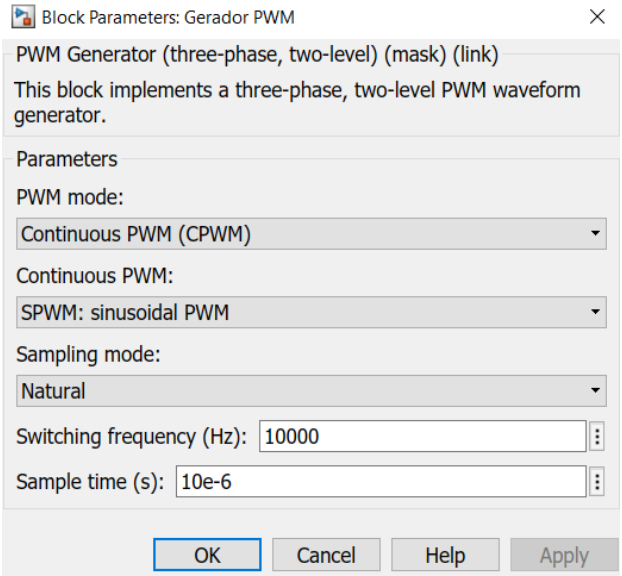
ω_0 é a frequência da rede.

Baseado na literatura, os valores utilizados para calcular o PR foram *Kp* = 15, *Ki* = 200 e ω_{cut}=15 rad/s (CHA et al, 2009). Os parâmetros da função de transferência foram discretizados, gerando os valores presentes no bloco *FT_PR* da Figura 18.

Dessa forma, o sinal corrigido é novamente combinado com a referência *V0* e limitado por um bloco de saturação com limites máximo e mínimo iguais a 2 e -2. O sinal proveniente é, então, transformado novamente para a referência abc, através do bloco de Transformada Inversa de Clarke e enviado ao gerador PWM.

O Bloco do Gerador PWM foi retirado das ferramentas do *Simpowersystems* e faz o controle do comportamento de comutação para o conversor, gerando uma forma de onda modulada por largura de pulso trifásica e de dois níveis (MATHWORKS, 2018). As entradas são *Vabc*, vetor de sinal de referência senoidal trifásico e *Vdc*, tensão do barramento CC do conversor. A saídas incluem o *gate control* (*g*), que são as formas de onda de pulso que determinam o comportamento de comutação no conversor de energia conectado e o *ModWave*, utilizado para gerar um código para plataformas que possuem hardware com capacidade de PWM, mas que não se aplica para a situação deste projeto. A Figura 20 mostra os ajustes internos realizados no bloco do Gerador PWM.

Figura 20 – Parâmetros do Bloco Gerador PWM



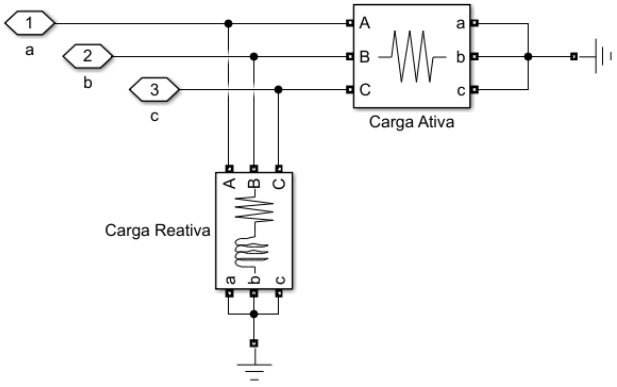
Fonte: Produção do próprio autor.

3.4 Modelagem da Carga

Para a validação do modelo MTG-PMSG conectado ao conversor desenvolvido foi ligada uma carga com partes resistiva e indutiva na saída do sistema. A princípio, foram feitos testes de carga com um bloco de carga RL trifásica disponível na biblioteca do SIMULINK, porém o mesmo dependia da tensão e da frequência nominais do sistema, produzindo resultados insatisfatórios de tensão e corrente elétrica.

Assim, foi utilizado um subsistema contendo um ramo resistivo trifásico em paralelo com um ramo indutivo trifásico, representando as cargas ativa e reativa respectivamente, como mostra a Figura 21. A resistência presente na carga reativa é de 0,5 mΩ e simboliza a aplicação de um indutor real, que é composto além da indutância, por uma resistência.

Figura 21 – Subsistema de Carga



Fonte: Produção do próprio autor.

Para cumprir o objetivo de aplicação da microturbina em cargas parametrizadas com dados reais, serão utilizados dados de carga retirados de um dos edifícios universitários localizados na UFES, o CTXII. Esses dados foram oferecidos como cortesia da Prefeitura Universitária e dispostos em uma planilha de Excel, contendo a memória de massa das cargas do prédio durante um período de onze meses: abril/2019 a fevereiro/2020. A Tabela 1 mostra a síntese dos dados reunidos através das médias das demandas e do fator de potência, além do total de energia consumida nesse período.

Tabela 1 – Síntese dos dados de carga do CTXII

Média da Demanda Aparente (KVA)	8,630
Média da Demanda Ativa (KW)	8,090
Média da Demanda Reativa (KVAr)	2,310
Média do Fator de Potência	0,937
Total de Energia Consumida (KWh)	44680,3

Fonte: Produção do próprio autor.

Como as medições dos dados de carga provindas do CTXII, foram disponibilizadas em formato de demanda ativa (kW) e demanda reativa (kVAr), os valores das medições foram convertidos para valores de resistência (Ω) e indutância (H), a partir da carga demandada. Para realizar tal conversão foram utilizadas as equações:

$$P = \frac{V^2}{R} \tag{19}$$

$$Q = \frac{V^2}{X_L} \tag{20}$$

$$X_L = 2\pi f L \tag{21}$$

Onde,

P e Q são as potências ativa e reativa por fase;

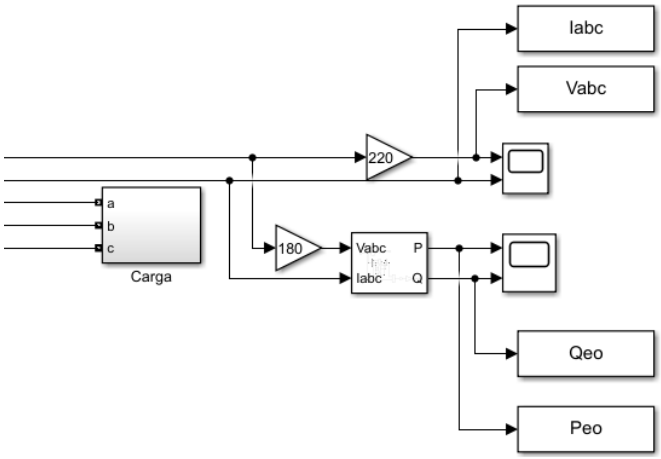
V é a tensão de fase RMS;

X_L é a reatância indutiva.

3.5 Medições Finais do Sistema

Finalizando o diagrama do sistema, foi conectado ao Medidor Trifásico da Figura 12 o subsistema representando a carga e os dispositivos de medição necessários para exibir os valores finais de tensão, corrente, potência ativa e potência reativa, como mostra a Figura 22. Foram incluídos ganhos nas saídas das medições, a fim de transformar os valores em pu originários do sistema MTG-PMSG em valores reais do sistema SI (Sistema Internacional de Unidades), facilitando a interpretação dos resultados.

Figura 22 – Ligação da Carga e Medições

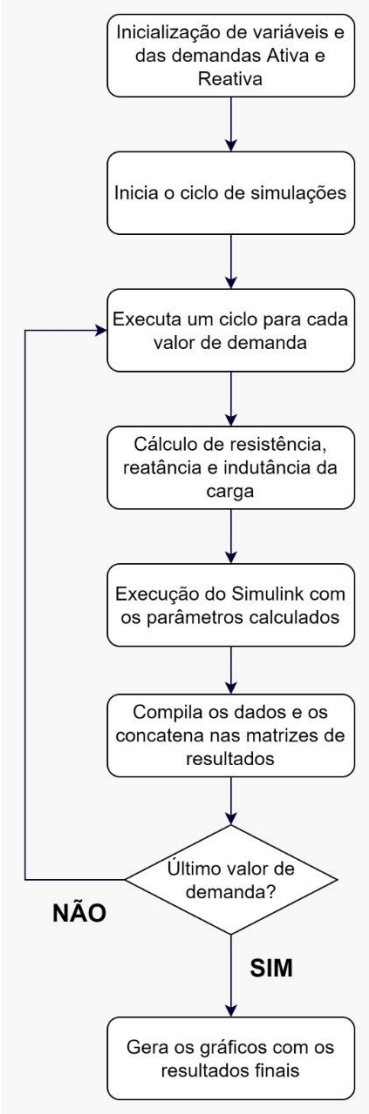


Fonte: Produção do próprio autor.

Visto que o *Simulink* possui uma limitação de não permitir a variação automática em tempo de simulação dos valores de entrada nos blocos de resistência e indutância trifásicas, para variar o valor da carga do sistema, simulando cargas parametrizadas com dados reais, foi necessário programar um algoritmo no *Matlab* que realizasse tal variação. Nesse sentido, a função "*To Workspace*", representada pelos blocos *Iabc*, *Vabc*, *Qeo* e *Peo*, realiza a interação da interface do *Matlab* com o *Simulink*, permitindo a visualização dos resultados para diferentes valores de carga em um mesmo gráfico.

O algoritmo é responsável por simular diversas vezes o diagrama do *Simulink* com valores de carga diferentes, de acordo com o número de valores de demanda inseridos. Além disso, o mesmo realiza a conversão dos valores de demanda inseridos em equivalentes resistivo e indutivo, de acordo com a requisição da carga do modelo. Assim, ao final de cada simulação são obtidos dos dados de potência ativa e reativa, tensão e corrente elétricas de saída do sistema em regime permanente. Esses dados são concatenados em matrizes de resultados, a serem exibidas nos gráficos de forma que 1 segundo (eixo x) corresponde ao mesmo intervalo em uma simulação com certo valor de demanda da carga. A Figura 23 apresenta o fluxograma do algoritmo, para melhor compreensão de seu funcionamento e o Apêndice B dispõe o código completo aplicado para a variação da carga.

