

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**GUSTAVO KAEFER DILL**

**ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS  
E MICROTURBINAS A GÁS EM SISTEMAS DE  
POTÊNCIA**

Porto Alegre  
2008

**GUSTAVO KAEFER DILL**

**ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS  
E MICROTURBINAS A GÁS EM SISTEMAS DE  
POTÊNCIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ferreira Coutinho  
Co-orientador: Prof. Dr. Flavio Antonio Becon Lemos

Porto Alegre  
2008

**"ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CÉLULAS  
COMBUSTÍVEIS E MICROTURBINAS A GÁS EM  
SISTEMAS DE POTÊNCIA"**

**GUSTAVO KAEFER DILL**

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



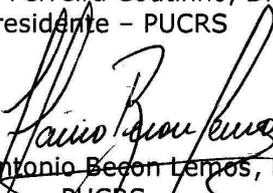
Daniel Ferreira Coutinho, Dr.  
Orientador

Rubem Dutra Ribeiro Fagundes, Dr.  
Coordenador  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Daniel Ferreira Coutinho, Dr.  
Presidente - PUCRS



Flávio Antonio Bedon Lemos, Dr.  
PUCRS



Luís Alberto Pereira, Dr. Ing.  
PUCRS



Walmir de Freitas Filho, Dr.  
UNICAMP

*Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditam que é possível melhorar o aprendizado,  
a qualidade e o desempenho com esforço e um objetivo a ser atingido.*

*Em especial dedico este trabalho aos meus pais  
Célio e Hilda*

*“...porque expandir é viver.”*

# Agradecimentos

Ao professor Daniel Ferreira Coutinho pela orientação dedicada durante todas as etapas do curso de mestrado.

Ao professor Flavio Antonio Becon Lemos, pela co-orientação qualificada, que permitiu proporcionar-me conhecimentos de grandiosos valores.

Ao professor Luis Alberto Pereira por ter auxiliado na orientação na área de máquinas elétricas, proporcionando-me maiores conhecimentos a respeito deste assunto.

A todos os professores do curso de mestrado em engenharia elétrica da PUCRS, por ter possibilitado o aperfeiçoamento de minha qualificação profissional. Por suas amizades e pelo ensino qualificado que me permitiram realizar este trabalho, pelos exemplos de coerência e capacidade técnica.

Aos colegas de mestrado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da PUCRS que, direta, ou indiretamente, contribuíram com o meu aprendizado e crescimento profissional.

E, por fim, a CAPES, pelo suporte financeiro.

**Resumo da Dissertação apresentada a PUCRS como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.**

**ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS E MICROTURBINAS A GÁS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

**GUSTAVO KAEFER DILL**

Março/2008.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ferreira Coutinho

Co-orientador: Prof. Dr. Flavio Antonio Becon Lemos

Área de Concentração: Sistemas de Energia

Linha de Pesquisa: Planejamento e Gestão de Sistemas de Energia

Projeto de Pesquisa Vinculado: CAPES

Palavras-chave: Geração Distribuída, Microturbinas a Gás, Células Combustíveis

A proposta deste trabalho está centrada na pesquisa, modelagem e implementação computacional de novas fontes de geração distribuída visando analisar o comportamento dinâmico, transitório e do perfil da tensão de cada uma das fontes, através de simulações, de forma a assegurar uma operação estável e segura. Para o estudo da operação destas fontes, é desenvolvido um modelo dinâmico, em ambiente de *Matlab/Simulink*, de uma microrrede composta por um grupo de células combustíveis e de microturbinas a gás utilizando máquinas síncrona a imãs permanentes e assíncrona como gerador. A análise dos resultados é baseada em três diferentes cenários de simulação. No primeiro cenário é realizado uma simulação estática onde é analisado o comportamento da tensão para diferentes carregamentos e, a partir desta análise é definido o limite de operação de cada fonte. No segundo cenário, é simulado um degrau de potência a cada fonte operando isoladamente e um incremento de carga quando as três fontes operam juntas, em paralelo, ligadas a rede. No terceiro cenário, as fontes de geração distribuída são conectadas a um pequeno sistema de distribuição, que pode ser representado por um barramento infinito, e é simulado a ocorrência de um curto-circuito considerando, nesta situação, cada fonte operando junto com a rede de distribuição, como também, as três fontes juntas. Então, são analisados o perfil das tensões, correntes e potências de todas as barras do sistema modelado de forma a avaliar a operação e o desempenho de cada fonte operando de forma isolada, bem como o impacto das fontes de Geração Distribuída operando em conjunto com a rede de distribuição.

Abstract of Dissertation presented to PUCRS as one of the requirements to obtain Masters Degree in Electrical Engineering.

## **OPERATION ANALYSIS OF FUEL CELLS AND GAS MICROTURBINES IN POWER SYSTEMS**

**GUSTAVO KAEFER DILL**

March/2008

Advisor: Prof. Dr. Daniel Ferreira Coutinho

Co-advisor: Prof. Dr. Flavio Antonio Becon Lemos

Concentration Field: Energy Systems

Line of Research: Planning and Management of Energy Systems

Link Research Project: CAPES

Keywords: Distributed Generation, Gas Microturbine, Fuel Cells

This work is focused on research, modeling and computational implementation of new sources of distributed generation aiming to analyze the dynamic behavior, transient and the voltage profile of each source, through simulations, in order to ensure stability of operation and safety. Three dynamic models are developed to study the operation of these sources, in a *Matlab/Simulink* environment. The system under analysis consists on a microgrid composed of a fuel cells group and gas microturbines, using the synchronous permanent magnets machine and asynchronous machine as generator. The analysis of results is based on three different scenarios of simulation. In the first scenario, is performed a static simulation where is analyzed the voltage behavior for different loads and from this analysis is defined the limit of operation of each source. In the second one is simulated a power step to each source operating alone and, an increase of load when the three sources operate together, in parallel, linked to a distribution network. In the third one, the sources of distributed generation are connected to a small distribution system, which can be represented by an infinite bus, and the occurrence of short-circuit is simulated considering, each source operating together with the distribution network, as well as the three sources together. The voltages profile, currents and electric power of all the buses of the system modeled are analyzed in order to evaluate the operation and performance of each source operating in isolation form, as well as the impact of the sources of Distributed Generation operating together with the distribution network.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Custos em Centavos U\$/kWh .....	26
Figura 4.1 – Esquema da Célula Combustível <i>SOFC</i> .....	39
Figura 4.2 – Modelo da Célula Combustível do tipo <i>SOFC</i> .....	45
Figura 4.3 – Diagrama de Blocos do Limitador de Combustível .....	46
Figura 4.4 – Diagrama de Blocos da Equação de <i>Nernst</i> .....	46
Figura 4.5 – Esquemático da Microturbina a Gás .....	49
Figura 4.6 – Modelo da Microturbina do tipo <i>GAST</i> .....	50
Figura 4.7 – Modelo <i>MTG-ASSIN</i> .....	51
Figura 4.8 – Esquema Equivalente da Máquina Assíncrona .....	53
Figura 4.9 – Modelo <i>MTG-SINPER</i> .....	55
Figura 4.10 - Esquema Equivalente da Máquina Síncrona .....	56
Figura 4.11 – Modelo do Conversor para <i>MTG-ASSIN</i> e <i>MTG-SINPER</i> .....	60
Figura 4.12 – Esquema do Bloco do Retificador .....	63
Figura 4.13 – Esquema do Bloco do Inversor .....	63
Figura 4.14 – Filtro LC do Inversor .....	63
Figura 4.15 – Diagrama de Blocos do Regulador de Tensão .....	64
Figura 4.16 – Modelo do Conversor Conectado a <i>MTG-ASSIN</i> e a Carga .....	65
Figura 4.17 – Tensão de Saída – Carga 150 kW .....	65
Figura 4.18 – Corrente de Saída – Carga 150 kW .....	65
Figura 4.19 – Tensão de Saída – Carga 75 kW .....	65
Figura 4.20 – Corrente de Saída – Carga 75 kW .....	65
Figura 4.21 – Modelo do Conversor Conectado a <i>MTG-SINPER</i> e a Carga .....	66
Figura 4.22 – Tensão de Saída - Carga 300 kW .....	66
Figura 4.23 – Corrente de Saída - Carga 300 kW .....	66

Figura 4.24 – Tensão de Saída - Carga 150 kW .....	66
Figura 4.25 – Corrente de Saída - Carga 150 kW .....	66
Figura 4.26 - Diagrama de Blocos do Inversor <i>SOFC</i> .....	67
Figura 4.27 – Modelo do Inversor Conectado a <i>SOFC</i> e a Carga .....	68
Figura 4.28 – Tensão de Saída – Carga 500 kW .....	68
Figura 4.29 – Corrente de Saída - Carga 500 kW .....	68
Figura 4.30 – Tensão de Saída - Carga 250 kW .....	68
Figura 4.31 – Corrente de Saída - Carga 250k W .....	68
Figura 5.1 – Estrutura da Microrede com as Fontes de GD .....	71
Figura 5.2 – Plataforma de Simulação para Análise Dinâmica .....	72
Figura 5.3 – Plataforma de Simulação para Análise Transitória .....	73
Figura 6.1 – Modelo <i>SOFC</i> para Análise de Carregamento .....	80
Figura 6.2 - Variação da Tensão para Mínimo e Máximo Carregamento <i>SOFC</i> .....	80
Figura 6.3 – Modelo <i>MTG-ASSIN</i> para Análise de Carregamento .....	81
Figura 6.4 – Variação da Tensão para Mínimo e Máximo Carregamento <i>MTG-ASSIN</i> .....	82
Figura 6.5 – Modelo <i>MTG-SINPER</i> para Análise de Carregamento .....	83
Figura 6.6 – Variação da Tensão para Mínimo e Máximo Carregamento <i>MTG-SINPER</i> .....	83
Figura 6.7 – Variação da Tensão em Função da Carga .....	84
Figura 6.8 – Modelo Dinâmico da <i>SOFC</i> .....	86
Figura 6.9 – Resposta ao Degrau da <i>SOFC</i> .....	87
Figura 6.10 – Pressão do Hidrogênio e Oxigênio .....	87
Figura 6.11 – Modelo Dinâmico da <i>MTG-ASSIN</i> .....	88
Figura 6.12 – Resposta ao Degrau da <i>MTG-ASSIN</i> .....	89
Figura 6.13 – Velocidade da <i>MTG-ASSIN</i> .....	89
Figura 6.14 – Modelo Dinâmico da <i>MTG-SINPER</i> .....	90
Figura 6.15 – Resposta ao Degrau da <i>MTG-SINPER</i> .....	91
Figura 6.16 – Velocidade da <i>MTG-SINPER</i> .....	91
Figura 6.17 – Variação da Potência na Barra 1 .....	93
Figura 6.18 – Variação da Corrente na Barra 1 .....	93
Figura 6.19 – Variação da Potência na Barra 2 .....	93
Figura 6.20 – Variação da Corrente na Barra 2 .....	93
Figura 6.21 – Variação da Potência na Barra 3 .....	93

Figura 6.22 – Variação da Corrente na Barra 3 .....	93
Figura 6.23 – Variação da Potência na Barra 4 .....	93
Figura 6.24 – Variação da Corrente na Barra 4 .....	93
Figura 6.25 – Análise Transitória do Modelo <i>SOFC</i> .....	96
Figura 6.26 – Resposta da Tensão na Barra 1 .....	97
Figura 6.27 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	97
Figura 6.28 – Resposta da Tensão na Barra 2 .....	97
Figura 6.29 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	97
Figura 6.30 – Resposta da Tensão na Barra 3 .....	97
Figura 6.31 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	97
Figura 6.32 – Resposta da Tensão na Barra 1 .....	98
Figura 6.33 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	98
Figura 6.34 – Resposta da Tensão na Barra 2 .....	98
Figura 6.35 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	98
Figura 6.36 – Resposta da Tensão na Barra 3 .....	99
Figura 6.37 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	99
Figura 6.38 – Análise Transitória do Modelo <i>MTG-SINPER</i> .....	100
Figura 6.39 – Resposta da Tensão na Barra 1 .....	101
Figura 6.40 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	101
Figura 6.41 – Resposta da Tensão na Barra 2 .....	101
Figura 6.42 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	101
Figura 6.43 – Resposta da Tensão na Barra 3 .....	101
Figura 6.44 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	101
Figura 6.45 – Resposta da Tensão na Barra 1 .....	102
Figura 6.46 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	102
Figura 6.47 – Resposta da Tensão na Barra 2 .....	102
Figura 6.48 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	102
Figura 6.49 – Resposta da Tensão na Barra 3 .....	102
Figura 6.50 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	102
Figura 6.51 – Análise Transitória do Modelo <i>MTG-ASSIN</i> .....	104
Figura 6.52 – Resposta da Tensão na Barra 1 .....	104
Figura 6.53 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	104

Figura 6.54 – Resposta da Tensão na Barra 2 .....	104
Figura 6.55 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	104
Figura 6.56 – Resposta da Tensão na Barra 3 .....	105
Figura 6.57 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	105
Figura 6.58 – Resposta da Tensão na Barra 1 .....	105
Figura 6.59 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	105
Figura 6.60 – Resposta da Tensão na Barra 2 .....	106
Figura 6.61 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	106
Figura 6.62 – Resposta da Tensão na Barra 3 .....	106
Figura 6.63 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	106
Figura 6.64 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	108
Figura 6.65 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	108
Figura 6.66 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	109
Figura 6.67 – Resposta da Corrente na Barra 4 .....	109
Figura 6.68 – Resposta da Corrente na Barra 5 .....	109
Figura 6.69 – Resposta da Corrente na Barra 1 .....	111
Figura 6.70 – Resposta da Corrente na Barra 2 .....	111
Figura 6.71 – Resposta da Corrente na Barra 3 .....	112
Figura 6.72 – Resposta da Corrente na Barra 4 .....	112
Figura 6.73 – Resposta da Corrente na Barra 5 .....	112

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Tipos e Características das Turbinas a Gás .....	12
Tabela 2.2 – Tipos e Características das Células Combustíveis .....	15
Tabela 2.3 – Estimativa de Pequenas Centrais Hidrelétricas na Europa em 2005 .....	21
Tabela 2.4 – Algumas Microturbinas Existêntes no Mercado .....	21
Tabela 2.5 – Geração de Energia Geotérmica no Mundo .....	24
Tabela 4.1 – Composição Típica do Gás Natural Canalizado .....	40
Tabela 4.2 – Parâmetros do Modelo do Sistema <i>SOFC</i> .....	46
Tabela 4.3 – Parâmetros do Modelo da Microturbina do tipo <i>GAST</i> .....	51
Tabela 4.4 – Parâmetros da Máquina Assíncrona .....	52
Tabela 4.5 – Parâmetros da Máquina Síncrona a Imãs Permanentes .....	56
Tabela 4.6 – Parâmetros do Retificador do Modelo <i>MTG-ASSIN</i> .....	61
Tabela 4.7 – Parâmetros do Inversor PWM do Modelo <i>MTG-ASSIN</i> .....	61
Tabela 4.8 – Parâmetros do Retificador do Modelo <i>MTG-SINPER</i> .....	61
Tabela 4.9 – Ganhos do Controlador PI.....	64
Tabela 5.1 – Parâmetros Ajustados para o Transformador de 500 kVA .....	74
Tabela 5.2 – Parâmetros Ajustados para o Transformador de 300 kVA .....	74
Tabela 5.3 – Parâmetros Ajustados para o Transformador de 150 kVA .....	74
Tabela 5.4 – Parâmetros Ajustados para as Linhas de Distribuição .....	75
Tabela 5.5 – Parâmetros Ajustados para a Rede de Distribuição .....	75
Tabela 6.1 – Valores das Correntes de Curto do Sistema <i>SOFC</i> .....	99
Tabela 6.2 – Valores das Correntes de Curto do Sistema <i>MTG-SINPER</i> .....	103
Tabela 6.3 – Valores das Correntes de Curto do Sistema <i>MTG-ASSIN</i> .....	106
Tabela 6.4 - Valores das Correntes de Curto do Sistema <i>SOFC</i> , <i>MTG-SINPER</i> e <i>MTG-ASSIN</i> .....	113

# Lista de Siglas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
CENPES – Centro de Pesquisas da Petrobrás  
DEC – Duração Equivalente de Interrupção  
DIC – Duração de Interrupção Individual  
DMS – Distribution Management System  
ERC – Energy Research Corporation  
FEC – Frequência Equivalente de Interrupção  
FIC – Frequência de Interrupção Individual  
GD – Geração Distribuída  
GE – General Electric  
IFC – International Fuel Cells Corporation  
LATEC - Laboratório de Pesquisa em Tecnologias da Informação e da Comunicação  
MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell  
MTG – Microturbina a Gás  
MTG-ASSIN – Microturbina a Gás com Gerador Assíncrono  
MTG-SINPER – Microturbina a Gás com Gerador Síncrono a Imãs Permanentes  
PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell  
PEMFC – Próton Exchange Membrane Fuel Cell  
SOFC – Solid Oxide Fuel Cell  
SWPC – Siemens Westinghouse Power Corporation  
UTC – United Technologies Corporation

# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Objetivo .....	2
1.2. Contribuições da Dissertação .....	3
1.3. Organização da Dissertação .....	5
1.4. Motivação .....	6
2. Panorama da GD no Brasil e no Mundo .....	9
2.1. Conceitos sobre GD .....	9
2.2. Classificação da GD em Relação a Potência .....	10
2.3. Tipos de Fontes Utilizadas em GD .....	10
2.4. Impactos Positivos da GD .....	16
2.5. Impactos Negativos da GD .....	18
2.6. Presença de Fontes de GD no Mercado .....	20
2.7. A Questão Econômica .....	25
3. Revisão Bibliográfica .....	28
3.1. Modelos de Fontes Aplicados a Geração Distribuída .....	29
3.2. Modelos de Controles e Operação Aplicados Geração Distribuída .....	31
3.3. Modelos de Conversores de Potência Aplicados a Geração Distribuída .....	35
4. Modelagem do Sistema de Células Combustíveis e Microturbinas a Gás .....	38
4.1. Sistema de Células Combustíveis .....	39
4.1.1. Descrição do Modelo <i>SOFC</i> .....	40
4.1.2. Condições Iniciais do Modelo <i>SOFC</i> .....	47
4.2. Sistema de Microturbinas a Gás .....	48
4.2.1. Descrição do Modelo da Microturbina <i>GAST</i> .....	49
4.2.2. Microturbina com Máquina Assíncrona <i>MTG-ASSIN</i> .....	51
4.2.3. Microturbina com Máquina Síncrona a Imãs Permanentes <i>MTG-SINPER</i> .....	54
4.2.4. Condições Iniciais do Modelo <i>GAST</i> , <i>MTG-ASSIN</i> e <i>MTG-SINPER</i> .....	58
4.3. Modelagem dos Conversores .....	59
4.3.1. Modelagem do Conversor para a <i>MTG-ASSIN</i> e <i>MTG-SINPER</i> .....	59
4.3.2. Modelagem do Inversor para a <i>SOFC</i> .....	67
5. Modelagem da Plataforma de Simulação .....	70
5.1. Integração dos Modelos .....	70
5.2. Plataforma de Simulação .....	72
5.3. Dificuldades Encontradas .....	77
6. Resultados e Simulações .....	79
6.1. Análise do Perfil da Tensão .....	79
6.1.1. Carregamento <i>SOFC</i> .....	79

6.1.2.	Carregamento <i>MTG-ASSIN</i> .....	81
6.1.3.	Carregamento <i>MTG-SINPER</i> .....	82
6.1.4.	Avaliação dos Resultados da Análise do Perfil da Tensão .....	84
6.2.	Análise Dinâmica .....	85
6.2.1.	Aplicação de um Degrau de Carga na <i>SOFC</i> .....	86
6.2.2.	Aplicação de um Degrau de Carga na <i>MTG-ASSIN</i> .....	88
6.2.3.	Aplicação de um Degrau de Carga na <i>MTG-SINPER</i> .....	90
6.2.4.	Análise do Incremento de Carga Utilizando Células Combustíveis e Microturbinas a Gás .....	92
6.2.5.	Avaliação dos Resultados da Análise Dinâmica .....	94
6.3.	Análise Transitória .....	95
6.3.1.	Análise Transitória do Modelo <i>SOFC</i> .....	96
6.3.2.	Análise Transitória do Modelo <i>MTG-SINPER</i> .....	100
6.3.3.	Análise Transitória do Modelo <i>MTG-ASSIN</i> .....	103
6.3.4.	Análise Transitória com Células Combustíveis e Microturbinas a Gás .....	107
6.3.5.	Avaliação dos Resultados da Análise Transitória .....	114
7.	Conclusões .....	116
7.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	118
	Referências Bibliográficas .....	120

# 1. Introdução

O esgotamento de fontes primárias de energia, como o carvão e o petróleo, a restrição das áreas competitivas de geração hídrica, a dificuldade de construção de grandes barragens devido ao impacto ambiental do reservatório, a necessidade de redução da emissão de gás carbono, o processo de desregulamentação do setor elétrico, dentre outros fatores, originaram um novo ambiente que permitiu o crescimento e a inserção na matriz energética de recursos descentralizados de geração. Estes fatores, têm contribuído para o aumento da produção de energia a partir da geração distribuída, de diversas formas, com destaque para as pequenas centrais hídricas e térmicas (gás e biomassa), geração eólica, células combustíveis, solares e outras.

Esta dissertação está focada no estudo de duas fontes de energia alternativa, as células combustíveis e as microturbinas a gás. Estes dois tipos de fontes de geração distribuída são adequados para estratégias de fornecimento de energia de forma contínua, para modulação de demanda ou preço, para condições de reserva de abastecimento, e para cogeração e geração combinada.

As células combustíveis, de maneira geral, são constituídas por um reator eletroquímico que, devido a seu princípio de funcionamento, conseguem produzir eletricidade com eficiências muito maiores que outros sistemas convencionais de geração. Além disso, possuem a vantagem de apresentar baixos níveis de emissão de poluentes e ruídos, comparados com plantas convencionais e uma estrutura pequena e compacta [Willis, 2000]. Por outro lado, apresentam como desvantagem o custo inicial de implantação, visto que, a necessidade da utilização de metais nobres gera um alto custo para sua produção e também pela questão da disponibilidade, pois o combustível deve ser o hidrogênio puro, o que é difícil de se obter [Willis, 2000].

As microturbinas a gás são turbogeradores cuja faixa de potência se encontra entre 15 e 300kW [Gomes, 2003]. Além da geração distribuída, elas podem ser usadas para geração de emergência nos setores industriais, comerciais e residenciais. As microturbinas apresentam a vantagem de possuir pequeno tamanho e pouco peso por unidade de potência [Scott, 1998],

baixa emissão de ruído e poluentes, alta durabilidade, baixa manutenção, capacidade de utilizar vários combustíveis (diesel, querosene, gás natural, biogás, etanol, gás de biomassa, etc...) e o consumo de combustível é baixo comparado com outros tipos de fontes de GD [Willis, 2000]. Em contrapartida, as microturbinas, assim como os sistemas de geração térmica, apresentam baixa eficiência (em torno de 30%) e custo alto, comparado com máquinas equivalentes de mesma potência [Scott, 1998].

A mudança na regulamentação do mercado elétrico tende a aumentar estes tipos de unidades geradoras, porém, para que as microturbinas e células combustíveis sejam atrativas dentro do mercado de energia elétrica, o custo de instalação ainda precisa diminuir muito. Embora existam desvantagens, o mercado de microturbinas e células combustíveis se apresenta de interesse para a pesquisa e desenvolvimento. A utilização e operação desses dois tipos de fontes de geração de energia ainda não é muito comum, existe a necessidade de um domínio maior das características dinâmicas, transitórias e estáticas de operação de cada uma.

Uma importante variável no crescimento destes dois tipos de geração é o gás natural, uma vez que serve de combustível para as microturbinas a gás e as células combustíveis. Alguns exemplos de países que utilizam o gás natural como combustível para a geração de energia elétrica são o Brasil com 19%, os Estados Unidos, com 20%, o Canadá, com 25,4 % e Portugal, com 23% [ANEEL, 2007]. Os valores percentuais referem-se ao consumo de gás natural utilizado para a geração de eletricidade, relacionado com o consumo total de gás natural consumido em cada país.

A seguir é apresentado o objetivo do trabalho, algumas contribuições, a composição da dissertação e os fatores que levaram a escolha deste tema.

## **1.1. Objetivo**

Esta dissertação aborda o tema da modelagem, simulação e análise de um sistema de produção de energia composto por células combustíveis e microturbinas a gás, visando avaliar o comportamento dinâmico, transitório e do perfil da tensão de cada fonte, através de simulações, de forma a garantir uma operação estável e segura quando operando de forma isolada e/ou em conjunto com uma rede de distribuição.

O sistema de geração distribuída (GD) a ser estudado é composto por um grupo de cinco células combustíveis de 100 kVA cada uma, uma microturbina a gás com gerador síncrono a imãs permanentes de 300 kVA e uma microturbina a gás com gerador assíncrono de 150 kVA, onde o combustível de cada fonte é o gás natural. Para o estudo do comportamento do perfil da tensão, todas as fontes operam de forma isolada. Nas análises dinâmica e transitória são realizados estudos do comportamento das fontes operando de forma isolada, bem como, em conjunto com uma rede de distribuição de energia.

## 1.2. Contribuições da Dissertação

As contribuições desta dissertação relacionam-se com novas formas de implementação de modelos de fontes utilizando como ferramenta o software *Matlab/Simulink*, com o impacto das fontes de GD no sistema elétrico e o emprego de uma nova alternativa de fornecimento de energia elétrica utilizando células combustíveis e microturbinas a gás.

- **A Implementação de Modelos Utilizando Blocos do *SimPowerSystem***

Uma contribuição deste trabalho consiste na modelagem e implementação computacional de três diferentes tipos de fontes a serem aplicadas em geração distribuída. Estes modelos de fontes são desenvolvidos utilizando os blocos de máquinas e ponte universal extraídos da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*. Nota-se que, a maioria dos autores procura desenvolver o modelo das máquinas e dispositivos de eletrônica de potência passo a passo, através de matrizes ou funções de transferência, não utilizando os blocos do *SimPowerSystem* e, acabam levando, na maioria das vezes, muito mais tempo para a implementação de seus modelos. Assim, estes modelos, servirão como referência para qualquer trabalho onde seja necessário realizar-se simulações com os blocos do *SimPowerSystem*, permitindo maior agilidade na montagem e implementação computacional dos modelos.

### • **O Impacto das Fontes de GD no Sistema Elétrico**

Outra contribuição está relacionada ao impacto das três fontes conectadas a rede elétrica sob o ponto de vista do comportamento dinâmico e transitório. Neste trabalho, as três fontes apresentam comportamentos diferentes de acordo com o distúrbio simulado no sistema, quando conectadas a uma rede de distribuição. A análise do comportamento dinâmico e transitório de cada fonte é importante para que seja possível dimensionar o sistema de proteção a ser utilizado por cada uma delas. Assim, este trabalho contribui como meio auxiliar na escolha dos dispositivos de proteção e na configuração da proteção a ser utilizada por cada tipo de fonte apresentada.

### • **Sugestão de um Novo Sistema de Produção de Energia**

A utilização de sistemas de geração distribuída tem merecido destaque nos últimos anos, quer pelo tempo de implementação, impacto ecológico e ganhos com a eliminação de grandes linhas de transmissão. Este trabalho fornece um novo sistema de produção de energia que utiliza células combustíveis e microturbinas a gás para a geração de eletricidade, que podem ser ligadas diretamente na rede de distribuição, como também, operar de forma isolada atendendo uma demanda de acordo com a capacidade. Estes tipos de geração utilizam o gás natural como combustível e apresentam níveis baixos de emissão de poluentes e ruído. Dentre inúmeras vantagens, e de acordo com trabalhos de pesquisas de diversos autores [Lee, 2006; Ellis, 2001 e Le, 2003], a sugestão desta alternativa de fornecimento de energia para atender a um consumidor local, ou um grupo de consumidores, ou mesmo ser interligado aos sistemas de distribuição, tende a ser muito utilizada no futuro.

### • **Um Panorama Geral das Fontes de Geração de Distribuída**

Nesta dissertação, também são analisados aspectos referentes a novas fontes de geração de energia aplicadas a GD. São apresentados os tipos e características das principais fontes de GD, algumas aplicações destas fontes em parques instalados no Brasil e no Mundo, bem como, os impactos que estes tipos de fonte podem causar no sistema elétrico. Além disto, é feito um levantamento econômico da situação atual das fontes de GD, onde é avaliado aquelas que

apresentam os menores custos e melhor desempenho. Assim, esta dissertação, visa contribuir com diversas informações a respeito das fontes de geração distribuída e suas aplicações onde, obviamente, é dado maior enfoque as microturbinas e células combustíveis.

### **1.3. Organização da Dissertação**

A dissertação é composta por sete capítulos, cujos conteúdos são descritos sumariamente a seguir.

No primeiro capítulo, consta a introdução da dissertação, onde é apresentado o objetivo do trabalho, as contribuições, uma síntese geral do conteúdo da dissertação e os motivos que levaram a escolha do tema.

No segundo capítulo, é feito um estudo de um contexto geral sobre a geração distribuída. São apresentados os tipos de fontes utilizados em GD, a classificação da GD em relação a potência, os impactos positivos e negativos da conexão das fontes de GD no sistema elétrico, algumas aplicações no Brasil e no mundo e uma análise econômica destes tipos de fonte.

No terceiro capítulo, apresenta-se o estado da arte com resumos das principais referências bibliográficas relacionadas com o tema, como também outras citações que possuem alguma relação com o assunto abordado na dissertação.

No quarto capítulo, é desenvolvido a modelagem do sistema de células combustíveis e de dois sistemas de microturbinas a gás utilizando máquina síncrona a imãs permanentes e assíncrona em ambiente de *Matlab/Simulink*. São apresentadas as principais características destes sistemas, bem como, é descrito, passo a passo, a montagem de cada modelo. Neste capítulo também é desenvolvido a modelagem de um inversor, utilizado para realizar a interface entre as células combustíveis e a rede de tensão alternada e de um conversor, utilizado para fazer a interface entre as duas fontes com microturbinas e a rede elétrica.

No quinto capítulo, é realizado a integração dos modelos, o grupo de células combustíveis, a microturbina a gás com máquina síncrona a imãs permanentes e a microturbina a gás com máquina assíncrona, dando origem a uma plataforma de simulação (ou microrede) para análise dinâmica e transitória. As três fontes de GD são ligadas a um pequeno sistema de distribuição, que pode ser representado por um barramento infinito. A modelagem desta rede de distribuição, bem como, de toda a plataforma de simulação, é apresentada neste capítulo.

No sexto capítulo, são realizadas as simulações e coletados os resultados. O capítulo divide-se em três seções. Na primeira, é realizada a análise do perfil da tensão considerando cada fonte operando isoladamente com uma carga. Na segunda análise, é realizada a simulação dinâmica onde é simulado um degrau de carga, considerando cada fonte operando isoladamente, como também, um incremento de carga, considerando as três fontes operando juntas e ligadas a rede de distribuição. Na terceira, é realizada a análise transitória, através da simulação de um curto-circuito, considerando cada fonte operando de forma isolada, como também, considerando as três fontes operando juntas, ligadas a rede de distribuição.

No sétimo capítulo, é apresentada a conclusão da dissertação com base nos resultados obtidos no sexto capítulo. São descritos e avaliados os resultados das simulações e, por fim, são comentados os pontos e sugestões para possíveis trabalhos futuros relacionados ao tema.

## **1.4. Motivação**

Esta dissertação está centrada na importância e atualidade do tema para a área de sistemas de energia e a escolha deste tema justifica-se pelos seguintes itens:

- **A Importância do Tema**

A geração distribuída, os sistemas híbridos e, particularmente, as microrredes, tem merecido destaque na área de sistemas de energia. Uma revisão bibliográfica sobre o assunto mostra um aumento significativo do número de publicações sobre o tema. Entretanto, vários assuntos referentes a geração distribuída e sistemas híbridos ainda não estão bem esclarecidos e, por isso, são motivos de pesquisa. Dentre esses assuntos, destacam-se a geração de energia através de células combustíveis e a utilização de microturbinas a gás de ciclo simples em substituição aos pequenos sistemas de geração tradicionais. Este destaque apresenta a vantagem de utilizar novas tecnologias para a geração de eletricidade com melhor eficiência e desempenho.

- **A Eficiência das Células Combustíveis**

As células combustíveis apresentam uma eficiência de transformar o combustível em energia de aproximadamente 70%, enquanto que uma turbina térmica, por exemplo, a carvão, apresenta uma eficiência de até 35%, em média, para converter a energia mecânica em elétrica. De acordo com [Harmut, 2000], para que uma turbina térmica a carvão atinja uma eficiência de 70% é necessário que esta opere numa temperatura acima de 1000 °C. A eficiência de transformar o combustível em energia, no caso das microturbinas, é bem menor que a das células combustíveis. As microturbinas apresentam uma faixa de rendimento de 30 a 37%, que é caracterizado pela potência da máquina [Willis, 2000].

- **A Reduzida Dimensão das Instalações de Produção**

A microturbina apresenta, dentre outras vantagens, a de possuir dimensões e peso reduzidos por unidade de potência, quando comparada com uma turbina a vapor de mesma potência [Scott, 1998]. A mesma observação vale para as células combustíveis, que também apresentam dimensões reduzidas. Em [Serra, 2005], são apresentadas duas unidades de geração de energia a partir de células combustíveis implantadas no Brasil, uma no *LATEC (Laboratório de Pesquisa em Tecnologias da Informação e da Comunicação)*, em Curitiba, e outra no *CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás)*, no Rio de Janeiro. Ambas as unidades são de 200 kW e ocupam um volume de 3m x 3m x 5,4m. Assim, o peso e a área ocupada por um grupo de células combustíveis ou microturbinas a gás é muito menor que o peso e a área ocupada por qualquer outro tipo de geração de eletricidade de mesma potência.

