

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

VITOR ANNECCHINI SCHIMID

CONHECENDO AS MICROTURBINAS A GÁS

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

VITOR ANNECCHINI SCHIMID

CONHECENDO AS MICROTURBINAS A GÁS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Vitor Anecchini Schmid**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

VITOR ANNECCHINI SCHIMID

CONHECENDO AS MICROTURBINAS A GÁS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Vitor Anecchini Schmid**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 23 de dezembro de 2014

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Orientador

Prof. Dr Jussara Farias Fardin
Examinador

Prof. Dr Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
Examinador

Agradeço a toda a minha família, amigos e ao professor Domingos pela grande ajuda.

RESUMO

Baseado na necessidade de aprimoramento da confiabilidade, estabilidade e qualidade da produção energética brasileira, e na busca por fontes de energia menos poluentes, esta monografia apresenta um estudo sobre as microturbinas dentro do contexto da geração distribuída. Em um primeiro momento serão analisadas as características mais básicas das microturbinas, como suas partes, tipos construtivos, geradores associados, conexão com a rede, desempenho, etc. Posteriormente será explicado que o ajuste da frequência de saída de uma microturbina de um eixo acontece através de dois componentes de eletrônica de potência: um retificador e um inversor. Por fim, para demonstrar o funcionamento destes elementos e da microturbina como um todo, serão realizadas simulações computacionais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usina Hidroelétrica no Brasil	14
Figura 2 – Microturbina a Líquido Orgânico instalada na EFAP, em Sete Lagoas/MG.....	16
Figura 3 – Sistema com microturbinas	22
Figura 4 – Diagrama simples: microturbina/gerador/retificador/inversor/carga.....	22
Figura 5 – Compressor e Turbina	23
Figura 6 – Partes de uma microturbina.....	24
Figura 7 – Microturbina de um eixo	26
Figura 8 – Microturbina de dois eixos.....	27
Figura 9 – Microturbinas Capstone em aplicação industrial	30
Figura 10 – Usina de Biogás.....	31
Figura 11 – Óleos Destilados.....	31
Figura 12 – Matérias Primas de Biomassa tratada.....	31
Figura 13 – Esquema de ciclo de Brayton para microturbinas	33
Figura 14 – Esquema básico de uma microturbina.....	36
Figura 15 – Retificador trifásico PWM conectado a uma fonte trifásica	38
Figura 16 – Definição de setores	40
Figura 17 – Sinais de controle para as chaves superiores de cada braço do setor 6.....	42
Figura 18 – Sentido das correntes nos indutores do retificador.....	43
Figura 19 – Circuitos equivalentes para os ciclos referentes ao setor 6	44
Figura 20 – Circuito do retificador trifásico pwm no MULTISIM	45
Figura 21 – Formas de onda no osciloscópio do simulador	45
Figura 22 – Forma de onda de corrente no osciloscópio do simulador	46
Figura 23 – Forma de onda de corrente no osciloscópio de simulador	48
Figura 24 – Inversor multinível de cinco níveis	49
Figura 25 – Tensão de fase em um inversor de cinco níveis.....	51
Figura 26 – Inversor trifásico de cinco níveis com capacitores flutuantes.....	53
Figura 27 – Inversor trifásico de cinco níveis em cascata	55
Figura 28 – Representação Gráfica dos níveis de Tensão	55
Figura 29 – Diagrama de Blocos de microturbina para simulação.....	59
Figura 30 – Circuito interno do bloco “subsystem”	61
Figura 31 – Subsistema de compressor-turbina.....	62
Figura 32 – Subsistema de controle de velocidade.....	63