Figura 23 – Fluxograma do Algoritmo de Variação de Carga

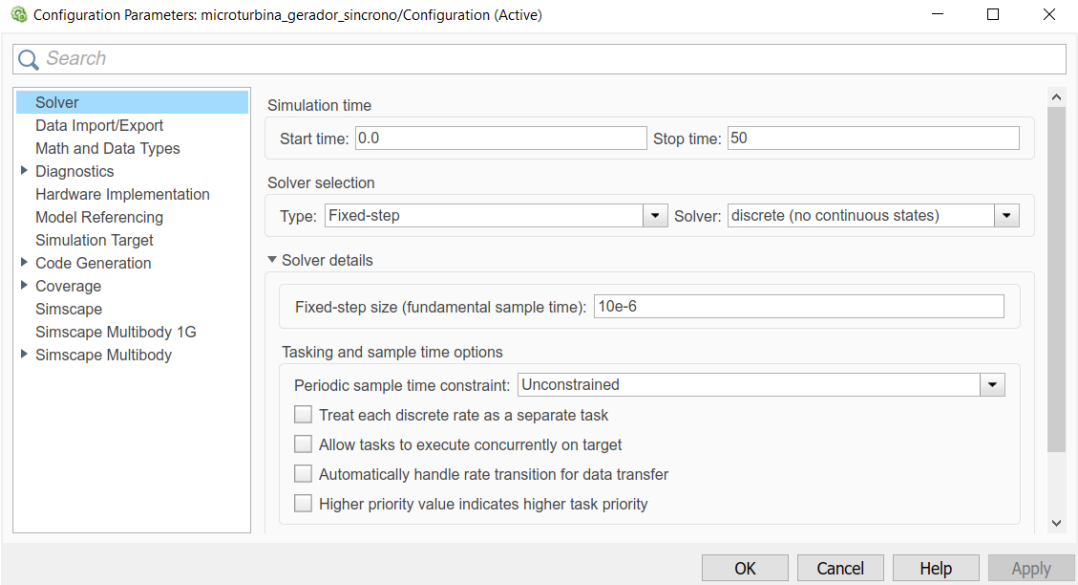


Fonte: Produção do próprio autor.

3.6 Critérios de Operação do Sistema

O diagrama de blocos do sistema foi elaborado utilizando a versão R2018a do *Matlab/Simulik*. Toda a simulação operou em sistema discreto, com taxa de amostragem fundamental de 10 µs, tempo de simulação igual a 50 segundos e o *solver* escolhido foi o *FixedStepDiscrete*. A Figura 24 mostra as configurações dos parâmetros do *solver* para simulação deste projeto.

Figura 24 – Configurações do *Solver* do Sistema



Fonte: Produção do próprio autor.

Vale ressaltar que, todas as simulações deste trabalho foram realizadas em um *notebook* contendo as seguintes configurações de sistema: processador *Intel* i7-10400, 2.9 GHz, 8 núcleos físicos e 16 *threads*; memória RAM de 8 GB, 2400 MHz; placa de vídeo *Nvidia Geforce* 320M; armazenamento de 1TB (disco rígido) e 240 GB (SSD); sistema operacional Windows 10.

4 RESULTADOS

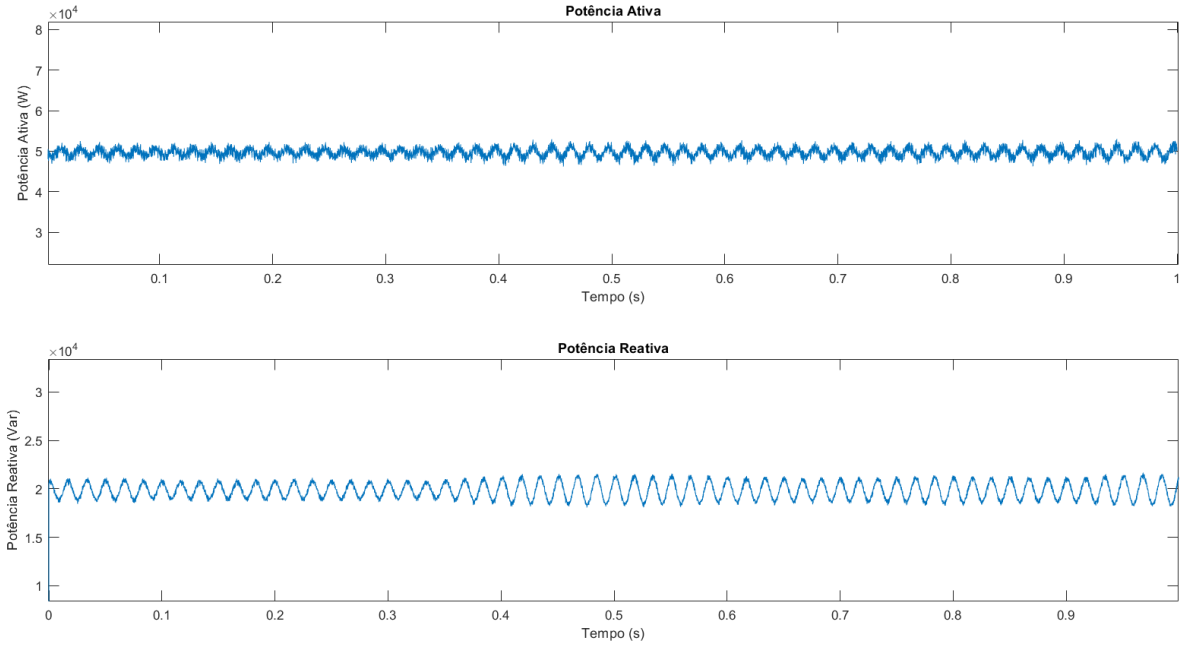
Os resultados apresentam a simulação do sistema microturbina-gerador-conversor operando de forma isolada da rede e alimentando apenas uma carga trifásica. Primeiramente, foram feitas simulações com cargas fixas, a fim de validar o funcionamento do modelo para, então, realizar testes variando a carga. Os resultados se dividem em simulações com carga fixa e simulações com carga variável, realizadas com valores de carga experimentais e, por fim, simulações com cargas parametrizadas com dados reais, realizadas com os valores de medição de carga do edifício universitário CTXII, localizado na UFES.

É importante citar que o modelo atinge o regime permanente em aproximadamente 20 segundos de simulação. Por isso o algoritmo feito no *Matlab* disponibiliza graficamente o último segundo de cada simulação, facilitando a visualização dos efeitos de variação de carga. Dessa forma, o intervalo de medição real de 15 minutos, de acordo com a base de dados de carga do CTXII, equivale a 1 segundo de simulação nos gráficos dos resultados.

4.1 Simulações com Carga Fixa

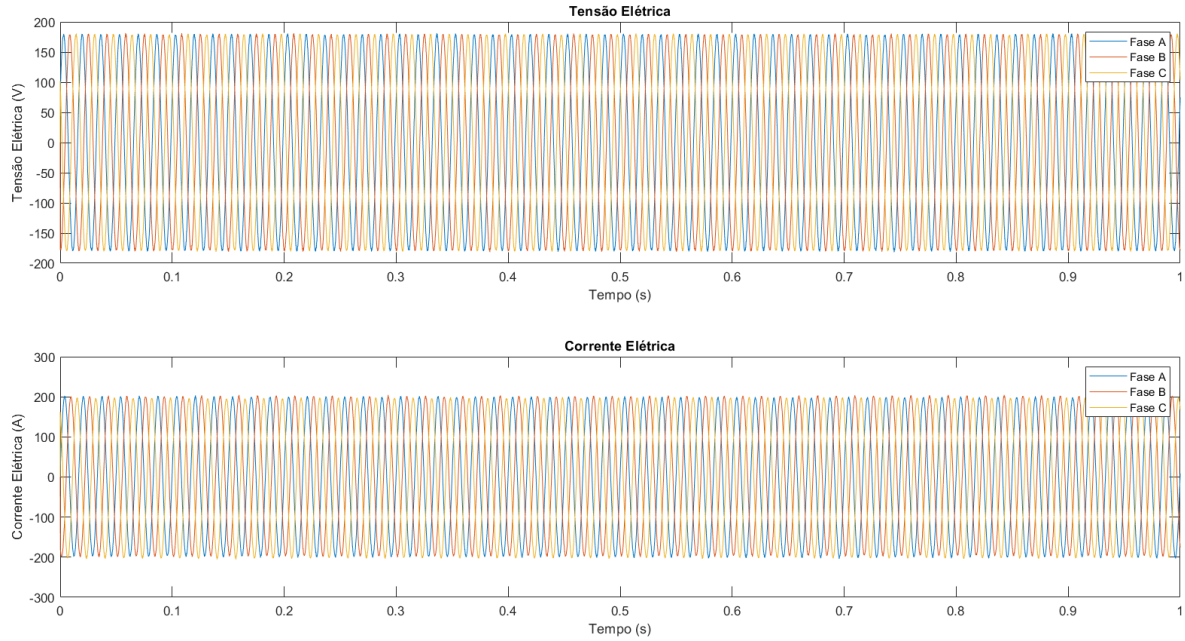
A primeira simulação foi realizada com valores de carga ativa e reativa iguais a 50 kW e 20 kVAr. Os gráficos resultantes estão nas Figuras 25 e 26, que mostram as potências ativa e reativa geradas pelo modelo, assim como a tensão e corrente elétricas na saída do conversor.