- **A Questão Ambiental**

As células combustíveis apresentam, dentre outras vantagens, a baixa emissão de poluentes comparados com outros tipos de geração [Willis, 2000, Wang, 2006]. As microturbinas, além de poderem operar com uma variedade de combustíveis como o gás natural, o diesel, o óleo combustível, entre outros, possuem baixas emissões de gases ao meio ambiente, devido a utilização de sistemas de redução da emissão de gases. Assim, estas fontes alternativas

de energia contribuem com a redução das emissões de poluentes ao meio ambiente, gerando energia de uma forma mais limpa que as fontes tradicionais.

- **O Déficit Energético**

Pela facilidade de adequação a diferentes cenários de consumo, assim como pela possibilidade de serem construídas numa ampla faixa de potências, da ordem de poucos watts até alguns MW, estes sistemas permitem sua instalação em qualquer local onde se necessita de eletricidade. Podem, por exemplo, serem utilizados para alimentar um grupo de consumidores muito distante da rede elétrica, um consumidor rural, uma determinada região urbana, um hospital, um shopping center e outros, além de poderem ser interligados a uma rede de distribuição para auxiliar em situações de operação normal e/ou de emergência.

- **Atendimento as Novas Demandas de Energia**

O consumo energético tem crescido demasiadamente nos últimos anos e o subsídio para a construção de grandes usinas está sendo cada vez menor devido ao mercado energético liberalizado e competitivo. Por esta razão, cada vez são menores os investimentos em grandes projetos de fornecimento energético, incentivando as tecnologias de menores capacidades e mais eficientes.

- **Os Problemas Associados aos Sistemas de Distribuição**

As células combustíveis associadas à microturbinas podem ser instaladas perto dos consumidores ajudando significativamente na redução da tarifa de energia paga pelos mesmos. A tarifa de energia elétrica inclui um valor significativo correspondente às perdas na transmissão e distribuição de energia. Também devido as grandes distâncias das linhas de transmissão, estas estão sujeitas, em maior grau, a falhas e defeitos de causas atmosféricas.

## 2. Panorama da GD no Brasil e no Mundo

Este capítulo apresenta uma análise geral sobre a geração distribuída no Brasil e no mundo. São discutidos os aspectos relacionados a definição de geração distribuída, a qual ainda não possui uma definição uniforme, variando conforme cada país e órgão de regulamentação. São, ainda, comentados aspectos conceituais, os tipos de fontes mais utilizadas em geração distribuída, os impactos positivos e negativos deste tipo de geração, a classificação da GD quanto à potência e a questão econômica relacionada aos tipos de fontes aplicados a este sistema de geração.

### 2.1. Conceitos sobre GD

Uma definição genérica para geração distribuída (GD) pode ser colocada como: *“é toda a forma de geração que possui a produção destinada ao atendimento de um mercado local ou regional, atendendo às cargas sem a necessidade de acessar o sistema de transmissão, não estando sujeita a regras de despacho centralizado, coordenação de operação e provisão de serviços auxiliares. Este tipo de geração pode acessar diretamente do alimentador ou interligar-se a subestação da distribuidora, dependendo da potência”*. Existe uma variedade de definições usadas na literatura que classificam a GD em função dos propósitos a que se destina, da localização, da potência gerada, da tecnologia utilizada, do impacto ambiental, do modo de operação da sua propriedade e da penetração. A faixa de potência da GD, depende do autor ou da legislação do país. Outros sinônimos de geração distribuída utilizados, com pequenas variações em relação aos requisitos que devem ser cumpridos para sua classificação, são a *Geração Dispersa (Dispersed Generation)*, a qual de acordo com [Willis, 2000] é um subconjunto de

geração distribuída de potência de 10 a 250 kW, com o objetivo de atender consumidores individuais e a *Geração Embutida (Embedded Generation)*, comum na literatura europeia como sinônimo de geração distribuída [Jenkins, 2000].

## 2.2. Classificação da GD em Relação a Potência

Nas publicações [Ackermann, 2001 e Willis, 2000] são apresentados comentários sobre a classificação da GD quanto a sua potência. Esta classificação apresenta diferença entre países e também de acordo com diversos autores. [Willis, 2000] define GD na faixa de potência de 15 kW a 10 MW, [EPRI, 1994] define GD como poucos kW até 50 MW, a [Gás Research Institute, 1998], entre 25 kW a 25 MW, [Preston, 1996] de poucos kW até 100 MW, [Cardell, 1998] de 500 kW até 1 MW, o CIGRÉ, define como potências inferiores a 50 ou 100 MW [CIRED, 1999]. Cada país define sua própria faixa de potência. A Inglaterra e País de Gales, por exemplo, definem potências menores que 100 MW [Watson, 1999], a legislação sueca define a capacidade máxima da geração distribuída como 1500 kW [Menges, 1997] e no Brasil, usualmente define potência menor que 30 MW [ANEEL, 2007].

## 2.3. Tipos de Fontes Utilizadas em GD

Os sistemas de geração distribuída são compostos basicamente por fontes de pequena capacidade de geração, de alguns kW até dezenas de MW e se caracterizam, em sua maioria, por utilizar fontes de energias renováveis ou alternativas e com baixa emissão de poluentes. Dentre estes tipos de tecnologias estão as pequenas centrais hídricas e térmicas, conhecidas como PCH e PCT, respectivamente, as centrais eólicas, fotovoltaicas, células combustíveis, microturbinas a gás, a energia geotérmica e a energia das marés (*Tidal Power*). A seguir, é apresentada uma síntese geral dos principais tipos de fontes de geração utilizados em GD.

### • **Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)**

Pequena Central Hidrelétrica, ou abreviado simplesmente PCH, é toda usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1 MW e inferior a 30 MW. Além disso, a área do reservatório deve ser inferior a 3 km<sup>2</sup> [ANEEL, 2007]. Uma PCH típica normalmente opera a fio d'água, isto é, o reservatório não permite a regularização do fluxo d'água. Com isso, em ocasiões de estiagem a vazão disponível pode ser menor que a capacidade das turbinas, causando ociosidade. Em outras situações, as vazões são maiores que a capacidade de engolimento das máquinas, permitindo a passagem da água pelo vertedor. Por esse motivo, o custo da energia elétrica produzida pelas PCH é maior que o de uma usina hidrelétrica de grande porte, onde o reservatório pode ser operado de forma a diminuir a ociosidade ou os desperdícios de água. Entretanto, são instalações que resultam em menores impactos ambientais e propícias à geração descentralizada. Este tipo de hidrelétrica é utilizada principalmente em rios de pequeno e médio portes que possuam desníveis significativos durante seu percurso, gerando potência hidráulica suficiente para movimentar as turbinas.

### • **Pequenas Centrais Térmicas (PCT)**

É considerada uma usina termoelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja inferior a 30 MW [ANEEL, 2007]. As pequenas centrais térmicas, diferenciam-se uma da outra, em função do combustível utilizado por cada uma. Logo as pequenas centrais térmicas são classificadas como centrais a gás natural (caso das microturbinas a gás), a diesel, a carvão, a biomassa e outras. Na geração distribuída, devido ao fato das pequenas centrais térmicas apresentarem baixa eficiência, elas são mais utilizadas na cogeração com outras fontes de geração de forma a aumentar o rendimento. A geração de energia, varia de acordo com o tipo de combustível utilizado por cada PCT, a produção pode ocorrer através da queima de um determinado combustível (no caso da PCT a carvão ou biomassa) ou através da combustão interna (no caso da PCT a diesel e a gás natural).

As turbinas a gás, surgiram após a segunda guerra mundial, onde os primeiros trabalhos foram concentrados na área da aeronáutica. Devido a necessidade de maiores velocidades e poder de aceleração para os aviões de caça, os alemães projetaram bi-reatores, que chegaram a lutar nos céus da Europa. Os ingleses, por sua vez, projetaram bi-reatores, utilizando turbinas

desenvolvidas pela Rolls-Royce: os famosos Gloster Meteor. A partir da década de 50, as turbinas a gás passaram a ser empregadas na indústria, através do acionamento de geradores de energia elétrica, acionamento de bombas e compressores. As turbinas utilizadas nos aviões foram transformadas para aplicações industriais, não sendo mais utilizadas na aeronáutica. Com o surgimento do conceito de geração distribuída e a escassez do petróleo, as turbinas a gás passaram a ganhar mais espaço no mercado e foram classificadas de acordo com sua potência [Willis, 2000], assim surgiram as microturbinas a gás. A Tabela 2.1 apresenta um quadro da classificação das turbinas a gás quanto a potência e algumas características de cada uma.

<i>Tipo</i>	<i>Range de Potência (kVA)</i>	<i>Combustível Típico</i>	<i>Eficiência</i>	<i>Vantagens / Desvantagem</i>	<i>Turbina/Gerador normalmente são</i>	<i>Aplicações</i>
<i>Microturbina</i>	<i>20 – 500</i>	<i>Gás natural e Diesel</i>	<i>32 %</i>	<i>Custo mais alto</i>	<i>Single-shaft ou Split-Shaft</i>	<i>- Geração Distribuída - Cogeração de eletricidade e calor</i>
<i>Miniturbina</i>	<i>650 – 10000</i>	<i>Gás natural e Diesel</i>	<i>30 %</i>	<i>Custo intermediário</i>	<i>Dois eixos</i>	<i>- Cogeração de eletricidade e calor</i>
<i>Turbina</i>	<i>12500 - 265000</i>	<i>Gás natural e Diesel</i>	<i>37 %</i>	<i>Custo mais baixo</i>	<i>Dois ou três eixos</i>	<i>- Geração de Eletricidade - Cogeração de eletricidade e calor</i>

Tabela 2.1 – Tipos e Características das Turbinas a Gás [Willis, 2000]

### • Pequenas Centrais Eólicas

A energia eólica é a energia que provém do vento, ou seja, ar em movimento. A geração de eletricidade acontece através da conversão da energia eólica (energia cinética) em mecânica, através do movimento circulatório das pás de um aerogerador e posteriormente em elétrica através do acoplamento do eixo do aerogerador e o gerador elétrico. Normalmente, são agrupadas em parques eólicos, necessários para que a produção de energia se torne rentável, mas podem ser usados isoladamente, para alimentar unidades remotas e distantes da rede de transmissão ou distribuição. São consideradas pequenas centrais eólicas aquelas cuja capacidade instalada seja inferior a 30 MW [ANEEL, 2007].

A energia eólica é hoje considerada uma das mais promissoras fontes naturais de energia, principalmente porque é renovável, ou seja, não se esgota. Além disso, as turbinas eólicas podem ser utilizadas tanto em conexão com redes elétricas como em lugares isolados. Por outro lado, a grande desvantagem da energia eólica, está relacionada a quantidade de energia produzida pelo aerogerador pois, essa quantidade depende de variáveis ambientais, como a disponibilidade de vento para sua operação.

### • Fontes de Geração Solar

Energia solar é a designação dada a qualquer tipo de captação de energia luminosa (e, em certo sentido, da energia térmica) proveniente do sol, e posterior transformação dessa energia captada em alguma forma utilizável pelo homem, seja diretamente para aquecimento de água ou ainda como energia elétrica ou mecânica. No seu movimento de translação ao redor do Sol, a Terra recebe  $1410 \text{ W/m}^2$  de energia, medição feita numa superfície normal (em ângulo reto) com o Sol. Disso, aproximadamente 19% é absorvido pela atmosfera e 35% é refletido pelas nuvens. Ao passar pela atmosfera terrestre, a maior parte da energia solar está na forma de luz visível ou luz ultravioleta [IEA, 2005].

A geração de energia acontece com a utilização de células fotovoltaicas que são dispositivos capazes de transformar a energia luminosa, proveniente do sol ou de outra fonte luminosa em energia elétrica. Atualmente as células fotovoltaicas comerciais apresentam baixa eficiência de conversão da ordem de 21%, mas já foram fabricadas células de arseneto de gálio com uma eficiência de aproximadamente 28% [IEA, 2005].

Normalmente são utilizadas em residências rurais, porém em pouca quantidade no mundo todo devido ao alto custo. As células mais empregadas no mercado são as do tipo silício cristalino, com uma participação de aproximadamente 95% no mercado e apresentam um rendimento que varia de 15 a 21% [IEA, 2005].

Assim como a energia eólica, também são consideradas fontes naturais de energia e renovável, porém, em contrapartida, também dependem de variáveis ambientais, como a disponibilidade de sol para sua operação.

## • Células Combustíveis

As células combustíveis produzem energia semelhantemente ao procedimento de produção de energia de uma pilha, através de reações eletroquímicas submersas em um eletrólito. Este tipo de fonte tem merecido destaque nos últimos anos e ainda possui poucas unidades em operação por ser um tipo de fonte que se encontra principalmente em estudos.

As células combustíveis têm a vantagem de serem altamente eficientes e pouco poluentes. Podem ser utilizadas como sistemas de emergência, em zonas onde não existe rede elétrica, em aparelhos portáteis e veículos, podem ser localizadas em centros de carga ou em regiões que necessitem de um suprimento contínuo de energia, na forma de modulação de demanda ou como reserva de energia. Por outro lado, sua grande desvantagem é o alto custo de instalação, atualmente.

A primeira célula combustível foi desenvolvida no século XIX por Sir William Grove. Um esboço foi publicado em 1843. Células combustíveis não tiveram aplicação prática até 1960, quando então passaram a ser usadas no programa espacial americano para produzir eletricidade e água potável (hidrogênio e oxigênio fornecidos de tanques da aeronave), processo extremamente caro porque as células exigem hidrogênio e oxigênio puríssimo. As células rapidamente adquiriam altas temperaturas ao entrar em funcionamento o que era um problema em muitas atividades. Mais adiante avanços tecnológicos em 1980 e 1990 com o uso do Nafion como eletrólito e a redução na quantidade do caríssimo catalizador de platina tornou-se possível o uso das células por parte de consumidores do automobilismo e geração de energia por exemplo.

Existem pelos menos seis tecnologias de células combustíveis para combinarem hidrogênio e oxigênio, todas elas têm basicamente o mesmo princípio de funcionamento. Resumidamente, de um lado da célula entra o hidrogênio e do outro entra o oxigênio. No meio, entre os eletrodos, existem o eletrólito e o catalisador, que são a lógica de todo o funcionamento da célula combustível. Os tipos e características das células combustíveis são apresentados na Tabela 2.2.

As células combustíveis emergem como uma alternativa viável às baterias para uso como reserva de energia, tanto do ponto de vista técnico como do econômico. Consideradas freqüentemente como a tecnologia do futuro para uma variedade de aplicações, tais como automóveis, empilhadeiras, geração de energia estacionária contínua, laptops e etc... O Brasil apresenta as maiores oportunidades, no mundo, para a criação de uma infra-estrutura baseada no

hidrogênio, energias renováveis e células combustíveis, pois é um país com abundância em sol, vento, biomassa, biogás, biodiesel, água, hidrelétricas e fácil acesso ao mar.

<i>Tipo</i>	<i>Eletrólito</i>	<i>Faixa de Temperatura (°C)</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>	<i>Aplicações</i>
<i>Alcalina (AFC)</i>	<i>KOH (OH<sup>-</sup>)</i>	<i>60 – 90</i>	<i>- Alta eficiência (83%)</i>	<i>- Sensível a CO<sub>2</sub> - Gases ultra puros, sem reforma do combustível</i>	<i>- Espaçonaves - Aplicações Militares</i>
<i>Membrana (PEMFC)</i>	<i>Polímero Nafton (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>)</i>	<i>80 - 90</i>	<i>- Alta densidade - Operação Flexível</i>	<i>- Custo da Membrana - Contaminação do Catalisador com CO</i>	<i>- Veículos Automotores e catalisador - Espaçonaves - Mobilidade</i>
<i>Ácido Fosfórico (PAFC)</i>	<i>H<sub>3</sub>PO<sub>3</sub> (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>)</i>	<i>160 – 200</i>	<i>Maior desenvolvimento tecnológico</i>	<i>- Controle da porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão</i>	<i>- Unidades estacionárias - Cogeração de eletricidade e calor</i>
<i>Carbonatos Fundidos (MCFC)</i>	<i>Carbonatos Fundidos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)</i>	<i>650 - 700</i>	<i>Tolerância a CO/CO<sub>2</sub> - Eletrodos a base de Ni</i>	<i>- Problemas de Materiais - Necessidade da reciclagem de CO<sub>2</sub> - Interface trifásica de difícil controle</i>	<i>-Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração de eletricidade e calor</i>
<i>Cerâmicas (SOFC)</i>	<i>ZrO<sub>2</sub> (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)</i>	<i>800 - 900</i>	<i>- Alta eficiência - A reforma do combustível pode ser feita na célula</i>	<i>- Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma</i>	<i>- Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW - Cogeração de eletricidade e calor</i>

Tabela 2.2 – Tipos e Características das Células Combustíveis [Hartmut, 2000]

## • Energia Geotérmica

A tecnologia para aproveitamento geotérmico utiliza o calor do interior da terra para aplicações diretas do calor, como por exemplo a produção de vapor para gerar eletricidade e o aquecimento de água para fins industriais. Este tipo de geração de energia é ecologicamente correto, pois é limpo, sem emissões de CO<sub>2</sub> e de resíduos para o meio ambiente. Utiliza um espaço limitado e próximo a fonte geradora de calor (vulcão, gêiser), possui uma produção contínua e flexibilidade quanto a capacidade de geração.