Figura 33 – Subsistema de controle de combustível	65
Figura 34 – Bloco seletor de valor mínimo	66
Figura 35 – Representação de gerador Síncrono de Imã Permanente	67
Figura 36 – Parâmetros do bloco “Gerador Síncrono de Imã Permanente”	69
Figura 37 – Parâmetros do bloco “Carga RLC”	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil entre 1970 e 2005.	12
Gráfico 2 – Fontes de geração elétrica no Brasil em 2012	13
Gráfico 3 – Ciclo de Brayton ideal	34
Gráfico 4 – Ciclo de Brayton ideal regenerativo	35
Gráfico 5 – Tensão de saída do Gerador	71
Gráfico 6 – Tensão de Saída do Gerador (escala modificada)	71
Gráfico 7 – Corrente de saída do Gerador	72
Gráfico 8 – Corrente de Saída do Gerador (escala modificada)	73
Gráfico 9 – Tensão na carga	74
Gráfico 10 – Corrente na carga.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores para a configuração do retificador.....	39
Tabela 2 – Seqüência de vetores para cada setor.....	41
Tabela 3 – Intervalo para aplicação dos vetores do setor 6.....	41
Tabela 4 – Comandos de obtenção de V1	42
Tabela 5 – Sequência de chaveamento na região 2	43
Tabela 6 – Níveis de tensão com diodo grampeador e respectivos estados de comutação	50
Tabela 7 – Níveis de tensão com capacitores flutuantes e respectivos estados de comutação	53
Tabela 8 – Níveis de tensão com ligação em cascata e respectivos estados de comutação ...	56
Tabela 9 – Vantagens e desvantagens de inversores multinível.....	57
Tabela 10 – Custo de uma microturbina.....	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	O problema energético no Brasil.....	12
1.2	Objetivos desta dissertação.....	17
2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	18
2.1	O que é geração distribuída?	18
2.2	Detalhes sobre a geração distribuída	19
3	MICROTURBINAS – INFORMAÇÕES GERAIS.....	21
3.1	O que são?	21
3.2	Partes	22
3.3	Tipos de mancais	24
3.4	Recuperador de calor	24
3.5	Seções quentes.....	25
3.6	Tipos construtivos e funcionamento.....	25
3.7	Diferenças entre microturbinas com um eixo e com dois eixos.....	27
3.8	Gerador associado	27
3.9	Conexão com a rede	28
3.10	Desempenho	28
3.11	Aplicações	28
3.12	Combustíveis	30
3.13	Termodinâmica.....	33
4	RETIFICADOR TRIFÁSICO PWM.....	36
4.1	Introdução.....	36
4.1.1	Analisando o retificador	37
4.2	Modelagem vetorial.....	37
4.2.1	Sequencia de setores.....	39
4.2.2	Sequencia de vetores	40
4.3	Simulação	44
5	INVERSOR MULTINÍVEL.....	47
5.1	Introdução.....	47
5.2	Tipos de inversores multinível	48
5.2.1	Estrutura 1 – Inversor multinível com diodo grampeador	48

5.2.2	Estrutura 2 – Inversor multinível com capacitores flutuantes	52
5.2.3	Estrutura 3 – Inversor multinível em cascata	54
5.3	Vantagens e desvantagens de inversores multinível	57
6	<i>SIMULAÇÃO DE UMA MICROTURBINA</i>	58
6.1	Modelo de simulação.....	58
6.2	Modelo detalhado	58
6.3	Análise de subsistemas	60
6.3.1	Subsistema de compressor-turbina	61
6.3.2	Subsistema de controle de velocidade.....	62
6.3.3	Subsistema de controle de combustível.....	63
6.3.4	Subsistema de controle de temperatura	65
6.3.5	Seletor de valor mínimo	66
6.3.6	Gerador síncrono de imã permanente.....	66
6.4	Resultado	69
6.4.1	Saída do gerador síncrono de imã permanente.....	69
6.4.2	Carga	73
7	<i>CONCLUSÃO</i>	76
7.1	Custos	76
7.2	Fatores para cálculo de viabilidade econômica.....	76
8	<i>VIABILIDADE ECONÔMICA</i>	79
9	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	81
	APÊNDICE A	84
	ANEXO A	85