Figura 25 – Potências Ativa e Reativa para Carga de 50 kW e 20 kVAr



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 26 – Tensão e Corrente para Carga de 50 kW e 20 kVAr



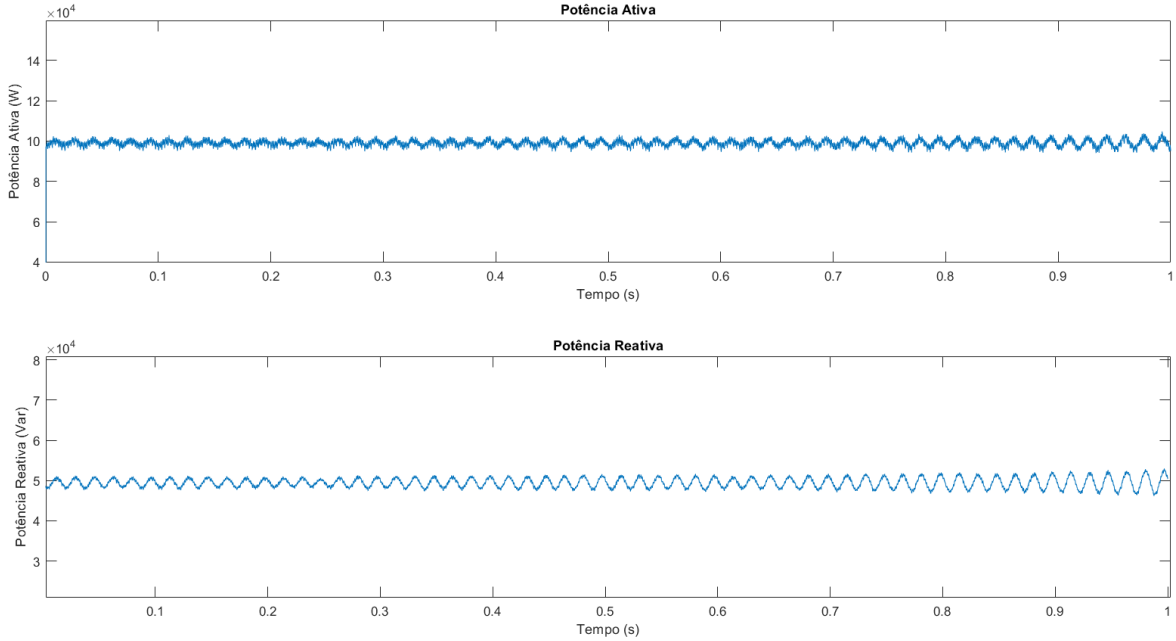
Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 25 mostra a geração de potências ativa e reativa praticamente constantes e de valores P = 50 kW e Q = 20 kVAr, condizendo com a demanda da carga inserida. A partir da Figura 26, observa-se que as formas de onda de tensão e corrente são senoidais e as fases estão

igualmente defasadas no tempo, atingindo valores tensão de fase de 180 V de pico e cerca de 200 A de corrente.

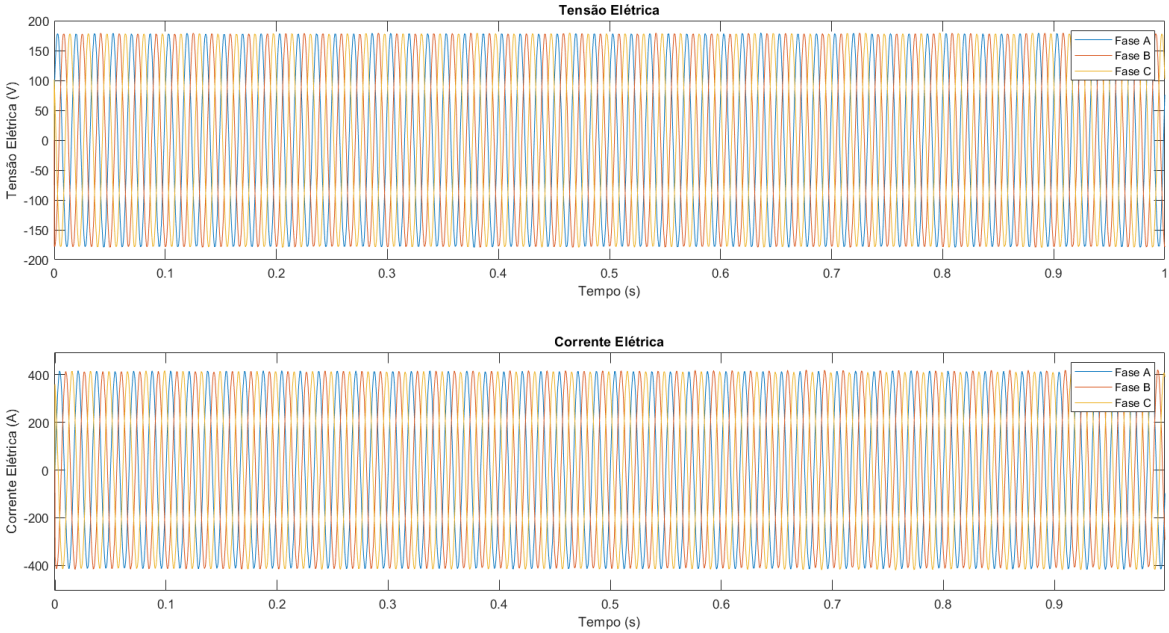
A segunda simulação envolveu o aumento dos valores fixos de carga, a fim de analisar o comportamento do modelo em caso de demandas maiores. Para isso, foram utilizados valores de carga ativa de 100 kW e carga reativa de 50 kVAr, gerando as seguintes Figuras 27 e 28:

Figura 27 – Potências Ativa e Reativa para Carga de 100 kW e 50 kVAr



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 – Tensão e Corrente para Carga de 100 kW e 50 kVAr



Fonte: Produção do próprio autor.

Novamente, observa-se a geração constante de potências ativa e reativa, que também apresentam valores conforme a demanda da carga. Além disso, é possível notar a permanência do valor da tensão em 180 V e o aumento da corrente para aproximadamente 400 A, equilibrando o sistema devido ao aumento da carga.

Os resultados da simulação com a carga fixa comprovam o correto funcionamento e estabilidade do modelo em aplicações de cargas fixas. Porém, a aplicabilidade utilizada até aqui ainda pode ser considerada distante de uma execução prática, em que a carga demandada varia ao longo do dia. Além disso, é possível observar melhor a resposta do sistema quando são aplicados diferentes valores de demanda. Logo, constatou-se a possibilidade de variar a carga e analisar o comportamento do projeto nesta situação.

4.2 Simulações com Carga Variável

A primeira simulação com carga variável foi feita utilizando três valores experimentais para a demanda. Foram aplicados como valores de carga mínimo e máximo os mesmos utilizados na seção 4.1 e uma nova medida intermediária, a fim de visualizar as alterações ocorridas nos resultados e compará-las com o que já foi mostrado. Os valores de carga para este experimento estão dispostos no Quadro 2.

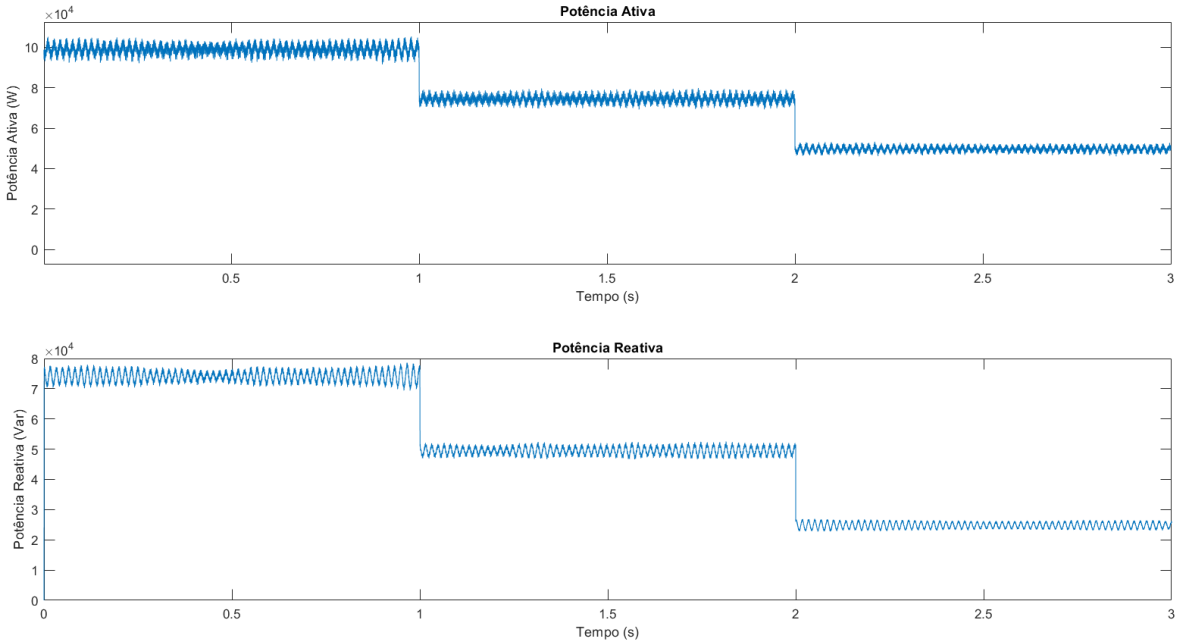
Quadro 2 – Valores da Primeira Simulação de Carga Variável

Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)
100	75
75	50
50	25

Fonte: Produção do próprio autor.