Em usinas geotérmicas o vapor, calor ou água quente de fontes e reservatórios geotérmicos provêm a força necessária para girar as turbinas conectadas a um gerador. A água utilizada da fonte geotérmica é retornada através de um tubo de injeção para o reservatório a fim

de ser reaquecida e manter a pressão num nível adequado do reservatório. Existem três tipos de usinas geotérmicas: usinas de vapor seco, que utilizam reservatórios de vapor seco, usinas que utilizam reservatórios de água quente e as chamadas usinas geotérmicas binárias, que utilizam reservatórios de temperaturas inferiores.

Os maiores problemas, ou limitações, deste tipo de geração estão relacionados a sua localização, a qual deve ser um local em que exista a presença de fontes de calor do interior da terra (vulcões, rochas superaquecidas, gêiser).

### • Energia das Marés

As usinas que utilizam o princípio de variação das marés para gerar eletricidade funcionam de maneira semelhante a geração hidrelétrica. Para gerar energia a partir das marés são construídas longas barragens com casas de força (gerador e turbinas) localizados em estuários, a fim de formar uma base de captação de água que surge devido a diferença das marés, o que permite produzir uma quantidade suficiente de energia com o fluxo d'água. Os projetos mais simples tem o princípio de permitir que durante a subida da maré a água penetre através de comportas (*floodgates*), inundando um reservatório, e durante o recuo em direção a maré baixa a água faz girar as turbinas localizadas sobre a barragem.

Além da produção de energia originada da variação das marés, existem, pelo menos, mais dois diferentes tipos de produção de energia que utilizam o mar: a produção de energia a partir das ondas, que utiliza o movimento de subida/descida da onda para dar potência a um êmbolo que se move para cima e para baixo num cilindro podendo acionar um gerador e a produção de energia a partir das diferenças de temperaturas entre o fundo do mar e a superfície do oceano.

## 2.4. Impactos Positivos da GD

Os principais impactos da conexão da GD são sentidos nos sistemas de distribuição, embora tenha benefícios de forma indireta nos sistemas de transmissão. Esses benefícios podem variar em cada país, em função do nível de potência e tensão que classificam um

empreendimento como geração distribuída. Entretanto, um conjunto de impactos positivos podem ser esperados com a conexão de GD, tais como:

- **Confiabilidade**

A possibilidade da operação ilhada, atendendo total ou parcialmente os consumidores, acrescenta uma melhoria nos níveis de confiabilidade, no Brasil referidos como continuidade, tanto os coletivos *DEC (Duração Equivalente de Interrupção)* e *FEC (Frequência Equivalente de Interrupção)* por Unidade Consumidora, quanto aos individuais, *DIC (Duração de Interrupção Individual)* por Unidade Consumidora e *FIC (Frequência de Interrupção Individual)* por Unidade Consumidora. Isto é particularmente importante do ponto de vista de muitas regulatórias e bem estar social da população.

- **Regulação de Tensão**

A inserção de fontes de geração distribuída contribui para a melhoria do perfil de tensão do sistema em situações normais de operação e de emergência. Entretanto, se forem consideradas situações de baixo carregamento, onde é necessário manter o nível de tensão no ponto de conexão em valores dentro de uma faixa de operação aceitável, podem acontecer sobretensões na barra de conexão da GD e nos pontos adjacentes da rede. Nesta situação, pode ser desejável a desconexão da GD ou a diminuição da injeção de reativos, se este tipo de operação for possível. Além disto, as fontes de GD auxiliam na melhoria do fator de potência e a diminuição das perdas ativas, também em consequência da diminuição da queda de tensão e do fluxo de reativos.

- **Mercado e Tarifas**

A inserção de GD no sistema permite a redução das perdas, a modulação da demanda e liberação de capacidade, o que implica um impacto positivo nas tarifas de uso da rede, além de proporcionar uma opção de contratação por parte de consumidores livres. Além disso, em mercados com preços de energia negociados de forma on-line, ou em intervalos temporais, dependendo do preço da energia, a GD pode ser operada em horas de pico do preço da energia,

na base para modular a demanda, ou, ainda, como uma opção de geração própria, principalmente em indústrias, para evitar ultrapassagem de níveis de demanda e energia.

- **Qualidade de Energia**

A utilização de dispositivos de eletrônica de potência em fontes de geração de energia, como é o caso dos conversores das microturbinas e inversor da célula combustível, permitem um controle da tensão na barra em que são ligados, como também, um controle do despacho de potência ativa e reativa, pois os dispositivos possuem sistemas de controle modelados para estes fins. Desta forma, os inversores e conversores ligados as fontes de GD asseguram uma melhor qualidade da onda de tensão e despacho de potência de cada fonte. Além disto, a utilização de filtros podem auxiliar na melhoria do fator de potência do sistema.

## **2.5. Impactos Negativos da GD**

Alguns dos impactos considerados como negativos são consequência do projeto dos atuais sistemas, baseados em uma hierarquia verticalizada e centralizada. A tendência, com o tempo, é que estes impactos sejam minizados ou mesmo eliminados à medida que forem aparecendo novas tecnologias e projetos modernizados de sistemas de energia. Desta forma, no presente momento, os principais impactos negativos são os seguintes:

- **Níveis de Curto-Circuito**

A conexão de GD aumenta os níveis de curto-circuito na rede. Esta situação ocasiona a necessidade de redimensionamento de condutores e dispositivos de proteção e controle, sendo este impacto maior em sistemas de distribuição.

- **Aumento da Tensão**

Embora seja uma vantagem da GD a regulação da tensão, em situações de baixo carregamento isto pode vir a ser uma desvantagem, a medida que, para manter uma GD conectada é necessário um nível de tensão adequado no ponto de conexão, o que pode acarretar uma sobretensão neste ponto e nos pontos adjacentes a esta conexão. Assim, dependendo da configuração do sistema os níveis de tensão podem extrapolar os limites aceitáveis de operação. Um modo de contornar esta situação é a desconexão da GD do sistema durante as horas de baixa carga. Outra medida que pode ser adotada é a utilização de sistemas coordenados de tensão para realizar um ajuste conjunto sobre todo o sistema.

- **Transitórios de Partida**

O uso de tecnologias de GD que utilizam máquinas assíncronas ou síncronas a imãs permanentes geram um aumento nos transitórios de partida, em muitos casos superiores a 3 ciclos. As células combustíveis e fotovoltaicas também apresentam transitórios de partida, porém em valores menores do que as tecnologias com máquinas síncronas e assíncronas. Estes transitórios além de apresentarem elevados valores podem prejudicar os sistemas de proteção sistêmicos.

- **Coordenação da Proteção**

Este item é particularmente importante nos sistemas de distribuição, visto que estes sistemas foram concebidos para operarem, prioritariamente, de forma radial com fluxo unidirecional. Esta situação conduziu a esquemas de coordenação e seletividade da proteção sem direcionalidade e baseados na lógica relé – religador – fusível, coordenados da carga para a fonte. A inserção de GD operando em paralelo com o sistema pode, em condições normais, programadas e em situações de emergência, conduzir a ilhamentos de pequenos subsistemas, o que pode conduzir a problemas de segurança na recomposição do sistema.

- **Disponibilidade Energética**

Algumas tecnologias tem o aspecto negativo de não possuir a chamada energia firme, pois dependem de variáveis ambientais, como é o caso da energia solar, da geração eólica e das pequenas centrais hídricas (não possuem reservatórios de regulação).

- **Gerenciamento da Operação**

A medida que o despacho da GD não é centralizado, cada empreendimento pode, em princípio, despachar a potência que desejar no tempo que desejar, desde que ao final de um determinado período tenha integralizado a energia de contrato. Esta situação tem impacto direto na previsão de compra de energia e de despacho de outras unidades geradoras. Além disso, é necessário incluir a monitoração das fontes de GD em sistemas do tipo *DMS* a fim de que a segurança do sistema possa ser monitorada.

## **2.6. Presença de Fontes de GD no Mercado**

Nesta seção são apresentadas as principais instalações de cada tipo de fonte de GD no Brasil e no Mundo, considerando a classificação da potência atribuída para a Geração Distribuída.

- **Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)**

A capacidade instalada de PCH no Brasil é cerca de 1.400 MW distribuídos em 260 usinas [Filho, 2006]. Segundo uma estimativa apresentada em [Small Hydropower Barometer, 2006] a capacidade instalada de PCH em alguns países da União Européia é apresentada na Tabela 2.3 onde a capacidade total instalada na Europa abrange os demais países do continente.

<i>País</i>	<i>Itália</i>	<i>França</i>	<i>Espanha</i>	<i>Alemanha</i>	<i>Austria</i>	<i>Suécia</i>	<i>Portugal</i>	<i>Grécia</i>	<i>Hungria</i>	<i>Europa Total</i>
<i>Capacidade (MW)</i>	2592	2040	1788	1584	994	823	267	89	9	11643

Tabela 2.3 – Estimativa de Pequenas Centrais Hidrelétricas na Europa em 2005 [Small Hydropower Barometer, 2006]

### • Pequenas Centrais Termoelétricas (PCT)

As pequenas centrais termoelétricas a gás natural, apresentam uma capacidade instalada no Brasil, de acordo com [Filho, 2006] de aproximadamente 9.400 MW distribuídos em 70 usinas. De acordo com o Atlas, publicado por [ANEEL, 2007] podem citar-se como termoelétricas a gás natural instaladas no Brasil: a central termoelétrica de *Alto Rodrigues*, no Rio Grande do Norte, com capacidade de 11,8 MW; *Atalaia*, em Aracaju, com 4,6 MW instalados; a *Bhrama*, no Rio de Janeiro, com aproximadamente 13 MW instalados; a *Energy Works Kaiser Jacareí*, em São Paulo, com capacidade instalada de 8,5 MW; a *Metalurgia Caraíba*, na Bahia, com 18 MW instalados; a *Souza Cruz*, em Cachoerinha, no Rio Grande do Sul, com capacidade de 2,9 MW. No contexto global, também existem inúmeras centrais termoelétricas a gás natural. [Rendón, 2005] apresenta uma tabela com vários modelos de microturbinas térmicas relacionadas com o fabricante, modelo, país e tipo de combustível a ser utilizado, conforme pode ser visualizado na Tabela 2.4. Sendo que a maioria desenvolvida para operar com gás natural. Já existem plantas termoelétricas com todos os modelos de turbinas apresentadas na Tabela 2.4.

<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>País</i>	<i>Potência</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>
<i>Capstone</i>	<i>C30</i>	<i>USA</i>	<i>30 kW</i>	<i>Diesel, Biogás,</i>	<i>26 %</i>
	<i>C60</i>		<i>60 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	<i>28 %</i>
<i>Elliot</i>	<i>TA 80R</i>	<i>USA</i>	<i>80 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	<i>28 %</i>
<i>Ingersoll Rand</i>	<i>MT70</i>	<i>USA</i>	<i>70 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	<i>28 %</i>
	<i>MT250</i>		<i>250 KW</i>		<i>29 %</i>
<i>Avon Aero</i>	<i>T-62T-32</i>	<i>USA</i>	<i>60 kW</i>	<i>Gasolina, Kerosene, JP-4</i>	
<i>Bowman</i>	<i>TG-80-RCG</i>	<i>UK</i>	<i>80 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	<i>28 %</i>
<i>Kawasaki</i>	<i>GPS250</i>	<i>Japão</i>	<i>250 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	
<i>Turbec</i>	<i>T100-CHP</i>	<i>Suécia</i>	<i>100 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	<i>30 %</i>
<i>Honeywell</i>	-	<i>USA</i>	<i>75 kW</i>	<i>Gás Natural</i>	<i>24 %</i>
<i>Turbo Genset</i>	<i>TG50</i>	<i>França</i>	<i>50 kVA</i>	<i>Gás Natural</i>	

Tabela 2.4 - Algumas Microturbinas Existentes no Mercado [Rendón, 2005]

As termoeletricas a óleo diesel apresentam uma capacidade instalada de 3.500 MW divididas em 491 usinas. As pequenas termoeletricas originadas da biomassa possuem uma capacidade instalada de aproximadamente 3.251 MW distribuídos em 259 usinas, dentre elas a grande maioria possui como fonte primária o bagaço de cana. Além desta fonte primária, existem no Brasil, dentro das 259 pequenas termoeletricas, usinas com fonte de licor negro, madeira, biogás e casca de arroz [Filho, 2006]. A capacidade instalada de PCT no mundo é difícil de se estimar, pois abrange uma série de fontes que derivam do combustível aplicado como fonte primária para a geração. Estas fontes podem ser a gás natural, óleo, diesel, carvão, bagaço da cana, madeira, entre outros. Alguns exemplos, como no caso de Portugal, existem duas termoeletrica de pequeno porte a biomassa, originadas de resíduos florestais, chamadas de *Central Termoeletrica do Ródão*, com capacidade de gerar aproximadamente 14 MW e *Central Termoeletrica de Mortágua*, com capacidade de gerar 9 MW.

#### • Pequenas Centrais Eólicas

A eólica apresenta uma capacidade instalada no Brasil de 28,5 MW, distribuídas em 10 usinas, considerando apenas pequenas centrais de geração eólica [Filho, 2006]. Pois, atualmente, o Brasil tem uma capacidade instalada de plantas eólicas de 237 MW porém, a maioria com potência instalada superior a 30 MW e portanto não são consideradas como fontes de geração distribuída. Já a capacidade mundial, até 2005 era de aproximadamente 59 GW e em alguns países representa uma significativa parcela na demanda, como é o caso da Dinamarca que representa 23% da produção, na Alemanha 6% e cerca de 8% em Portugal e Espanha [ANEEL, 2007]. Dentre estes 59 GW, boa parte é produzida por pequenas centrais eólicas, porém, uma capacidade exata da produção de eletricidade a partir de pequenas centrais eólicas não foi encontrado na literatura. No Brasil, segundo o atlas publicado por [ANEEL, 2007], podem citar-se como usinas eólicas com capacidade inferior a 30 MW: a eólica de *Água Doce*, em Santa Catarina, com capacidade instalada de 9 MW; a eólica *Ariós*, no Ceará, com capacidade instalada de aproximadamente 16 MW; a eólica *Canoa Quebrada*, no Ceará, com capacidade instalada de 10,5 MW, entre outras.

### • Fontes de Geração Solar

Em 2004 a capacidade instalada mundial de energia solar era de 2,6 GW, cerca de 18% da capacidade instalada de Itaipu. Os principais países produtores, curiosamente, estão situados em latitudes médias e altas. O maior produtor mundial é o Japão (com 1,13 GW instalados), seguido da Alemanha (com 794 MW) e Estados Unidos (365 MW) [IEA, 2005]. Entrou em funcionamento em 27 de Março de 2007 a *Central Solar Fotovoltaica de Serpa (CSFS)*, a maior unidade do gênero do Mundo. Fica situada na freguesia de Brinches, Alentejo, Portugal, numa das áreas de maior exposição solar da Europa. Tem capacidade instalada de 11 MW, suficiente para abastecer cerca de oito mil habitações. A redução de emissão de gases de estufa conseguida por esta fonte de energia limpa será de 400 000 toneladas por ano [IEA, 2005]. Além desta, existe também em Portugal uma central solar chamada de *Central Solar de Tavira*, com capacidade de gerar 5,2 MW. Em geral, toda a potência instalada no mundo de energia solar, é considerada de pequena produção, inferior a 30 MW e portanto classificadas como fontes de geração distribuída. No Brasil, a *Petrobrás* possui cerca de 100 kW instalados em painéis fotovoltaicos de baixa potência, até 3 kW, para diversas finalidades [Sauer, 2006]. Em geral a maioria dos painéis solares instalados no Brasil são utilizados em residências e, principalmente, na área rural, para a geração de eletricidade e calor.

### • Células Combustíveis

No Brasil, segundo [Serra, 2005], existem duas centrais de geração de energia a partir de células combustíveis do tipo *PEMFC*, com uma capacidade instalada de 400 kW, sendo de 200 kW cada uma: uma instalada no *LATEC* e outra no *CENPES*. Na *Unicamp* também existe uma microrede, composta por uma célula combustível, uma microturbina a gás e um painel fotovoltaico. A microrede tem capacidade de gerar 40 kW, sendo 6 kW pela célula combustível, 24 kW pela microturbina e 10 kW pelo painel fotovoltaico [Unicamp, 2008]. Já no contexto internacional, existem várias células combustíveis implantadas em diversos países e vários fabricantes estão desenvolvendo e melhorando este novo tipo de tecnologia. A *Ballard Generation Systems*, subsidiária da *Ballard Power Systems*, produziu protótipos de 250 kW para geração estacionária baseados em células do tipo *PEMFC* [EG&G, 2000 e Ballard, 2007]. A *International Fuel Cells Corporation (IFC)*, uma divisão da *United Technologies Corporation*

(UTC), desenvolveu uma estação geradora de 200 kW com células combustíveis do tipo *PAFC* [EG&G, 2000 e Wolk, 1999]. A *Energy Research Corporation (ERC)* desenvolveu uma estação geradora de 1,8 MW com células combustíveis do tipo *MCFC* e foi implantada na cidade de Santa Clara, Califórnia, EUA [EG&G, 2000 e Wolk, 1999]. A *Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC)* já tem diversos sistemas operando em instalações de usuários de células combustíveis do tipo *SOFC*. O sistema de maior potência é de 220 kW e usa um conceito inovador de sistema híbrido célula combustível/turbina a gás. Nesse sistema pioneiro, uma *SOFC* tubular de 200 kW está associada a uma turbina a gás de 20 kW. A célula combustível trabalha a uma pressão de 3,5 atm e substitui a câmara de combustão da turbina [EG&G, 2000 e Wolk, 1999].

### • Energia Geotérmica

A geração geotérmica tem crescido muito nos últimos anos por apresentar custos competitivos comparados com as demais fontes de energia. Até 2003 a capacidade instalada de energia geotérmica para a geração de eletricidade no mundo era em torno de 8402 MW distribuídos em 24 países [IGA, 2008]. O Brasil não possui este tipo de geração de eletricidade instalado em seu território. De acordo com a Tabela 2.5, são apresentados alguns dos países que possuem este tipo de geração instalados em seus territórios.

<i>País</i>	<i>China</i>	<i>França</i>	<i>Portugal</i>	<i>Turquia</i>	<i>Etiópia</i>	<i>Áustria</i>	<i>Guatemala</i>	<i>Áustria</i>
<i>Capacidade (MW)</i>	28,18	15,0	16,0	20,4	7,0	1,25	29,0	1,25

Tabela 2.5 – Geração de Energia Geotérmica no Mundo [IGA, 2008]

Além destes, países como Costa Rica, El Salvador, Indonésia, Itália, Japão e México produzem mais de 100 MW de energia geotérmica e países como Filipinas e Estados Unidos são os maiores produtores deste tipo de fonte energética com capacidades instaladas próximas de 2000 MW [IGA, 2008].

- **Energia das Marés**

A maior usina maremotriz em operação é a *La Rance Tidal Barrage*. Foi construída em 1960, nos arredores de St. Malo (França). Possui uma barragem de 330m com uma superfície de contato de 22 km<sup>2</sup>. A variação média da maré é de 8 metros. A usina possui 24 conjuntos turbina-gerador do tipo bulbo, com 5,35 metros de diâmetros e 470 T. Cada unidade possui uma potência nominal de 10 MW para uma variação de marés. A potência total da usina, de 240 MW, é suficiente para abastecer 4% das residências da região da Britania [INSEE, 2008]. Em novembro de 2006 a usina fez 40 anos em serviço, sem nunca ter apresentado nenhum evento grave de operação. Outra usina em operação está localizada em Annapolis, *Bay of Fundy*, Nova Escócia, Canadá. A usina possui uma potência nominal de 16 MW [World`s Higest Tides, 2008]. Em Lynmouth, Devon, no Reino Unido, uma turbina de 300 kW foi a primeira turbina a produzir eletricidade através do fluxo de marés na Europa [AEA Energy & Environment, 2007].

## 2.7. Questão Econômica

A questão econômica sempre foi um fator predominante na escolha do melhor tipo de fonte para a geração de eletricidade. Atualmente, a questão econômica está relacionada com a questão ambiental. Então exige-se fontes de geração de energia a custos mais baixos e de forma limpa. As células combustíveis e microturbinas a gás produzem energia de forma limpa, ou com baixas emissões de poluentes comparados com outros tipos de fontes de produção de energia, porém seus custos de implementação ainda são muito elevados, devido ao fato de serem duas tecnologias recentes.

As novas fontes de geração distribuída como as células combustíveis e microturbinas a gás apresentam ainda altos custos de implantação. Segundo a estimativa de [Willis, 2000], células combustíveis do tipo *PEMFC* apresentam custos de instalação de aproximadamente 1200 U\$/kW, que representam custos bem menores que as células do tipo *SOFc*, estimadas em 3000 U\$/kW. Já sistemas com microturbinas a gás apresentam custos de instalação próximos a 700 U\$/kW [Willis, 2000]. Estes custos são baixos se comparados com os sistemas solares fotovoltaicos, que segundo o autor, são estimados em 4000 U\$/kW, porém, no caso das células combustíveis, os custos de instalação ainda são muito maiores que fontes tradicionais de geração

de energia. Por outro lado, de acordo com uma estimativa levantada por [CBO, 2003], é apresentado um levantamento da tarifa de energia de diferentes tipos de fontes de GD se aplicadas nos sistemas elétricos para fornecimento de energia. Esta estimativa é apresentada na Figura 2.1.

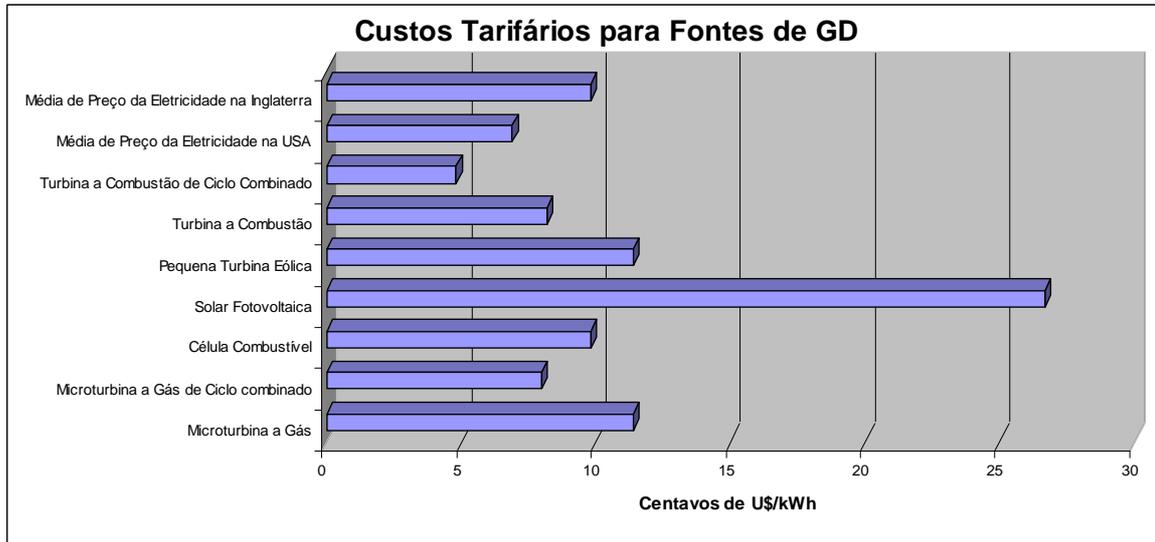


Figura 2.1 – Custos em Centavos de U\$/kWh [CBO, 2003]

Através da Figura 2.1, observa-se que a tarifação da energia produzida a partir das células combustíveis é, de acordo com a estimativa, equivalente a média do preço do custo da eletricidade cobrada na Inglaterra, e o custo tarifário estimado para as microturbinas gás operando a ciclo simples, como é o caso deste trabalho, apresenta valores um pouco acima das demais fontes e, fica evidente, através da Figura 2.1, que a utilização de microturbinas a gás de ciclo combinado apresentam uma significativa redução no custo tarifário da sua energia.

Como afirmam diversos autores, com o desenvolvimento e aprimoramento destes novos tipos de fontes de energia, a criação de um mercado competitivo, o aumento da demanda de energia, a necessidade de geração de energia de forma limpa, a possibilidade de se utilizar diferentes combustíveis e a evolução destas duas tecnologias através da pesquisa, tendem a diminuir os custos de instalação e fabricação destes tipos de fonte ao longo dos anos e, devido as suas grandes vantagens de operação, como a alta eficiência das células combustíveis e aos baixos valores de emissão de poluentes, estas fontes de células combustíveis e microturbinas a gás deverão ser muito utilizadas para a geração de energia em locais isolados da rede elétrica, como também conectados aos sistemas de distribuição de energia para operarem em situações de

emergência, horários de ponta, ou até mesmo, quando ocorrerem interrupções programadas para manutenção da rede.

Na seqüência é apresentada uma revisão bibliográfica relacionada a modelos de fontes de células combustíveis e microturbinas a gás, controle, operação e dispositivos de eletrônica de potência aplicados a fontes de geração distribuída para realizarem a interface com as redes de distribuição.

### 3. Revisão Bibliográfica

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação está relacionada a um tema atual em nível acadêmico e tecnológico. Os aspectos relacionados a novas fontes de geração de energia como as células combustíveis e microturbinas a gás, tratadas nesta dissertação como fontes de Geração Distribuída, tem merecido destaque nos últimos anos [Lee, 2006]. Estudos da utilização de novas fontes de energia para a geração de eletricidade [Cavaliero, 2000], o desenvolvimento das microredes para a geração de energia [Lasseter, 2002 e Hatziargyriou, 2005], as células combustíveis [Ellis, 2001 e Le, 2003] e as microturbinas a gás [Nagpal, 2001 e Al-Hinai, 2002] são todos assuntos de referências publicadas no início deste século.

A revisão bibliográfica apresentada nesta dissertação está focada em assuntos relacionados as microturbinas a gás e células combustíveis, bem como, no desenvolvimento de uma microrede para geração de energia, capaz de operar em conjunto com uma rede de distribuição. Na revisão são apresentados resumos de artigos relacionados aos modelos de fontes de microturbinas a gás e células combustíveis, estratégias de controle e operação aplicados a estes dois tipos de fontes, bem como são apresentadas algumas estruturas de interface aplicadas as fontes, baseadas na utilização de dispositivos de eletrônica de potência.

Num contexto geral, relacionado ao tema do presente trabalho, [Hatziadoniu, 2002] apresenta um modelo simplificado de células combustíveis e explica o efeito da mistura entre células combustíveis e microturbinas a gás em relação a estabilidade de sistemas. [Kimijlma, 2002; Wang, 2006; Chilvers, 2002] discutem com detalhes a modelagem dinâmica e simulação de microturbinas e células combustíveis. [Hartmut, 2000] apresenta o princípio de funcionamento e as aplicações dos diferentes tipos de células combustíveis. [Sakhare, 2004 e Jurado, 2005] apresentam técnicas de controle para células combustíveis utilizando lógica fuzzy. [Schindele, 2005] descreve a influência dos dispositivos de eletrônica de potência aplicados a células combustíveis e outras fontes de geração distribuída. [Massardo, 2002 e Veyo, 2002] desenvolvem sistemas híbridos de ciclo combinado entre células combustíveis e microturbinas a gás. O primeiro modelo da turbina a gás é desenvolvido por [Rowen, 1983], o qual obtém a

patente da mesma. Baseado no modelo proposto por ele, novos autores procuram fazer melhorias como é o caso do [Hajagos, 2001], que faz testes comparativos no modelo proposto por [Rowen, 1983] e [Jurado, 2000] que modifica o modelo de Rowen utilizando dois blocos fuzzy cujos ganhos são ajustados usando redes neurais. [Jurado, 2006] também desenvolve um controle preditivo para turbinas a gás que melhora a estabilidade dos sistemas de distribuição. Além dele, [Nikkhajoei, 2007] faz um estudo de transitórios eletromagnéticos de microturbinas a gás baseado em sistemas de geração distribuída e [Yee, 2007], faz uma análise comparativa para estudos de estabilidade entre dois diferentes modelos de turbinas a gás: o modelo do Rowen e o modelo do IEEE.

A seguir, apresenta-se uma síntese bibliográfica utilizada para embasar a proposta de dissertação, a qual está separada em três partes: modelos de fontes aplicadas a geração distribuída, controle e operação e conversores de potência.

### **3.1. Modelos de Fontes Aplicadas a Geração Distribuída**

Nesta seção, são apresentados resumos de artigos encontrados na literatura que descrevem ou apresentam os modelos das fontes de células combustíveis e microturbinas a gás. Praticamente todos os autores utilizam o mesmo modelo dinâmico da célula combustível, a principal diferença encontrada no modelo da célula foi na forma de utilização do combustível onde cada autor utiliza uma técnica diferente. No caso das microturbinas, existem modelos complexos e modelos simplificados, os simplificados são mais utilizados para estudos elétricos, já os mais complexos são utilizados para estudos de desempenho e eficiência da microturbina. Além disto, as microturbinas podem ser de um ou dois eixos e o eixo da turbina pode ser acoplado diretamente ao eixo do gerador ou através de um sistema de redução de velocidade, o que vai influenciar diretamente na velocidade e frequência da microturbina.

Em [Al-Hinai, 2002], é desenvolvido um modelo dinâmico de uma microturbina a gás para ser usado em geração distribuída. O modelo é adequado para análises transitórias e simulação de sistemas não balanceados, sendo uma simplificação do modelo proposto por [Rowen, 1983], porém, um pouco diferente do modelo *GAST*, utilizado neste trabalho, por incluir a parte termodinâmica da microturbina. O modelo foi desenvolvido em ambiente de

*Matlab/Simulink* sendo composto por uma microturbina a gás que possui um controle de velocidade e de combustível, um gerador a ímãs permanentes, um conversor CA/CC e um inversor CC/CA. Os conversores são utilizados para reduzir o alto valor de frequência gerado pela microturbina a gás, já que neste artigo o modelo da microturbina é do tipo *single-shaft*. Os resultados apresentam respostas satisfatórias e são realizados através da simulação de um desequilíbrio no sistema composto pela microturbina operando de forma isolada.

Em [Azmy, 2003], são discutidos aspectos da modelagem dinâmica e simulação de células combustíveis e microturbinas a gás como parte de um sistema elétrico responsável por 30% da geração de energia de um determinado sistema. As fontes de GD são conectadas em diferentes barras de um sistema multi-máquinas e, então, são analisados o desempenho destas fontes através da aplicação de vários distúrbios. A modelagem e simulações são realizadas usando uma ferramenta de simulação chamada *Power Systems Dynamic (PSD)*. A microturbina é composta por um gerador a ímãs permanentes e um cicloconversor responsável por regular a frequência e tensão da máquina. As células combustíveis utilizadas são do tipo *PEMFC*, seu modelo é representado por um circuito RLC equivalente ligado a um inversor. Os resultados mostram que as unidades de GD podem absorver grandes distúrbios causados no sistema. No entanto, estas fontes de GD não respondem a oscilações entre áreas ou outros fenômenos de redes de alta tensão.

Em [Costamagna, 2001], é analisado o desempenho de um sistema híbrido de ciclo combinado do tipo *SOFC-MTG*. A modelagem é feita através de algoritmos no *Matlab* com base nas equações de cada parte (gerador, compressor, reformador, etc...) de cada modelo, obtidas da literatura. O modelo da célula combustível é dividido em três partes: o misturador, o reformador e a célula combustível. O modelo da microturbina é dividido em cinco partes: um compressor, um trocador de calor, a câmara de combustão, o gerador elétrico e um compressor. As duas fontes são interligadas através da câmara de combustão que alimenta a microturbina a partir dos gases liberados pela célula combustível a altas temperaturas. Os resultados mostram que quando as fontes são acopladas obtém-se eficiências médias em torno de 60%. Neste artigo o fator de utilização de combustível é considerado constante, ao contrário do que é feito nesta dissertação onde a utilização do combustível opera dentro dos limites mínimos e máximos, podendo assim ser melhor aproveitado, além de representar mais fielmente o modelo.

A dissertação de [Gil, 2003] apresenta uma plataforma de simulação (microrede) composta por um grupo de geração a diesel, um pequeno grupo térmico, um pequeno grupo

hídrico, uma microturbina a gás, um grupo de células combustíveis e um grupo eólico com dois diferentes controles, sendo um duplamente alimentado. O estudo faz uma análise comparativa entre os dois tipos de controle aplicados ao grupo eólico e define, através deles, os limites de integração entre a produção eólica e o sistema, bem como, analisa o desempenho da plataforma de simulação composta pelas diversas fontes de GD.

Em [Padullés, 1999], é criado um modelo de simulação de uma célula combustível e de um condicionador de potência e é verificado seu desempenho e operação, usando um software chamado *PSS (Power System Simulation)*. São definidos os limites de operação da planta onde conclui-se que a utilização do combustível não pode ser inferior a 70%, dado que a tensão da célula combustível cresce rapidamente e pode fazer o condicionador de potência perder o sincronismo, nem superior a 90% pois, neste caso, as células sofrem saturação. Logo, fica evidente a necessidade de se utilizar um limitador no modelo da célula combustível para limitar a entrada de combustível, que mais tarde é desenvolvido por [Zhu, 2002].

Em [Zhu, 2002], é desenvolvido um modelo simplificado de um grupo de microturbinas a gás e de um grupo de células combustíveis. É realizado um acompanhamento de carga (load-following) quando simulado um degrau de potência para três diferentes cenários. É analisado o comportamento dinâmico do grupo de microturbinas a gás operando isoladamente, do grupo de células combustíveis operando isoladamente e das duas fontes ligadas em diferentes barras de um sistema elétrico. O modelo da célula combustível é o mesmo que o desenvolvido nesta dissertação e o modelo da microturbina *GAST* também, porém, os modelos dos geradores são diferentes pois os blocos destas máquinas, utilizados nesta dissertação, são extraídos da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*. Este artigo, que apresenta parte da análise desenvolvida nesta dissertação, foi tomado como base para validar o modelo das fontes de microturbinas e células combustíveis.