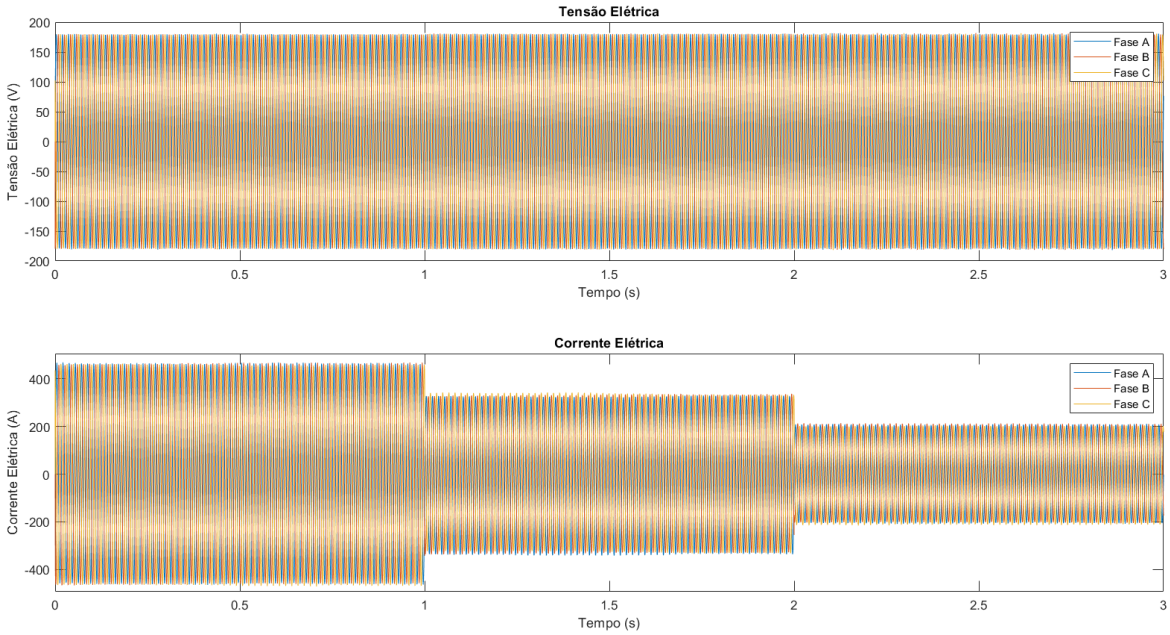
A partir dessas medidas, podemos visualizar o funcionamento do modelo acoplado a uma carga variável, como mostram as Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Potências Ativa e Reativa da Primeira Simulação de Carga Variável



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Tensão e Corrente da Primeira Simulação de Carga Variável



Fonte: Produção do próprio autor.

Com base na Figura 29, verifica-se uma pequena melhora na estabilidade da geração de potências ativa e reativa à medida que ocorre a diminuição da carga. De qualquer modo, a geração se mantém ajustada à demanda da carga durante a variação. Em relação aos resultados de tensão e corrente, comprova-se a atuação do conversor ao manter a tensão de saída do sistema constante em 180 V ao longo de toda a simulação, havendo apenas a variação da corrente elétrica, que diminui em decorrência dos valores de carga.

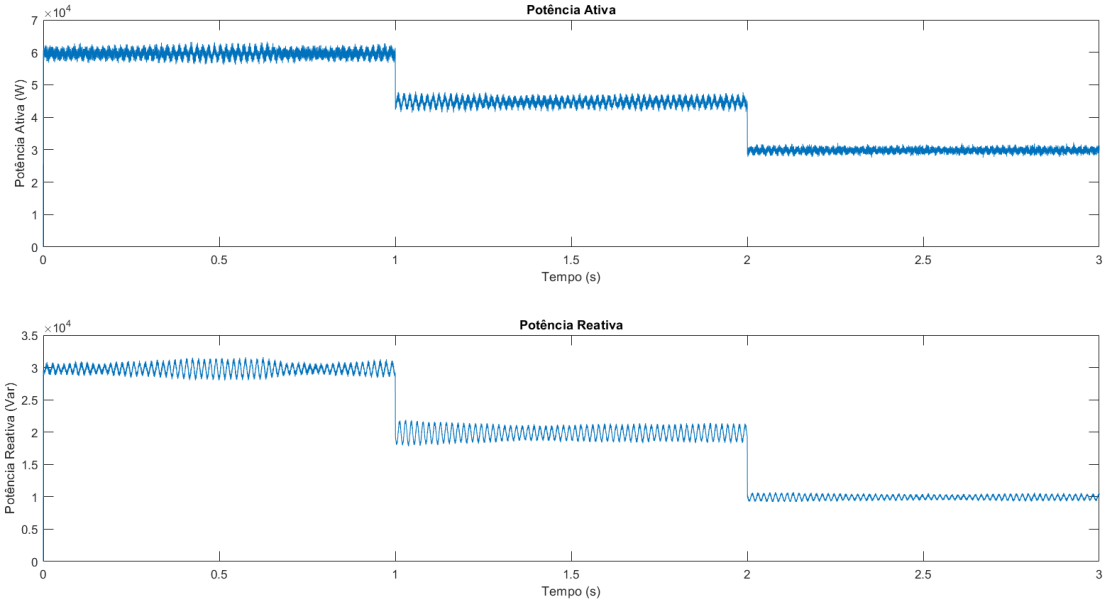
Posteriormente, uma segunda simulação foi realizada com valores menores que os anteriores, para analisar o comportamento do modelo em situações com menos demanda de carga. As medidas escolhidas estão definidas no Quadro 3 e os gráficos resultantes são mostrados pelas Figuras 31 e 32.

Quadro 3 – Valores da Segunda Simulação de Carga Variável

Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)
60	30
45	20
30	10

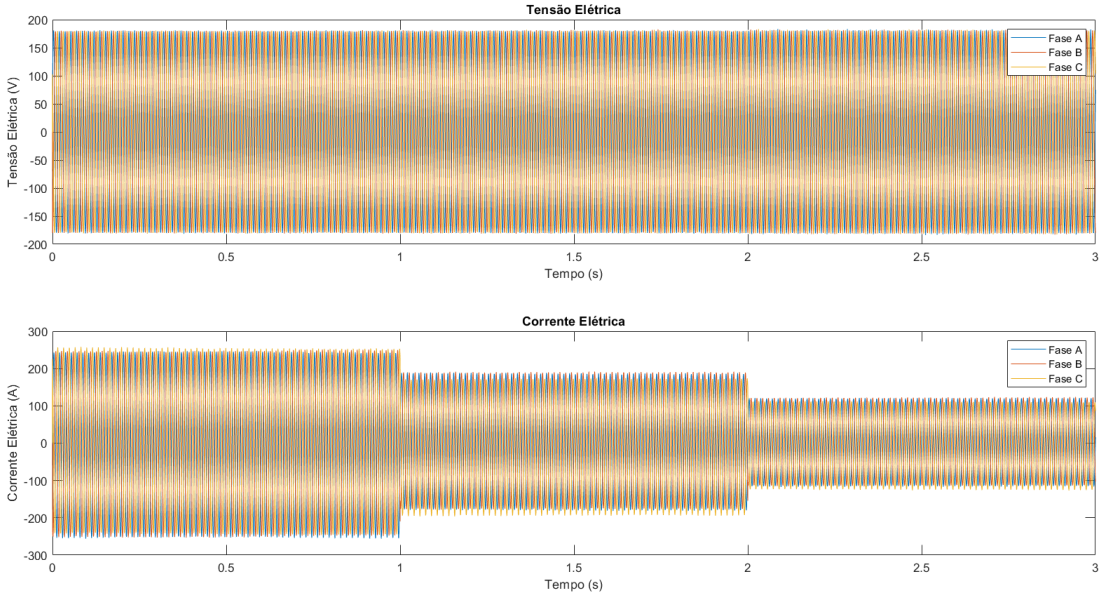
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31 – Potências Ativa e Reativa da Segunda Simulação de Carga Variável



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 32 – Tensão e Corrente da Segunda Simulação de Carga Variável



Fonte: Produção do próprio autor.

Percebe-se que o modelo funcionou similarmente à aplicação dos valores anteriores, mesmo com inclusão de carga menores, apresentando uma geração de potências condizente com os valores de carga, mantendo a tensão em 180 V de pico e diminuindo ainda mais as medidas de corrente, como era esperado.

4.3 Simulações com Cargas Parametrizadas com Dados Reais

Todos os valores de cargas parametrizadas com dados reais são provenientes da memória de massa do edifício CTXII, localizado na UFES. As simulações foram feitas de maneira progressiva em relação à quantidade de dados de carga, avaliando o esforço computacional em cada uma delas. Para validar o sistema, foram selecionadas algumas medições em dias letivos e horários diurnos, por demandarem maior potência dentre os dados disponíveis. Os valores das demandas, assim como a data e horário das mesmas, utilizadas na primeira simulação encontram-se no Quadro 4.

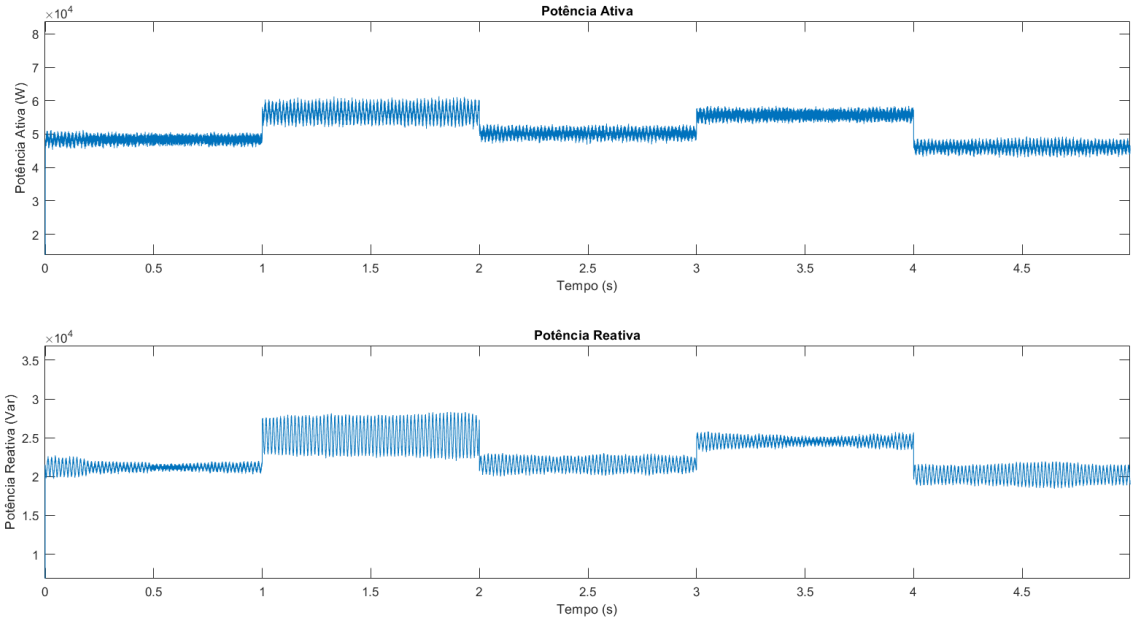
Quadro 4 – Valores da Simulação de Dados Reais com 5 Medições

Medição	Demanda Ativa (W)	Demanda Reativa (VAr)
15/04/2019 13:00:00	48720	21360
15/04/2019 13:30:00	56760	25440
15/04/2019 14:00:00	50520	21720
15/04/2019 14:30:00	56040	24720
15/04/2019 15:00:00	46440	20400

Fonte: Produção do próprio autor.

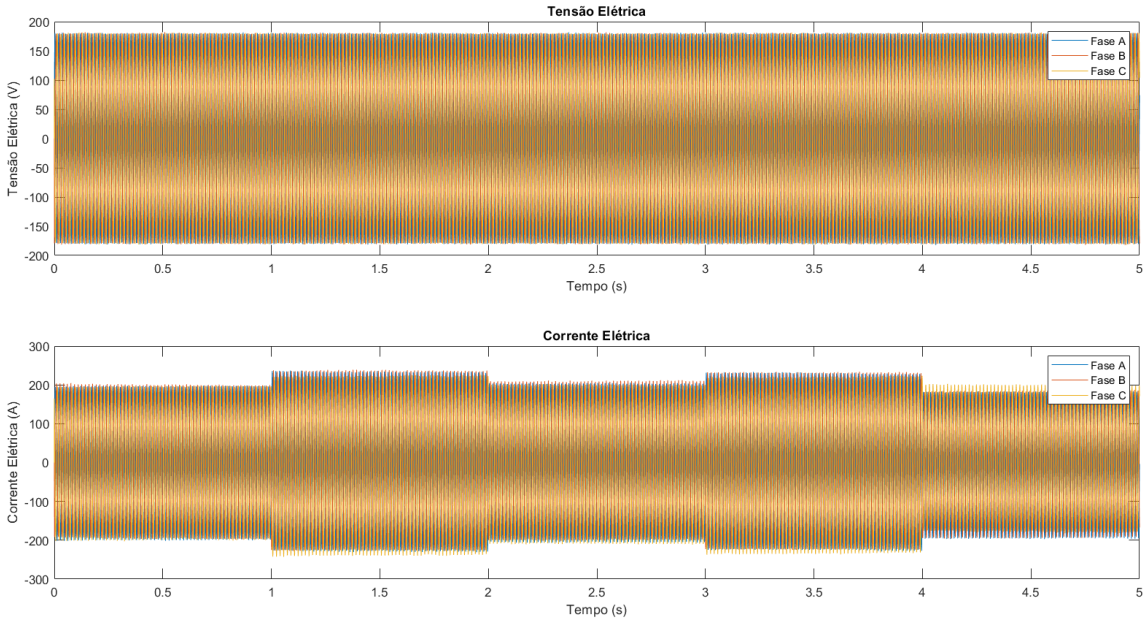
As 5 medições foram selecionas no mesmo dia em intervalos de meia hora entre elas, destacando-se que, a execução do modelo para os cinco valores de demanda levou, aproximadamente, 30 minutos para o término. Assim, os gráficos resultantes desses dados estão disponíveis nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 5 Medições



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 34 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 5 Medições



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que a geração das potências ativa e reativas, mostrada na Figura 33, foi capaz de acompanhar a demanda da carga inserida. Além disso, a tensão permaneceu todo o tempo com fases equilibradas e controladas em 180 V e a corrente variou acompanhando o aumento e a diminuição da carga. Sendo assim, essas simulações comprovam a aplicabilidade do modelo desenvolvido para cargas parametrizadas com dados reais.

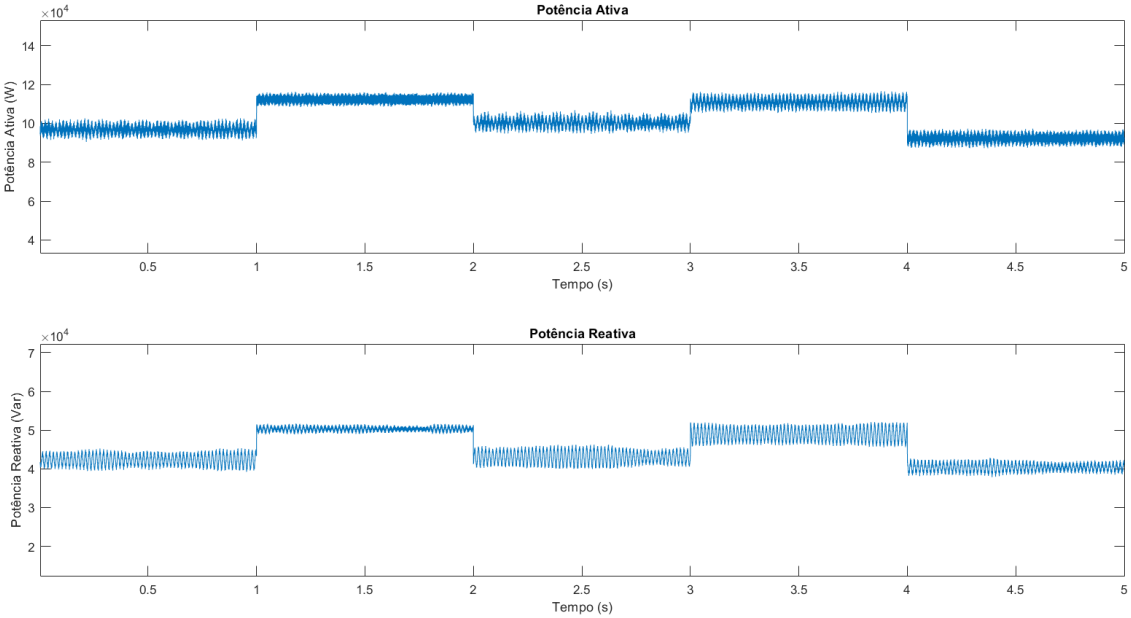
Continuando a validação dos resultados, os mesmos dados de medição do Quadro 3 foram duplicados, com o propósito de simular o comportamento do sistema de geração alimentando dois edifícios de demandas semelhantes. Os novos valores encontram-se no Quadro 5 e as Figuras 35 e 36 apresentam o desempenho do sistema.

Quadro 5 – Valores da Simulação de Dados Reais com 5 Medições para Dois Edifícios

Demanda Ativa (W)	Demanda Reativa (VAr)
97440	42720
113520	50880
101040	43440
112080	49440
92880	40800

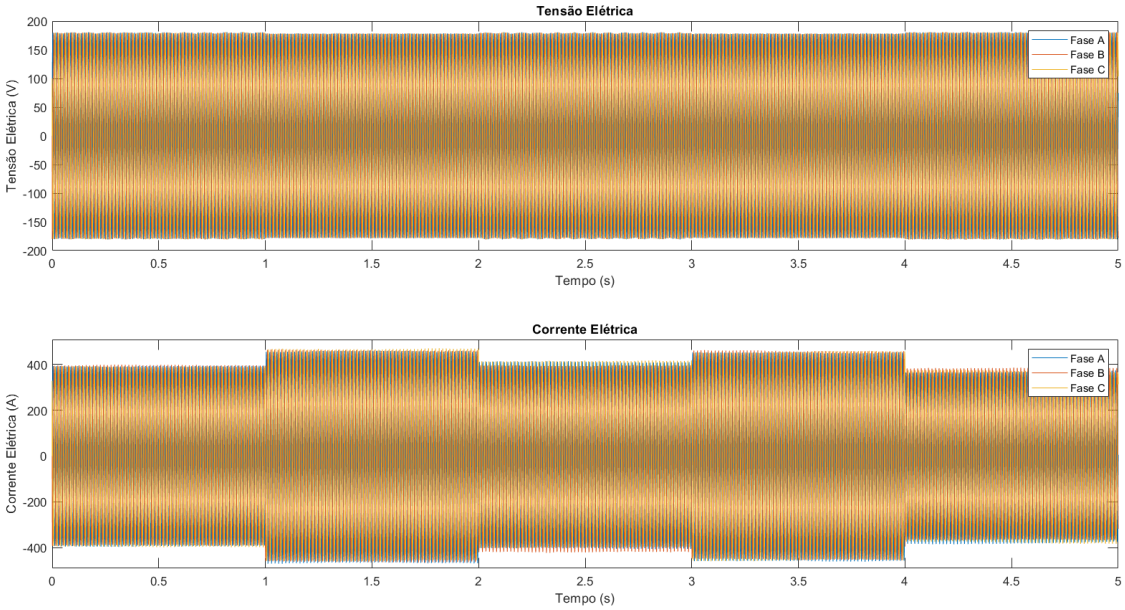
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 35 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 5 Medições para Dois Edifícios



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 5 Medições para Dois Edifícios



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que a carga duplicada não gerou distúrbios nos resultados, apontando que o modelo desenvolvido neste projeto poderia ser aplicado para geração de energia de mais de um edifício universitário com as mesmas características de demanda do CTXII. A geração de potência permaneceu atendendo a exigência da carga, a tensão conservou-se equilibrada em 180 V e a corrente acompanhou a variação demandada.