## **3.2. Modelos de Controles e Operação Aplicados a Geração Distribuída**

Nesta parte, são apresentados resumos de artigos que analisam o comportamento e desempenho das fontes de GD, principalmente as células combustíveis e microturbinas a gás,

quando operando de forma isolada e ilhada com uma rede de distribuição, além disto são apresentadas técnicas de controles aplicadas a modelos de microturbinas a gás, o uso de um banco de baterias em conjunto com uma célula combustível e o impacto das fontes de GD e microredes na estabilidade dos sistemas elétricos.

Em [Freitas, 2005], é apresentado uma análise comparativa entre máquinas assíncronas e síncronas para utilizá-las em sistemas de geração distribuída. São determinados os impactos destes dois tipos de geradores quando conectados a redes de distribuição. São analisados o perfil da tensão em regime permanente, as perdas elétricas, a estabilidade de tensão, a estabilidade transitória e o afundamento da tensão na ocorrência de um curto-circuito. Os resultados mostram, através das simulações realizadas, que fontes com máquina assíncrona não conseguem manter a corrente de curto-circuito sustentada durante a ocorrência do curto, enquanto que as fontes com máquina síncrona mantém as correntes de curto-circuito sustentadas esta análise é importante sob o ponto de vista do dimensionamento do sistema de proteção.

Em [Hannett, 1993], é apresentado um modelo complexo, baseado no proposto por [Rowen, 1983], de uma turbina a combustão com dois diferentes controles de velocidade, um representado por um controlador PI e outro representado por um compensador de avanço-atraso. A análise da operação é realizada através da comparação entre os dois modelos de controle propostos através da simulação de um degrau de carga onde são comparadas as respostas de potência de saída, velocidade, demanda de combustível entre outros parâmetros. Em outro trabalho [Hannet, 1995] faz algo parecido para uma turbina a gás de dois eixos. Uma modificação no modelo é feita para considerar o laço de controle de velocidade da turbina livre.

Em [Jagaduri, 2007], é desenvolvido um sistema composto por um grupo de células combustíveis do tipo *PEMFC* e um grupo de microturbinas a gás ligados a uma rede de distribuição. A célula combustível é ligada em paralelo com uma bateria para fornecer uma resposta transitória mais rápida e ambas são ligadas à rede através de um inversor, com controle de tensão e frequência, e um transformador. Para o grupo de microturbinas a gás assume-se que, possui um controle de tensão e frequência e é ligado a rede também através de um transformador. O sistema e as fontes são modelados através de matrizes, usando o *Matlab/Simulink*. O principal foco do artigo é aplicar um controle, utilizando lógica fuzzy, para melhorar a estabilidade do sistema. O controle desenvolvido é aplicado somente ao sistema de microturbinas a gás, assim, é analisada a dinâmica do sistema, através de um degrau de carga,

com e sem o controle fuzzy. Os resultados mostram uma significativa redução das oscilações, durante o distúrbio, utilizando o controle fuzzy.

Em [Jung, 2005], é desenvolvido um sistema composto por células combustíveis do tipo *PEMFC* e um banco de baterias posicionado em paralelo com as células para operações isoladas. O banco de baterias é utilizado para suportar a partida e mudanças de carga que virem a ocorrer, uma vez que as células combustíveis não tem uma resposta dinâmica muito rápida para distúrbios como mudança de carga. São utilizados dois conversores CC/CC, um do tipo elevador para a célula combustível, com a função de regular as flutuações de tensão causadas pela variação do combustível e carga, e um bidirecional CC/CC rebaixador/elevador para a bateria, com a função de realizar a interface com a célula combustível no mesmo nível de tensão desta, além de realizar o processo de carga e descarga, um filtro LC e um inversor CC/CA, para realizar a interface com a carga, já que a carga é trifásica e alternada.

No artigo [Peças Lopes, 2004], é analisado o comportamento dinâmico de uma microrede (com produção distribuída) ligada a uma rede de distribuição para duas diferentes situações: a formação de uma ilha programada através de uma interrupção programada no sistema (uma manobra de desligamento) e a formação de uma ilha espontânea através da simulação de um curto-circuito na rede. A estrutura da microrede utilizada é composta por células combustíveis, microturbinas a gás, sistemas de geração eólica, solar e ainda os dispositivos de armazenamento de energia conhecidos como *flywheels*. A microrede apresenta ainda uma central de controle que é responsável por realizar o despacho de potência para o sistema e avaliar a segurança dinâmica. Todas as cargas e fontes da microrede possuem controladores locais que estão ligados a esta central de controle, os quais são utilizados para realizar o controle da interruptibilidade do fornecimento de energia agindo em conjunto com a central de controle. Baseado-se neste artigo, junto com [Peças Lopes, 2002], onde são desenvolvidas duas estratégias de controle baseadas na utilização de inversores para os controladores locais e [Peças Lopes, 2005], onde é desenvolvido uma estratégia de reposição do serviço, após a simulação de um blecaute, chamada de *black-start*, surgiu a idéia de desenvolver uma microrede composta por células combustíveis e microturbinas a gás e analisar seu desempenho quando ligada a uma rede de distribuição.

Em [Slootweg, 2002], é investigado o impacto da geração distribuída na estabilidade transitória dos sistemas de potência e o nível de penetração da GD no sistema elétrico. Cinco diferentes tecnologias de GD são estudadas: um gerador assíncrono, um gerador síncrono, um gerador síncrono com controle de tensão e frequência, um conversor de eletrônica de potência e

um conversor com controle de tensão e frequência. Os resultados são avaliados através da simulação de um curto-circuito no conhecido sistema *New England*, composto pelas cinco fontes de GD, ligadas em diferentes barras do sistema, onde é verificado o nível de penetração de cada fonte através da máxima variação da velocidade do rotor e da duração da oscilação. Assim, verificou-se que o gerador assíncrono não tem muita influência na estabilidade transitória do sistema elétrico. O gerador síncrono, com e sem controle, injeta uma corrente para o curto e aumenta a duração da oscilação, sendo menor para a máquina com controle. Os conversores diminuem a sobrevelocidade dos geradores pois são desconectados do sistema durante a falta e, no caso do conversor controlado, a duração da oscilação é melhor que a do não controlado. Em geral, conclui-se que o impacto das fontes de GD no sistema elétrico depende, então, do nível de penetração e da tecnologia da fonte de geração distribuída.

Em [Sedghisigarchi, 2004], é feito uma análise dinâmica de um sistema de distribuição que contém células combustíveis do tipo *SOFC*. O modelo contempla ainda, um banco de baterias, utilizado para auxiliar na partida da célula e no controle transitório da carga. O banco de baterias é associado a um conversor CC/CC que faz a interface com a célula e ambos são ligados a um inversor CC/CA que faz a interface com a rede. O esquema de controle da célula combustível divide-se em duas partes: o controle da potência, que é ajustado pelo ângulo de disparo do inversor; e o controle da tensão, que é ajustado pela modulação do conversor. Os resultados são analisados num sistema representado por uma subestação, seguida de um transformador, uma linha e outro transformador que rebaixa a tensão para um grande barramento onde são ligadas várias fontes de GD e cargas. Assim, são realizados dois casos de estudo: um, considerando somente as fontes de microturbinas a gás conectadas no sistema, e outro, considerando as microturbinas e células combustíveis conectadas em diferentes barras do sistema. A combinação de células combustíveis e microturbinas a gás apresentou melhorias na estabilidade do sistema, no controle da flutuação da frequência e fornecimento de potência após o ilhamento, quando comparado com o sistema composto somente por fontes de microturbinas.

### 3.3. Modelos de Conversores de Potência Aplicados a Geração Distribuída

Na literatura encontram-se diversos modelos de conversores de potência para serem aplicados em fontes de GD, em sua maioria, todos apresentam inversores e conversores controlados com base na comparação de um parâmetro de saída com uma referência, porém, todos apresentam diferentes técnicas de controle de disparo de cada dispositivo. A seguir apresentam-se alguns modelos e técnicas de controle para conversores aplicados a fontes de GD.

O artigo [Akagi, 1984] apresenta uma nova proposta de um compensador instantâneo de reativos composto de dispositivos de chaveamento sem as componentes de armazenamento de energia. Este compensador pode eliminar não somente a componente fundamental da potência reativa transitória, como também outros estágios de correntes harmônicas. A teoria do compensador, baseia-se na transformação das correntes e tensões trifásicas nos eixos  $\alpha\beta 0$  e, a partir destes valores, são extraídas facilmente as equações de potência ativa e reativa. A vantagem desta teoria é que a soma das potências reativas é zero e, desta forma, elas não contribuem no fluxo de potência instantâneo. Assim, a estratégia de controle do compensador elimina a potência reativa instantânea do lado da fonte, devido a potência reativa instantânea do lado da carga. O compensador instantâneo de reativo consiste de seis transistores em paralelo com seis diodos, associado a um filtro LC, ligado entre o compensador e o sistema. Esta teoria tem sido muito utilizada na literatura por diversos autores, sendo muito aplicada em controle de inversores para células combustíveis, como é o caso de [Gil, 2003], entre outros.

Em [Georgakis, 2005], é apresentado o modelo, em ambiente de *Matlab/Simulink*, de uma célula combustível do tipo *PEMFC* e de um condicionador de potência utilizado para regular a entrada de combustível de acordo com a demanda de potência, e assim controlar a tensão e o despacho de potência, além de realizar a interface com a rede. O condicionador de potência é composto por um conversor CC/CC e um inversor CC/CA, sendo que este modelo do condicionador não utiliza dispositivos de armazenamento de energia. O controle do fluxo de combustível é feito pelo conversor CC/CC e, não por um limitador como feito nesta dissertação, que adota como referência a demanda de potência para despachar a quantidade certa de combustível ao sistema, levando-se em consideração os limites de utilização do combustível entre 80 e 90%. O desempenho do sistema é analisado através de uma variação da demanda e

através da simulação de um pequeno afundamento de tensão, onde verifica-se respostas rápidas aos distúrbios causados no sistema, utilizando o condicionador de potência apresentado.

Em [Peraza, 2005], analisa-se o comportamento de inversores conectados a sistemas de geração distribuída com três diferentes estratégias de controle: *o controle de tensão por fluxo vetorial*, que é realizado a partir das variáveis de fluxo (magnitude e fase), obtidas da integração no tempo das tensões  $V_{dq0}$  do sistema. As variáveis de fluxo dão origem a uma potência ativa e uma reativa que são comparadas com seus valores de referência. O erro é ligado a um controlador do tipo PI que gera os pontos de ajuste do fluxo vetorial; *o controle de corrente por histerese* que é um controle baseado na comparação entre a corrente medida e a corrente de referência, através do comparador de histerese, onde o erro é mantido dentro da zona ou banda de histerese. A saída do comparador determina a seqüência de disparo do inversor; e *o controle de corrente por PWM* que é um controle baseado na comparação das tensões de referência e correntes medidas com ondas triangulares idênticas e de frequência constante. As saídas deste comparador também determinam a seqüência de disparo do inversor. Estes modelos de controles para inversores, segundo o autor, foram modelados para permitir a interface de fontes de geração distribuída como células combustíveis e células fotovoltaicas com uma rede de tensão alternada. Os modelos são desenvolvidos no *Simulink* e a avaliação dos resultados é verificada através da simulação de uma curva de carga, com pontos de mínimos e máximos, quando os inversores são ligados a um sistema de potência.

[Sakhare, 2004], apresenta um sistema de controle para células combustíveis utilizando lógica fuzzy. O modelo utiliza um conversor CC/CC do tipo elevador para controlar as flutuações de tensão, onde a tensão de saída CC é comparada com uma referência e o erro é corrigido por um bloco fuzzy; e um inversor CC/CA que controla a corrente, também utilizando um bloco fuzzy para corrigir o erro gerado pela comparação entre a corrente de saída e a referência.

Em [Younis, 2006], é desenvolvido o modelo de um inversor trifásico com controle de modulação por pulso, baseado num vetor de espaço simétrico para ser aplicado em fontes de células combustíveis. O vetor de espaço é um tipo discreto de modulação em que o vetor de referência de tensão é sintetizado pela média do tempo de chaveamento de um número de vetores de estado apropriados. É composto por seis transistores do tipo *MOSFET* e apresenta oito modos de operação, através dos resultados, a tensão e corrente apresentam baixo conteúdo harmônico.

Esta dissertação foi desenvolvida com base no estudo das diversas bibliografias apresentadas neste capítulo e outras que, por hora, tiveram alguma relação com o tema. Assim, tomando com base alguns artigos foram desenvolvidos e implementados computacionalmente os modelos das fontes e dispositivos de eletrônica de potência. Na seqüência, são apresentados os modelos de fontes de geração distribuída desenvolvidos neste trabalho, implementados em ambiente de *Matlab/Simulink* e os modelos de inversores e conversores utilizados como interface entre as fontes e a rede de distribuição.

## 4. Modelagem do Sistema de Células Combustíveis e Microturbinas a Gás

Na geração distribuída existem basicamente dois tipos de microturbinas, sendo ambas pequenas turbinas a gás. No tipo *single-shaft*, um único eixo é partilhado pela turbina e o gerador, o qual deverá ser projetado para rodar a velocidades elevadas. No tipo *split-shaft* existe uma caixa redutora que altera a velocidade do eixo da microturbina. A máquina elétrica utilizada depende, então, do tipo de microturbina escolhida. Microturbinas *single-shaft* requerem normalmente geradores pequenos, sendo geralmente utilizados geradores de ímãs permanentes. Ao contrário, microturbinas *split-shaft* podem ser utilizadas com alternadores convencionais (geradores síncronos e assíncronos) [Zhu, 2002]. Neste trabalho será implementado o modelo da microturbina do tipo *GAST*, desenvolvido pela *General Electric*, que é um modelo simplificado do modelo [Rowen, 1983], o qual utiliza máquinas síncronas a ímãs permanentes e assíncronas convencionais para geração de energia. No caso das células combustíveis, como já citado no capítulo dois, existem pelo menos seis tipos diferentes de células que se diferenciam pelo tipo de eletrólito de cada uma. A célula combustível que será implementada neste trabalho é do tipo *SOFC*, que se caracteriza por possuir um eletrólito de cerâmica, trabalhar com altas temperaturas e apresentar bom desempenho na geração de energia e na cogeração.

Neste capítulo são apresentados o princípio de funcionamento das células combustíveis e microturbinas a gás, a descrição do modelo dinâmico de cada tipo de fonte e o respectivo modelo no *Simulink*. No caso das microturbinas a gás, são aplicados dois modelos de geradores: um com máquina assíncrona, e outro com uma máquina síncrona a ímãs permanentes. Para facilitar o entendimento, adotou-se neste trabalho chamar o modelo da microturbina a gás do tipo *GAST* com gerador assíncrono de *MTG-ASSIN* e o modelo da microturbina a gás do tipo *GAST* com

gerador síncrono a ímãs permanentes de *MTG-SINPER*. Além disso, também são apresentados, em ambiente de *Matlab/Simulink*, o modelo de um inversor CC/CA utilizado para permitir a interface entre a célula combustível e uma rede de distribuição e o modelo de um conversor CA/CC/CA utilizado como interface entre a *MTG-ASSIN* e a rede elétrica, como também, entre a *MTG-SINPER* e a rede elétrica.

## 4.1. Sistema de Células Combustíveis

As células combustíveis são dispositivos eletroquímicos altamente eficientes. Seu princípio de funcionamento é baseado na eletroquímica. A membrana eletrolítica, também conhecida como eletrólito, é um composto químico cujo material cerâmico é o óxido sólido. A membrana é condutora de prótons e separa o ânodo do cátodo. Em cada lado há um eletrodo. No lado do ânodo o hidrogênio flui para o eletrodo onde é dissociado em prótons e elétrons. Os prótons são conduzidos através da membrana para o cátodo e os elétrons são forçados a percorrer um circuito externo porque a membrana é isolada eletricamente [Harmut, 2000]. No cátodo as moléculas de oxigênio reagem com os elétrons, que chegam pelo circuito externo, para formar água. A Figura 4.1 ilustra o esquema de uma célula combustível do tipo *SOFC*.

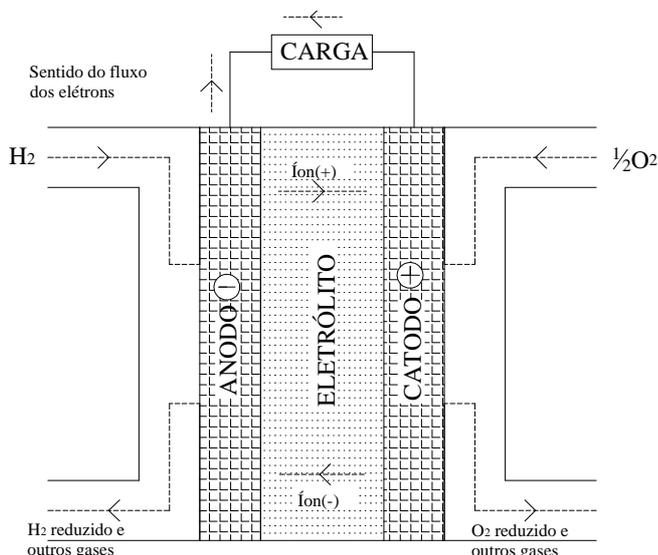


Figura 4.1 – Esquema da Célula Combustível *SOFC*

As células combustíveis são constituídas por três partes principais, conforme descritas em [Zhu, 2002]:

- o *processador de combustível*, que converte os gases em hidrogênio e outros gases;
- a *seção de potência*, que é a parte onde acontece a produção de eletricidade, a partir das reações químicas entre o hidrogênio, o ar e o eletrólito;
- o *condicionador de potência*, que converte a potência CC em potência de saída CA, incluindo o controle da tensão e frequência.

A tensão de uma célula combustível é obtida da diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, e calculada com base no fluxo de combustível que gera as pressões parciais do hidrogênio, oxigênio e água, utilizando-se a equação de *Nernst* [Marconato, 2003], a qual é apresentada na expressão (4.6).

#### 4.1.1. Descrição do Modelo *SOFC*

O modelo de célula combustível utilizado neste trabalho é o modelo *SOFC*. Este modelo foi escolhido por ser uma tecnologia recentemente muito estudada, por apresentar a vantagem de trabalhar com temperaturas elevadas, da ordem de 1000 °C, e permitir associação com turbinas a vapor elevando o rendimento do sistema. O combustível utilizado é o gás natural e, através de um processador de combustível, transforma o gás em hidrogênio e outros gases. A composição do gás natural canalizado é apresentada na Tabela 4.1 [He, 1997].

<i>Componente</i>	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	$C_5H_{12}$	$C_6H_{12}$	$N_2$	$O_2$	$CO_2$
% (mol/mol)	81,29	2,87	0,38	0,15	0,04	0,05	14,32	0,01	0,89

Tabela 4.1 – Composição típica do gás natural canalizado

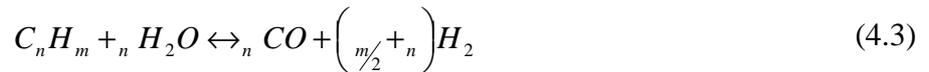
No caso particular do metano ( $CH_4$ ), por ser o combustível em maior quantidade presente no gás natural, o processo de obtenção do hidrogênio, conhecido como reforma ou processamento do combustível, ocorre de acordo com a seguinte relação [EG&G, 2000]:



A partir da reação anterior e, sabido que, neste modelo, o ânodo vai ser alimentado apenas com hidrogênio e o cátodo com oxigênio, a única reação que vai ocorrer na célula combustível é a seguinte:



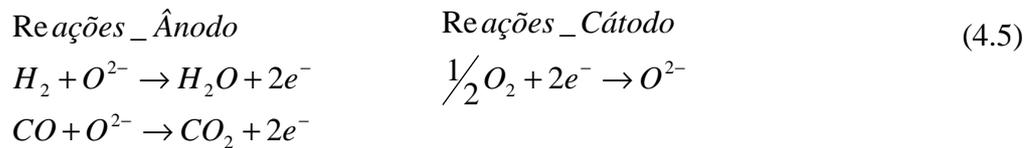
Isto justifica-se pelo fato de que, no processador de combustível, os hidrocarbonetos são convertidos de acordo com a seguinte fórmula [EG&G, 2000]:



O resultado da reação em 4.3, indica que teria uma certa concentração de gás carbônico no ânodo. No entanto, como as células combustíveis são um meio rico em vapor de água [Gil, 2002], ocorre a seguinte transformação, possível para temperaturas elevadas, normalmente presente no tipo de célula escolhida



Assim, o gás carbônico é processado, deixando de existir, sendo o  $CO_2$  o único subproduto. Por fim, considerando que o  $O^{2-}$  é o íon condutor da *SOFC*, as reações químicas que ocorrerão no ânodo e no cátodo da célula são as seguintes [EG&G, 2000]:



As reações eletroquímicas que ocorrem na célula combustível conduzem a uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, dando origem a uma tensão, a qual pode ser calculada através da equação (4.6), conhecida como equação de *Nernst*, acrescentando-se a lei de Ohm, dada por

$$V_{FC} = N_0 \left[ E_0 + \frac{RT}{2.F} \left( \ln \frac{p_{H_2} \cdot (p_{O_2})^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \right] - r.I_{FC} \quad (4.6)$$

Onde,

$E_0$  é a tensão ideal, associada à energia livre

$p_{H_2O}$ ,  $p_{H_2}$  e  $p_{O_2}$  são as pressões parciais dos gases envolvidos na reação

$N_0$  é o número de células

$r$  é a resistência elétrica da célula combustível  
 $R$  é a constante universal dos gases  
 $T$  é temperatura da célula combustível  
 $F$  é a constante de faraday

Na equação (4.6) a tensão gerada pela célula combustível é subtraída da tensão originada pela lei de Ohm, que representa as perdas ôhmicas. Esta tensão, produzida por uma célula, é relativamente pequena, na ordem de 1V. Por este motivo, é necessária a associação em série de várias células para que seja produzido níveis de tensão adequados para adaptá-las as redes de distribuição.

Para a modelagem da *SOFC*, assume-se que: os gases são ideais; a célula é alimentada somente por hidrogênio e ar e a dinâmica do processador de combustível (reformador) é representada por uma função de primeira ordem; os canais de transporte dos gases, ao longo dos eletrodos, tem volume fixo; a exaustão de cada canal é via um único orifício; a temperatura é estável o tempo todo; e somente são consideradas as perdas ôhmicas [Padullés, 1999].

As pressões parciais dos gases envolvidos relacionam-se com as suas concentrações do seguinte modo (lei dos gases ideais):

$$p.V = n_i . R.T \quad (4.7)$$

Onde,

$n_i$  é o número de moles da molécula  $i$   
 $V$  é o volume da célula combustível

Pode-se isolar a pressão em (4.7) e reescrever a equação considerando uma variação no tempo.

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{R.T}{V} \cdot \frac{dn_i}{dt} \quad (4.8)$$

Onde,

$\frac{dn_i}{dt}$  representa o fluxo molar de cada substância

No caso do hidrogênio, existem três contribuições relevantes do fluxo molar: o fluxo de entrada, o fluxo que assume parte da reação e o fluxo de saída. Assim pode-se escrever (4.8) como:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{R.T}{V} \cdot (q_i^{in} - q_i^{out} - q_i^r) \quad (4.9)$$

Para o  $H_2$ , o valor de  $q_i^r$  é:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F} = 2 \cdot k_r \cdot I \quad (4.10)$$

E para o  $O_2$  e  $H_2O$ ,  $q_i^r$  pode ser calculado recorrendo-se a equação (4.2):

$$\begin{aligned} q_{O_2}^r &= \frac{1}{2} \cdot q_{H_2}^r = k_r \cdot I \\ q_{H_2O}^r &= q_{H_2}^r = 2 \cdot k_r \cdot I \end{aligned} \quad (4.11)$$

Retornando ao cálculo da pressão do hidrogênio, a equação (4.9) pode ser reescrita como:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{R.T}{V} \cdot (q^{in} - q^{out} - 2 \cdot k_r \cdot I) \quad (4.12)$$

Para o oxigênio e água, de acordo com (4.9), a equação da pressão de cada substância pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{O_2}}{dt} &= \frac{R.T}{V} \cdot (q^{in} - q^{out} - k_r \cdot I) \\ \frac{dp_{H_2O}}{dt} &= \frac{R.T}{V} \cdot (q^{in} - q^{out} - 2 \cdot k_r \cdot I) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Substituindo o fluxo de saída de cada substância das equações (4.12 e 4.13) por uma equação de primeira ordem, representada por uma constante molar de cada válvula ( $k_{H_2}$ ,  $k_{H_2O}$  e  $k_{O_2}$ ) e uma constante de tempo ( $T_{H_2}$ ,  $T_{H_2O}$  e  $T_{O_2}$ ) e aplicando a transformada de *La place*, obtêm-se as pressões parciais de cada componente

$$\begin{aligned}
 p_{H_2} &= \frac{1/k_{H_2}}{1+T_{H_2}S} (q^{in} - 2.k_r.I) \\
 p_{O_2} &= \frac{1/k_{O_2}}{1+T_{O_2}S} (q^{in} - k_r.I) \\
 p_{H_2O} &= \frac{1/k_{H_2O}}{1+T_{H_2O}S} (q^{in} - 2.k_r.I)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Onde,

$$T_i = \frac{V}{k_i.R.T} \quad \text{e} \quad k_i = \frac{q_i}{p_i}$$

O fluxo de combustível que reage e entra na célula combustível apresenta um limite dado por um valor típico entre 80 e 90% do combustível. Este limite é definido devido as situações de subtensão e sobretensão [Padullés, 1999]. Então, este limite é representado no modelo da célula combustível por um bloco que limita a utilização do combustível e representado pela inequação (4.15), como

$$\frac{0,8.q_{H_2}^{in}}{2.k_r} \leq I \leq \frac{0,9.q_{H_2}^{in}}{2.k_r} \tag{4.15}$$

No modelo, foi considerado que a utilização ótima do combustível ( $U_{opt}$ ) é 85 %, conforme apresentado na Tabela 4.2. Isto permite o controle do fluxo de hidrogênio, através da medição da corrente fornecida na entrada da célula. Então o fluxo de entrada do hidrogênio é dado por:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2.k_r.I}{0,85} \tag{4.16}$$

Afim de evitar danos no eletrólito, a diferença de pressão entre o hidrogênio e o oxigênio que passam pelo ânodo e pelo cátodo deve ser inferior a 4 kPa sob condições normais de funcionamento e 8 kPa sob condições transitórias [He, 1998]. A proporção do hidrogênio e oxigênio é de dois pra um. Em [Zhu, 2002] foi determinado que esta proporção ( $r_{H_2O}$ ) deve ser

igual a 1.145 de modo a manter a pressão da célula a combustível menor que 4 kPa. O fluxo de oxigênio é regulado então por:

$$q_{O_2}^{in} = r_{H_2O} \cdot q_{H_2}^{in} \quad (4.17)$$

Como a resposta temporal do processador de combustível é bastante lenta, devido as reações químicas, esta é modelada através de uma função de primeira ordem, com constante de tempo ( $T_f$ ) de 5 segundos. A resposta temporal da parte elétrica é bem mais rápida, pois está relacionada com a velocidade que a reação química consegue restaurar a carga e também é representada no modelo por uma função de primeira ordem, porém, com uma constante de tempo ( $T_e$ ) menor, de 0.8 segundos. As respostas temporais dos fluxos de reagentes também são modeladas da mesma forma, através de funções de primeira ordem que representam o fluxo de saída com constantes de tempo dadas por ( $T_{H_2}$ ,  $T_{H_2O}$  e  $T_{O_2}$ ), como descrito em (4.14). A Figura 4.2 apresenta o modelo da célula combustível do tipo *SOFC* obtido a partir das equações anteriores e representado através de diagramas de bloco no *Simulink*. Os dados de cada parâmetro do modelo são fornecidos na Tabela 4.2.

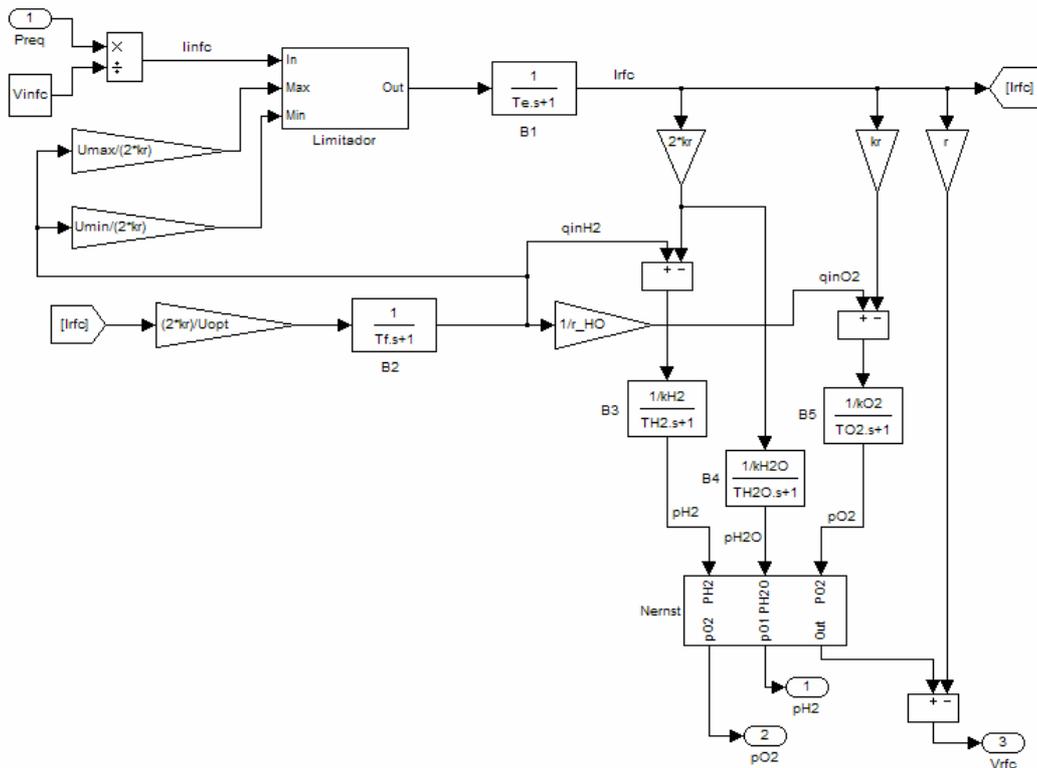


Figura 4.2 – Modelo da Célula Combustível do tipo *SOFC* [Zhu, 2002]

Neste modelo, o bloco Limitador, o qual representa a limitação do uso do combustível, representado no modelo pela equação (4.15), e o bloco *Nernst*, que representa a equação de *Nernst* (4.6) para o cálculo da tensão a partir dos valores de pressões parciais, são ilustrados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.

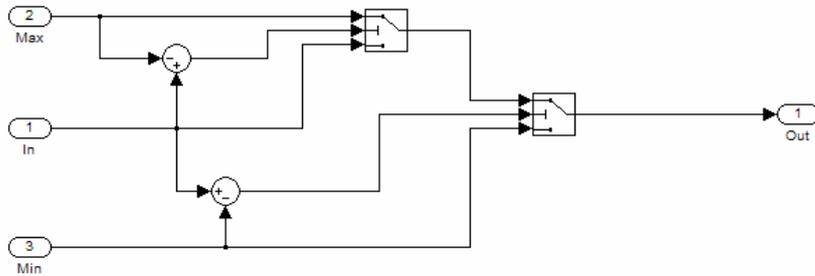


Figura 4.3 – Diagrama de Blocos do Limitador de Combustível

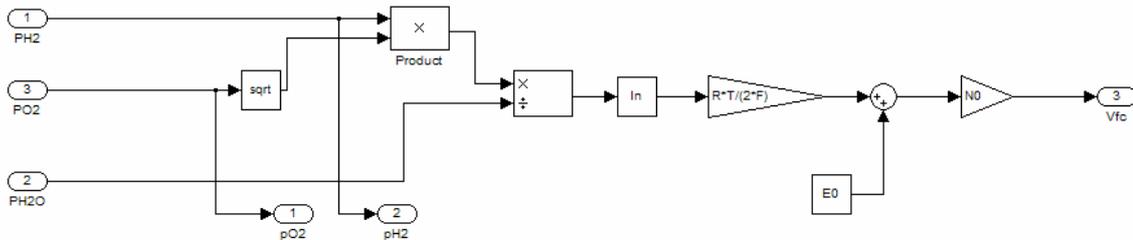


Figura 4.4 – Diagrama de Blocos da Equação de *Nernst*

<i>Parâmetro</i>	<i>Representação</i>	<i>Valor</i>
<i>Preq</i>	<i>Potência de referência real</i>	100 kVA
<i>Vinfç</i>	<i>Tensão de referência</i>	333,3 V
<i>T</i>	<i>Temperatura absoluta</i>	1273 K
<i>F</i>	<i>Constante de Faraday</i>	96487 C/mol
<i>R</i>	<i>Constante universal dos gases</i>	8314 J/(kmol k)
<i>E0</i>	<i>Potencial padrão ideal</i>	1.18 V
<i>N0</i>	<i>Número de células em série</i>	384
<i>Kr</i>	<i>Constante <math>kr=N0/4F</math></i>	$0.996 \times 10^{-6}$ kmol/(s A)
<i>Umax</i>	<i>Utilização máxima de combustível</i>	0.9
<i>Umin</i>	<i>Utilização mínima de combustível</i>	0.8
<i>Uopt</i>	<i>Utilização ótima de combustível</i>	0.85
<i>kH<sub>2</sub></i>	<i>Constante da válvula molar para o hidrogênio</i>	$8,43 \times 10^{-4}$ kmol/(s atm)
<i>kH<sub>2</sub>O</i>	<i>Constante da válvula molar para a água</i>	$2,81 \times 10^{-4}$ kmol/(s atm)
<i>kO<sub>2</sub></i>	<i>Constante da válvula molar para o oxigênio</i>	$2,52 \times 10^{-3}$ kmol/(s atm)
<i>TH<sub>2</sub></i>	<i>Tempo de resposta do fluxo de hidrogênio</i>	26,1 s
<i>TH<sub>2</sub>O</i>	<i>Tempo de resposta do fluxo de água</i>	78,3 s
<i>TO<sub>2</sub></i>	<i>Tempo de resposta do fluxo de oxigênio</i>	2,91 s
<i>r</i>	<i>Resistência ôhmica (Perda)</i>	0,126 Ω
<i>Te</i>	<i>Tempo de resposta elétrico</i>	0,8 s
<i>Tf</i>	<i>Tempo de resposta do processador de combustível</i>	5 s
<i>rH<sub>2</sub>O</i>	<i>Relação entre o hidrogênio e o oxigênio</i>	1,145
<i>PF</i>	<i>Fator de potência</i>	1,0

Tabela 4.2 – Parâmetros do Modelo do Sistema SOFC [Zhu, 2002]

### 4.1.2. Condições Iniciais do Modelo SOFC

Todas as funções de transferência do modelo são do tipo que permitem a especificação dos valores iniciais de saída de cada bloco. Estes blocos foram extraídos da caixa de ferramentas *Extras* do *Simulink*. Por esta razão, o modelo inicia a simulação em regime normal de operação, sendo que os valores iniciais de saída de cada bloco são calculados conforme equações (4.18) a (4.21).