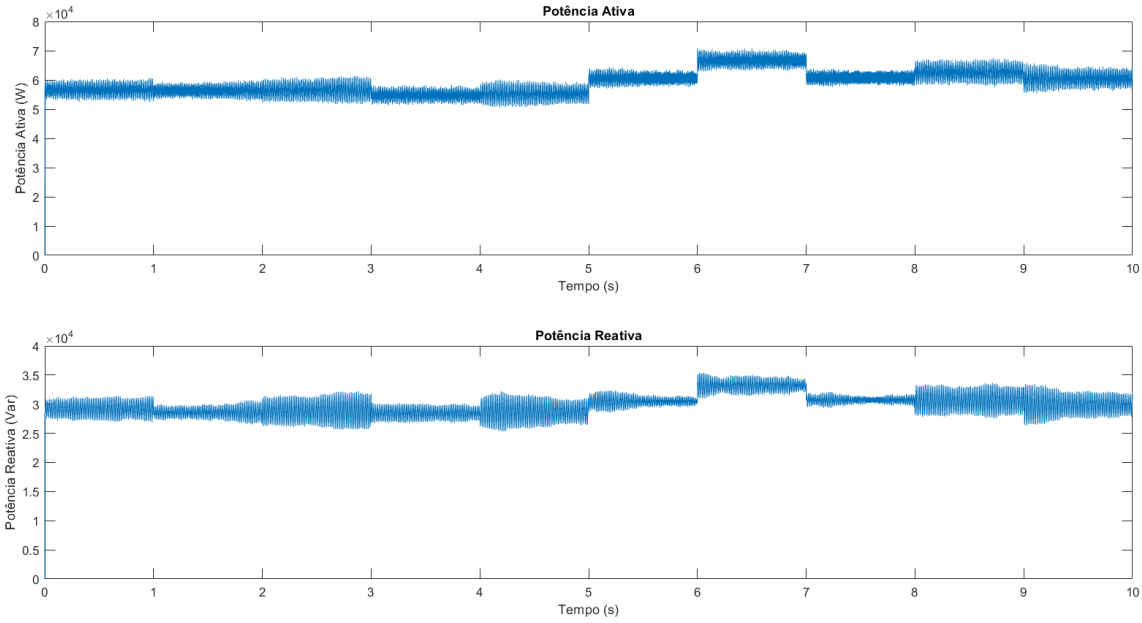
Depois, foram selecionadas medições de outra data diferente e foi feita a inclusão de mais dados para a simulação, para verificar o esforço computacional e a viabilidade da simulação. Os valores escolhidos pertencem ao mês de maio de 2019, no horário da tarde, quando os valores de demanda eram maiores comparados aos outros horários, provavelmente devido à quantidade de aulas ministradas nesse período do dia. O Quadro 6 possui o detalhamento dos valores das demandas e as figuras 37 e 38 apresentam os resultados dessas 10 medições.

Quadro 6 – Valores da Simulação de Dados Reais com 10 Medições

Medição	Demanda Ativa (W)	Demanda Reativa (VAr)
07/05/2019 12:45:00	56880	29400
07/05/2019 13:00:00	56640	28800
07/05/2019 13:15:00	56760	29040
07/05/2019 13:30:00	55080	28680
07/05/2019 13:45:00	55560	28920
07/05/2019 14:00:00	60960	30720
07/05/2019 14:15:00	67200	33480
07/05/2019 14:30:00	61200	30960
07/05/2019 14:45:00	63000	30840
07/05/2019 15:00:00	60840	30120

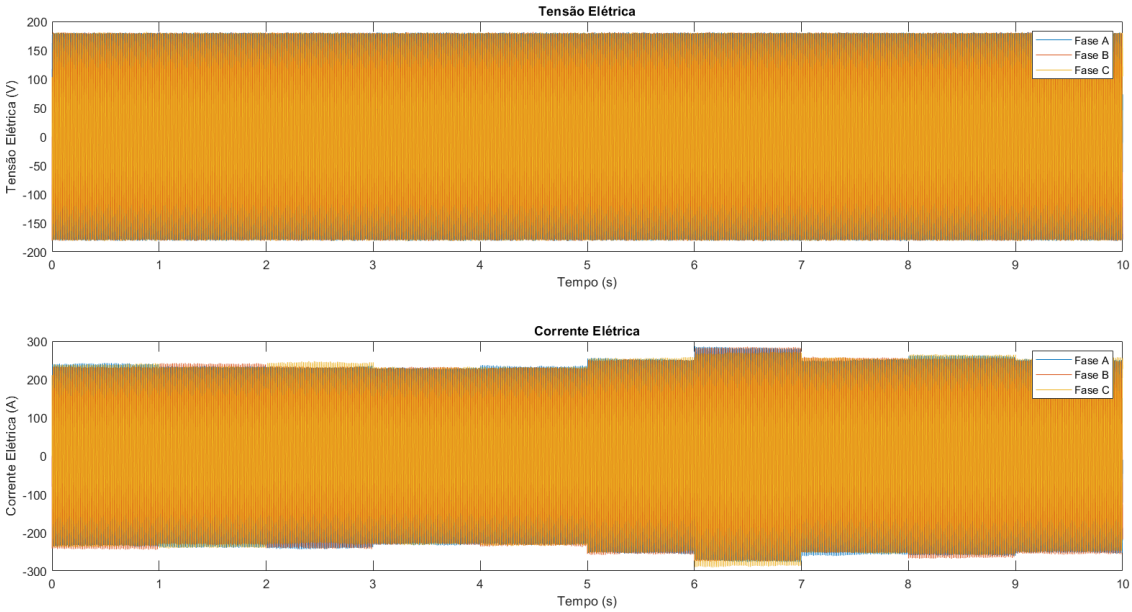
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 37 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 10 Medições



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 10 Medições



Fonte: Produção do próprio autor.

Mais uma vez, é possível notar o efetivo funcionamento do modelo alimentando cargas baseadas em dados reais variáveis, independentemente da quantidade de variações. Em relação ao tempo de simulação, este teve um gasto de aproximadamente 1 hora para execução completa dos 10 valores inseridos. A partir dos gráficos fornecidos, observa-se uma satisfatória geração de potência para a carga envolvida e o devido controle da tensão durante toda a simulação, além da variação da corrente elétrica, como visto nos outros casos.

Finalmente, foi feita uma última simulação com medições do dia 07/05/2019, porém abrangendo todo o horário de expediente na universidade, geralmente de 6h às 21h. Para isso, foram usados 61 dados de carga, que exigiram aproximadamente 6 horas de simulação, mas que auxiliaram na validação do uso da modelagem deste trabalho para aplicação em cargas parametrizadas com dados reais. O Quadro 7 possui os valores de carga utilizados nesta simulação e as Figuras 39 e 40 mostram os resultados obtidos.

Quadro 7 – Valores da Simulação de Dados Reais com 61 Medições

(Continua)

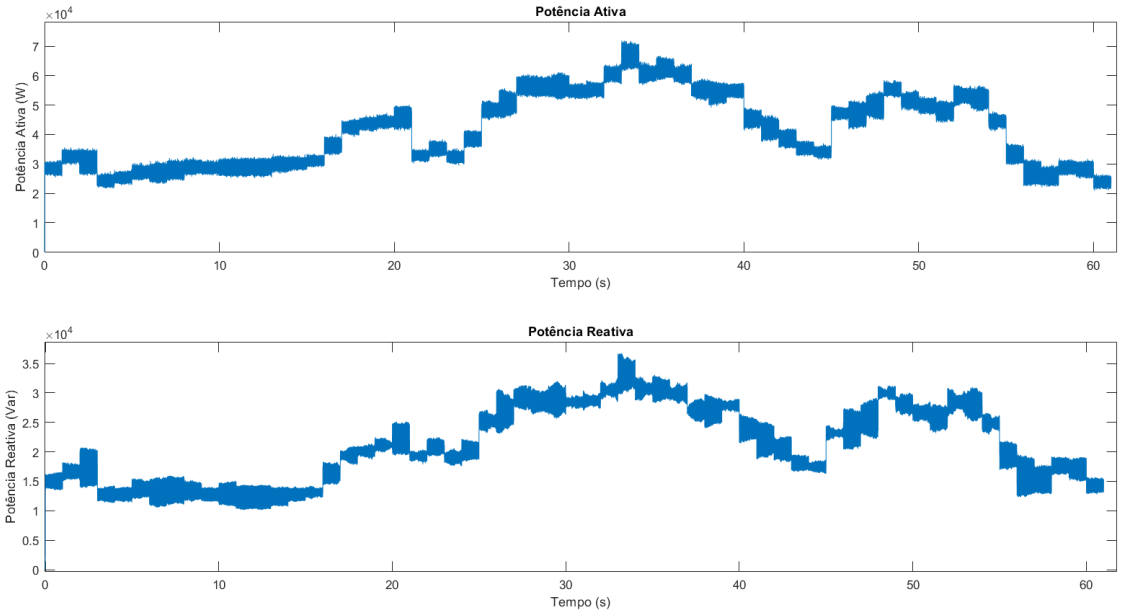
Medição	Demanda Ativa (W)	Demanda Reativa (VAr)
07/05/2019 06:00:00	28680	15120
07/05/2019 06:15:00	32760	16800
07/05/2019 06:30:00	30840	17400
07/05/2019 06:45:00	24480	12840
07/05/2019 07:00:00	25560	12840
07/05/2019 07:15:00	27360	13800
07/05/2019 07:30:00	27120	13200
07/05/2019 07:45:00	28080	13560
07/05/2019 08:00:00	29160	13440
07/05/2019 08:15:00	28800	12840
07/05/2019 08:30:00	29040	12960
07/05/2019 08:45:00	29040	12360
07/05/2019 09:00:00	29040	12360
07/05/2019 09:15:00	30120	12480
07/05/2019 09:30:00	30360	12840
07/05/2019 09:45:00	31320	13200
07/05/2019 10:00:00	36600	16440
07/05/2019 10:15:00	42840	19560
07/05/2019 10:30:00	44040	20280
07/05/2019 10:45:00	44760	21360
07/05/2019 11:00:00	46080	22440
07/05/2019 11:15:00	33120	19440
07/05/2019 11:30:00	35520	21000
07/05/2019 11:45:00	32640	19200
07/05/2019 12:00:00	38880	20400
07/05/2019 12:15:00	48720	25440
07/05/2019 12:30:00	50880	27000
07/05/2019 12:45:00	56880	29400
07/05/2019 13:00:00	56640	28800
07/05/2019 13:15:00	56760	29040
07/05/2019 13:30:00	55080	28680
07/05/2019 13:45:00	55560	28920
07/05/2019 14:00:00	60960	30720
07/05/2019 14:15:00	67200	33480
07/05/2019 14:30:00	61200	30960
07/05/2019 14:45:00	63000	30840
07/05/2019 15:00:00	60840	30120
07/05/2019 15:15:00	55560	27240
07/05/2019 15:30:00	54360	27120
07/05/2019 15:45:00	55200	28080
07/05/2019 16:00:00	45720	24120
07/05/2019 16:15:00	42360	22200
07/05/2019 16:30:00	39000	20640

(Conclusão)

07/05/2019 16:45:00	35640	18240
07/05/2019 17:00:00	34320	17640
07/05/2019 17:15:00	47640	23400
07/05/2019 17:30:00	47160	24000
07/05/2019 17:45:00	50160	25800
07/05/2019 18:00:00	55800	30240
07/05/2019 18:15:00	51840	28320
07/05/2019 18:30:00	50160	26880
07/05/2019 18:45:00	48240	25920
07/05/2019 19:00:00	53520	28680
07/05/2019 19:15:00	52440	28200
07/05/2019 19:30:00	44880	25080
07/05/2019 19:45:00	33480	19560
07/05/2019 20:00:00	27120	15960
07/05/2019 20:15:00	26040	15360
07/05/2019 20:30:00	28920	17760
07/05/2019 20:45:00	28320	17160
07/05/2019 21:00:00	24000	14400

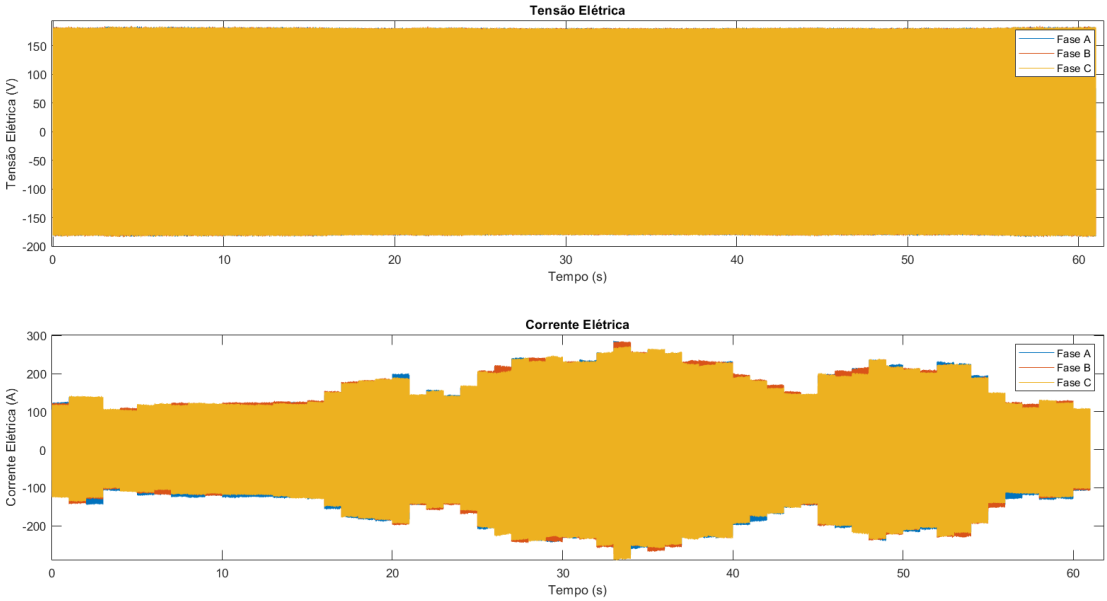
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 39 – Potências Ativa e Reativa da Simulação de Dados Reais com 61 Medições



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 – Tensão e Corrente da Simulação de Dados Reais com 61 Medições



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 39 apresenta a variação da geração das potências ativa e reativa causada pela variação da demanda do edifício ao longo do dia e a microturbina operou de forma satisfatória. Além disso, a Figura 40 mostra o correto funcionamento do controle do sistema através do valor constante de tensão de fase, em 180 V de pico, e a devida alteração da corrente ao longo das diferentes medições.

É importante ressaltar a justificativa da oscilação presente nos gráficos de potências ativa e reativa apresentados nos resultados. A origem desta oscilação na tensão CA sintetizada pelo inversor está na variação da tensão no link CC do inversor. Por sua vez, a tensão no link CC do inversor oscila devido à variação da tensão gerada pelo gerador síncrono, que é controlada pelo controle de campo. Este oscila devido à qualidade da tensão na saída do gerador, que é prejudicada pelo chaveamento do retificador não controlado sem filtro de entrada. Nota-se que, deveria existir um filtro indutivo na entrada do retificador que eliminasse estes ruídos de chaveamento. Porém, por questões operacionais, o *Simulink* impede a conexão de um indutor diretamente à saída do gerador síncrono. Dessa forma, uma solução proposta pela própria plataforma seria a conexão de um resistor de alto valor em paralelo ao gerador. No entanto, esta solução causou uma desestabilização na simulação por algum motivo ainda desconhecido.

Apesar da questão oscilatória citada, ao analisar as figuras e as informações apresentados neste capítulo, é possível afirmar que a modelagem da microturbina proposta neste projeto atende às condições de cargas parametrizadas com dados reais, visto que, em todos os casos, o modelo foi capaz de suprir a demanda da carga. Essa conclusão abrange tanto a demanda ativa quanto a reativa, incluindo os casos de mínimo e máximo, evidenciando a aplicabilidade do sistema.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra que as diversas tecnologias de geração distribuída surgem como uma possibilidade de ajudar a atender às crescentes demandas de energia elétrica. O uso desse tipo de geração destaca-se por ser primordialmente baseado no uso de fontes renováveis e pela capacidade de aumentar a qualidade e confiabilidade da produção energética, despertando o interesse de instituições públicas e privadas em investir em fontes de GD.

De forma específica, este trabalho destacou o uso das microturbinas entre as fontes de GD e mostrou que essa tecnologia se destaca por apresentar algumas vantagens em relação à outras fontes de geração. Tais vantagens incluem o baixo custo e pouca necessidade de manutenção, dimensões reduzidas e facilidade de instalação, baixos níveis de emissão de poluentes, tamanho reduzido, menor número de peças, baixo custo de manutenção, capacidade de conexão de até 20 unidades em paralelo e flexibilidade no uso de combustíveis, podendo operar gás natural, biogás e diesel.

O modelo do projeto inclui uma microturbina acoplada a um gerador síncrono a ímãs permanentes e um conversor que operam de forma isolada da rede. A validação deste modelo foi feita através da aplicação de cargas parametrizadas com dados reais, retiradas da memória de massa do edifício universitário CTXII, localizado na UFES. A modelagem do diagrama de blocos do sistema foi realizada no *Simulink*, utilizando blocos da caixa de ferramentas do *SimPowerSystems* e a variação da carga pôde ser implementada através de um algoritmo criado no *Matlab*, graças à interação disponível entre as ferramentas.

Os resultados das simulações apresentadas foram satisfatórios, evidenciando a capacidade do sistema de fornecer a alimentação demandada pela carga, apesar da quantidade de variações existentes. Em função da necessidade de executar o diagrama de blocos do *Simulink* repetidas vezes, a fim de visualizar a variação dos parâmetros em relação à carga, o tempo de simulação foi proporcional à quantidade de dados de carga inseridos. Essa realidade impediu que fossem feitos testes de simulação mais extensos como, por exemplo, simulando a geração para dias ou semanas. Porém, pode-se concluir que as simulações realizadas foram suficientes para assegurar o correto funcionamento do modelo aplicado a condições reais de carga.

Assim, este estudo demostra que as fontes com microturbinas a gás podem operar adequadamente de forma isolada da rede elétrica e o modelo desenvolvido é capaz de alimentar sistemas reais, possibilitando sua futura aplicação em Microrredes instaladas em edifícios universitários da UFES. Além disso, é possível afirmar que a metodologia apresentada nesta monografia pode ser considerada uma útil contribuição para estudos de sistemas elétricos que utilizam geração distribuída.

Como sugestão de trabalhos futuros, destaca-se a inclusão de uma célula a combustível atuando juntamente com a microturbina através da cogeração, definida pelo processo que aproveita a liberação de calor proveniente das reações eletroquímicas da célula para ser utilizado como combustível para a microturbina, facilitando a produção de mais energia, pois tal processo pode aumentar significantemente a eficiência da geração da planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 16 julho 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 19 julho 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2021/12-2021-boletim.pdf>. Acesso em: 20 julho 2022.

AL-HINAI A., FELIACHI A., **Dynamic Model of a Microturbine used as a Distributed Generator** – IEEE Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium, 2002.

ASGHARIAN, P.; NOROOZIAN, R. **Modeling and Simulation of Microturbine Generation System for Simultaneous Grid-Connected/ Islanding Operation**. 24th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2016.

ASGHARIAN. P.; NOROOZIAN. R. **Microturbine generation power systems in Distributed generation systems: Design, operation and grid integration**. 1ª ed., 2017.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

CHA, Hanju; VU, Trung-Kien; KIM, Jae-Eon. **Design and Control of Proportional-Resonant Controller Based Photovoltaic Power Conditioning System**. Chungnam National University. Department of Electrical Engineering, Daejon, Korea, 2009.

CREEK, Lucas. **A energia do carvão**. Disponível em: <http://www.portalmacauba.com.br/2014/11/a-energia-do-carvao.html>. Acesso em: 20 julho 2022.

CRUZ, T. **Identificação experimental de um modelo dinâmico de uma microturbina a gás com câmara de combustão de baixa emissão de Nox**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

DELGADO, R. F. L. **Estudo e Implementação de um Sistema de Cogeração**. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

DILL, G. K. **Análise da operação de células combustíveis e microturbinas a gás em sistemas de potência**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2008.

FREITAS W., FRANÇA A. M., VIEIRA J. A. M, SILVA L. C. P., COSTA V. F. **Análise**

Comparativa entre Geradores Síncronos e Geradores de Indução com Rotor tipo Gaiola de Esquilo para Aplicação em Geração Distribuída – Revista de Controle e Automação, vol. 16, no. 3. Julho, 2005.

GUDA, S. R.; WANG, C.; NEHRIR, M. H. **A Simulink-based Microturbine Model for Distributed Generation Studies**. Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th annual north american, pp. 269-274, 2005.

GUERRA, Frederico Cerutti. **Análise Energética de uma Microturbina Operando com Biogás**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

HAMILTON, Stephanie L. **Microturbine Generator Handbook.** PennWell Corporation, 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Renewables 2020, Analysis and forecast to 2025**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020?mode=overview>. Acesso em: 19 julho 2022.

MATHWORKS. **Clarke Transform** – Documentation, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/physmod/sps/ref/clarketransform.html>. Acesso em: 29 julho 2022.

MATHWORKS. **Discrete Varying Lowpass** – Documentation, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/control/ref/discretevaryinglowpass.html>. Acesso em: 29 julho 2022.

MATHWORKS. **PWM Generator (Three-phase, Two-level)** – Documentation, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/physmod/sps/ref/pwmgeneratorthreephasetwolevel.html>. Acesso em: 31 julho 2022.

MATHWORKS. **Synchronous Machine** – Documentation, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html>. Acesso em: 29 julho 2022.

MATHWORKS. **Two-Level Converter** – Documentation, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/physmod/sps/powersys/ref/twolevelconverter.html>. Acesso em: 30 julho 2022.

MATHWORKS. **Universal Bridge** – Documentation, 2018. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/physmod/sps/powersys/ref/universalbridge.html>. Acesso em: 30 julho 2022.

MATOS, Bruna Krasota; ALMEIDA, Marina de Salles Silva. **Desenvolvimento da modelagem dinâmica de uma microturbina para a sua utilização na geração distribuída**: Análise em uma planta piloto. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ROWEN W. I., **Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gás Turbine**. Transactions of ASME, vol. 105(1), pp. 865-869 – 1983.

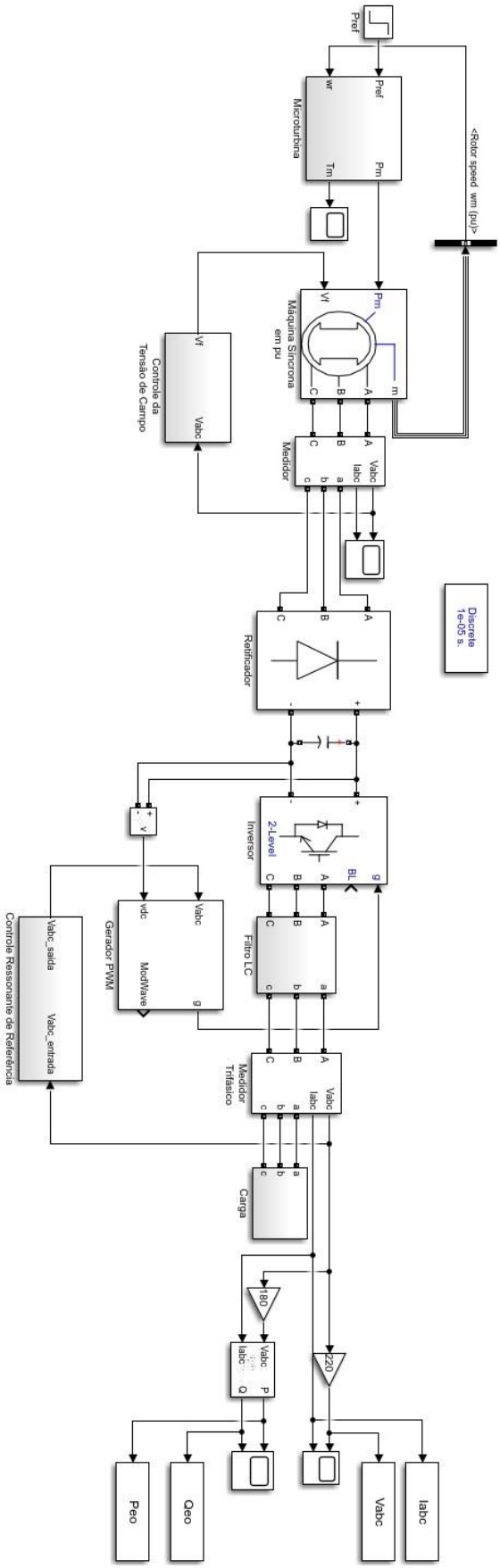
SILVA, Danilo de Paula e. **Gerenciamento de uma Microrrede Utilizando Controle Preditivo com Incertezas Meteorológicas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

VENTURINI, O. J; ANDRADE, R.V. **Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída**. UNIFEI, 2006.

VIEIRA, Gabriel José. **Desequilíbrios de Tensão em Microrredes Durante o Funcionamento em Modo Isolado**. Dissertação de Mestrado em engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade do Porto, Porto, 2012.

ZHU Y., TOMSOVIC K., **Development of Models for Analyzing the Load-Following Performance of Microturbines and Fuel Cells**. Electric Power Systems Research (62), 2002.

APÊNDICE A - DIAGRAMA COMPLETO DE SIMULAÇÃO



APÊNDICE B – ALGORITMO DE VARIAÇÃO DA CARGA

```
%% Algoritmo de Variação da Carga
%
% Revisões:
%      Data       Programador            Descrição da revisão
%      ====       ===========            ====================
%    28/04/22     Bruna Ramos Athaydes   Implementação do código
%
%% Dicionário de Variáveis:
% P [W]: vetor contendo valores de demanda ativa da carga (obtidos
externamente).
% Q [VAr]: vetor contendo valores de demanda reativa da carga (obtidos
externamente).
% Rcarga [ohm]: valor de resistência da carga para certa demanda ativa.
% Xcarga [ohm]: valor de reatância da carga para certa demanda reativa.
% Lcarga [H]: valor de indutância da carga para certa demanda reativa.
% Vabcfinal [V]: matriz de saída da tensão trifásica gerada.
% Iabcfinal [A]: matriz de saída da corrente trifásica gerada.
% Peofinal [W]: vetor de saída da potência ativa gerada.
% Qeofinal [VAr]: vetor de saída da potência reativa gerada.
% Vrms [V]: tensão RMS de operação da carga.
% nCargas: número de valores de demandas da carga.
% nLinhas: número de linhas das matrizes de saída.
% t: vetor contendo pontos do eixo X dos gráficos gerados.


%% Atribuição de Variávies:

Vabcfinal = zeros(1,3);
Iabcfinal = zeros(1,3);
Peofinal = zeros(1,1);
Qeofinal = zeros(1,1);
Vrms = 127;
nCargas = size(P, 1);
t = linspace(0, nCargas, nCargas*50000);


%% Equações e lógica

% Cada iteração executa o Simulink com um dos valores (i) da demanda ativa
e reativa como entrada da carga. Ao final, as saídas da simulação são
incluídas ao final da respectiva matriz de resultados.

for i = 1:nCargas
    Rcarga = (3*Vrms^2)/(P(i)); % Calcula a resistência da carga
    Xcarga = (3*Vrms^2)/(Q(i)); % Calcula a reatância da carga
    Lcarga = Xcarga/(2*pi*60); % Calcula a indutância da carga

    % Executa o Simulink
    simout = sim('microturbina_gerador_sincrono', 50);

    % Concatena os resultados na matriz final
    Vabcfinal = cat(1, Vabcfinal, simout.Vabc);

    % Concatena os resultados na matriz final
    Iabcfinal = cat(1, Iabcfinal, simout.Iabc);
```

```
    % Concatena os resultados na matriz final
    Peofinal = cat(1, Peofinal, simout.Peo);

    % Concatena os resultados na matriz final
    Qeofinal = cat(1, Qeofinal, simout.Qeo);

end


% Obtém o número de linhas das matrizes de resultados
nLinhas = size(Vabcfinal,1);

Vabcfinal(nLinhas, :) = []; % Limpa a última linha da matriz
Iabcfinal(nLinhas, :) = []; % Limpa a última linha da matriz
Peofinal(nLinhas, :) = []; % Limpa a última linha da matriz
Qeofinal(nLinhas, :) = []; % Limpa a última linha da matriz


%% Resultados de Saída

figure(1)
subplot(2,1,1);
plot(t, Vabcfinal);
title('Tensão Elétrica');
legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão Elétrica (V)');

subplot(2,1,2);
plot(t, Iabcfinal);
title('Corrente Elétrica');
legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Corrente Elétrica (A)');

figure(2)
subplot(2,1,1);
plot(t, Peofinal);
title('Potência Ativa');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Potência Ativa (W)');

subplot(2,1,2);
plot(t, Qeofinal);
title('Potência Reativa');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Potência Reativa (Var)');
```