Primeiramente, são declaradas no modelo o valor da potência inicial e o valor da tensão. Assim, o bloco B1 da Figura 4.2, que representa a resposta temporal da parte elétrica que está relacionada com a velocidade da reação química, possui como condição inicial a relação entre a potência de entrada e a tensão de entrada, ou seja, a corrente inicial pré-determinada. O bloco B2, que representa a dinâmica do processador de combustível (reformador), possui como condição inicial a expressão (4.18), onde é utilizado o valor ótimo do percentual de utilização do combustível 85% [Gil, 2002], levando em consideração a corrente inicial pré-determinada.

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2 \cdot k_r \cdot I_{init}}{U_{opt}} \quad (4.18)$$

O bloco B3, que representa a transformação do fluxo de hidrogênio em pressão parcial, apresenta como condição inicial a seguinte equação

$$p_{H_2}^{in} = \frac{(q_{H_2}^{in} - I_{init} \cdot 2 \cdot k_r)}{k_{H_2}} \quad (4.19)$$

O bloco B4, que representa a transformação do fluxo de água em pressão parcial, apresenta como condição inicial a seguinte expressão

$$p_{H_2O}^{in} = \frac{I_{init} \cdot 2 \cdot k_r}{k_{H_2O}} \quad (4.20)$$

O bloco B5, que representa a transformação do fluxo de oxigênio em pressão parcial, apresenta como condição inicial a seguinte equação

$$p_{O_2}^{in} = \frac{I_{init} \cdot 2 \cdot k_r \cdot \left( \frac{1}{r_{H_2O}} \right)}{U_{opt}} - \frac{I_{init} \cdot k_r}{k_{O_2}} \quad (4.21)$$

## 4.2. Sistema de Microturbinas a Gás

As microturbinas a gás vem sendo cada vez mais estudadas como possíveis fontes geradoras de energia. O princípio de funcionamento da turbina a gás é bastante simples, e está baseado no *ciclo de Brayton* [Rendón, 2005]. O ar atmosférico entra no compressor, onde sua pressão e temperatura são elevadas através da compressão. Em seguida o ar comprimido é entregue a câmara de combustão onde o combustível é injetado e misturado com o ar, o gás resultante da mistura é queimado a pressão constante, aumentando a temperatura dos gases. Os gases aquecidos e em alta pressão são então expandidos para as pás da microturbina, fazendo com que esta gire em alta velocidade. A microturbina é montada no mesmo eixo do compressor. Assim, quando o ciclo se completa, a microturbina é responsável por fornecer a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico.

Basicamente, a microturbina a gás é composta por quatro blocos [Zhu, 2002]:

- o *compressor*, que é responsável pela elevação da pressão do ar desde a admissão até a câmara de combustão, utilizando parte da potência entregue pela turbina;
- a *câmara de combustão*, que é o local onde ocorre a reação química de oxidação exotérmica, em que os reagentes são o combustível e o ar proveniente do compressor, formando uma mistura de gases que é expandida para a microturbina;
- a *microturbina*, que fornece potência para acionar o compressor e o gerador elétrico que está acoplado ao conjunto compressor-turbina, através de uma caixa redutora de velocidade. Ela extrai a energia dos gases quentes que deixam a câmara de combustão e os expande para uma pressão e temperatura mais baixa;
- o *gerador*, que é o responsável por converter a energia mecânica da microturbina em energia elétrica.

Na Figura 4.5 é apresentado o esquemático da microturbina a gás com suas partes principais. Neste esquemático pode ser incluído ainda, um trocador de calor que tem a finalidade

de aproveitar a energia térmica dos gases que saem da microturbina e realimentá-los na câmara de combustão ou de reduzir a temperatura dos mesmos antes de serem emitidos ao meio ambiente [Zhu, 2002].

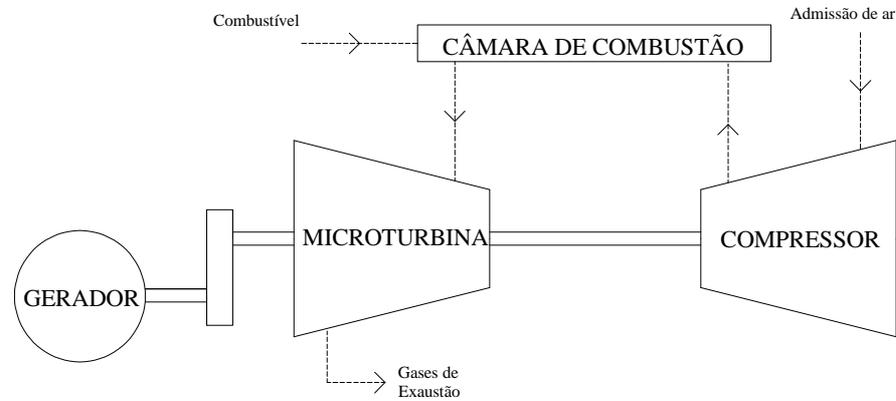


Figura 4.5 – Esquemático da Microturbina a Gás

#### 4.2.1. Descrição do Modelo da Microturbina GAST

As microturbinas a gás são unidades designadas para aplicações comerciais e residenciais, operando de forma isolada ou em microrredes operando com diversas fontes de GD. Possuem velocidade variável e necessitam de conversores de potência para realizar a interface com sistemas de distribuição.

A modelagem da microturbina a gás torna-se complexa se todos os elementos que compõem a microturbina forem modelados detalhadamente conforme modelo proposto por [Rowen, 1983]. Entretanto, para estudos na área de sistemas de potência, costuma-se utilizar modelos simplificados. Basicamente, o modelo inclui o controle de velocidade e carga, o sistema de controle de combustível e ar e a microturbina a gás. O sistema de controle de temperatura e de aceleração são desconsiderados no modelo deste trabalho.

A microturbina a gás, modelada nesta dissertação, é do tipo *split-shaft*, e utiliza o modelo GAST desenvolvido pela *General Electric (GE)*, em *Simulink*, para representar o modelo real de uma microturbina operando em conjunto com um gerador. Neste trabalho foram realizadas duas modelagens com microturbinas a gás, uma utilizando um gerador assíncrono acoplado a microturbina do tipo GAST (*MTG-ASSIN*) e outro utilizando um gerador síncrono a ímãs permanentes acoplado ao mesmo modelo da microturbina GAST (*MTG-SINPER*). Diferente do modelo desenvolvido por [Zhu, 2002 e Nagpal, 2001] o modelo deste trabalho utiliza geradores



<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>Pref</i>	<i>Potência de Referência</i>	<i>150 ou 300 kVA</i>
<i>Kp</i>	<i>Ganho Proporcional do PI</i>	<i>1,0</i>
<i>Ki</i>	<i>Ganho Integral do PI</i>	<i>1,08</i>
<i>Dtur</i>	<i>Amortecimento da Turbina</i>	<i>0,03</i>
<i>T1</i>	<i>Constante de Tempo do Sistema de Alimentação</i>	<i>10,0 s</i>
<i>T2</i>	<i>Constante de Tempo do Sistema de Alimentação</i>	<i>0,1 s</i>
<i>T3</i>	<i>Constante de Tempo do Limitador de Carga</i>	<i>3,0 s</i>
<i>Lmax</i>	<i>Limite de carga</i>	<i>1,2</i>
<i>Vmax</i>	<i>Valor Máximo da Posição da Válvula</i>	<i>1,2</i>
<i>Vmin</i>	<i>Valor Mínimo da Posição da Válvula</i>	<i>- 0,1</i>
<i>KT</i>	<i>Ganho da Malha de Controle de Temperatura</i>	<i>1,0</i>

Tabela 4.3 – Parâmetros do Modelo da Microturbina do tipo GAST [Zhu, 2002]

#### 4.2.2. Microturbina com Máquina Assíncrona *MTG-ASSIN*

A Figura 4.7 representa o modelo da microturbina ligada a uma máquina assíncrona obtida da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*. O bloco que representa a microturbina GAST é um subsistema dos blocos da Figura 4.6, o qual é aplicada a potência de referência e a velocidade de realimentação obtida da máquina assíncrona. O torque de saída da microturbina é então ligado na entrada da máquina assíncrona e sua saída é ligada a uma carga e um banco de capacitores responsável pela excitação e partida da máquina. A velocidade da máquina assíncrona é realimentada na microturbina e dela é extraída a frequência da máquina. A velocidade inicial de partida da máquina é ajustada para 1.02 p.u., ou seja, para um valor de velocidade superior a velocidade nominal e os valores de potência de referência estimados são todos negativos, tanto o das condições iniciais como da potência nominal. Estas configurações são necessárias para que uma máquina assíncrona parta e funcione como gerador de indução.

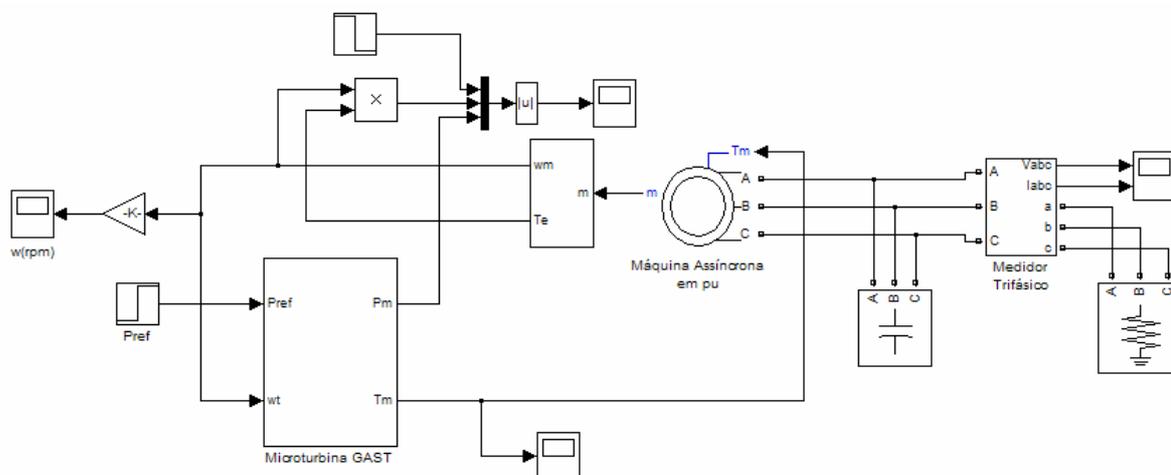


Figura 4.7 – Modelo *MTG-ASSIN*

A máquina assíncrona apresentada na Figura 4.7 tem capacidade de gerar 150 kVA e opera com 380 V e 60 Hz. Sua velocidade nominal é em torno de 1788 rpm e possui 4 pólos. O banco de capacitores fornece uma potência de 78,5 kvar. Este valor, da potência do banco de capacitores, embora possa parecer alto comparado com a potência da máquina, foi necessário para que o modelo operasse de forma aceitável. Em [Gil, 2003] também é desenvolvido um modelo de uma máquina assíncrona semelhante onde a potência do banco de capacitores é 50% do valor da potência nominal da máquina. O modelo da máquina assíncrona foi retirado da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem* e os parâmetros usados para a configuração da máquina assíncrona encontram-se na Tabela 4.4.

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>P<sub>n</sub></i>	<i>Potência Nominal</i>	150 kVA
<i>V<sub>n</sub></i>	<i>Tensão Nominal</i>	380 V
<i>f<sub>n</sub></i>	<i>Frequência Nominal</i>	60 Hz
<i>R<sub>s</sub></i>	<i>Resistência do Estator</i>	0,01117 p.u.
<i>L<sub>s</sub></i>	<i>Indutância do Estator</i>	0,04832 p.u.
<i>R<sub>r</sub>'</i>	<i>Resistência do Rotor</i>	0,006 p.u.
<i>L<sub>r</sub>'</i>	<i>Indutância do Rotor</i>	0,04832 p.u.
<i>L<sub>m</sub></i>	<i>Indutância Mútua</i>	2,424 p.u.
<i>H</i>	<i>Constante de Inércia</i>	0,3096 s
<i>F</i>	<i>Fator de Fricção</i>	0,01511 p.u.
<i>p</i>	<i>Par de Pólos</i>	2
<i>TR</i>	<i>Tipo de Rotor</i>	<i>Gaiola de Esquilo</i>

Tabela 4.4 – Parâmetros da Máquina Assíncrona

O ajuste dos parâmetros da máquina assíncrona foram realizados de acordo com [MathWorks, 2007], o qual apresenta detalhadamente a descrição do modelo da máquina bem como a forma de ajustar os parâmetros da mesma.

O bloco da máquina assíncrona pode funcionar tanto como motor ou como gerador. O modo de funcionamento é determinado pelo sinal do torque mecânico (positivo para funcionamento como motor e negativo para funcionamento como gerador). A parte elétrica da máquina é representada por um sistema de quarta ordem e a parte mecânica por um sistema de segunda ordem, estando todos os parâmetros referidos ao estator. Todas as grandezas estão representadas em p.u. (exceto se existir informação em contrário) num sistema de eixos *dq0* rodando a velocidade síncrona.

As grandezas eletromagnéticas são representadas usando-se a notação tradicional, estando os índices definidos da seguinte forma:

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

$r, s$ : grandezas do rotor e estator

$l, m$ : indutâncias próprias e de magnetização

Tendo em conta as considerações efetuadas, apresenta-se o esquema equivalente de cada um dos eixos definidos para o modelo da máquina assíncrona [MathWorks, 2007]:

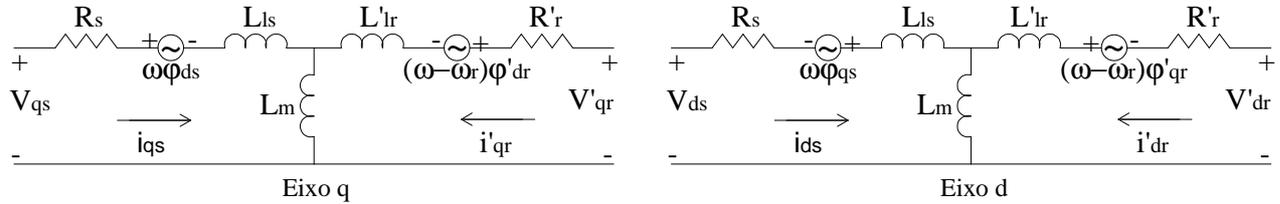


Figura 4.8 – Esquema Equivalente da Máquina Assíncrona [MathWorks, 2007]

Deste esquema, retiram-se as seguintes equações de tensão:

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \\
 V'_{qr} &= R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \\
 V'_{dr} &= R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Onde,

$\omega$  é a velocidade síncrona

$\omega_r$  é a velocidade do rotor

Nas expressões das equações de (4.22), os fluxos são dados por:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr} \\
 \varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr} \\
 \varphi'_{qr} &= L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\
 \varphi'_{dr} &= L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

Das expressões de (4.23), as indutâncias equivalentes são dadas por:

$$\begin{aligned}
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L'_r &= L'_{lr} + L_m
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

Essas expressões representam, resumidamente, a componente elétrica do modelo implementado no *Matlab/Simulink* [MathWorks, 2007]. As equações mecânicas, significativamente mais simples que as anteriores, são representadas por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_r &= \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_r - T_m) \\ \frac{d}{dt} \theta_r &= \omega_r \end{aligned} \quad (4.25)$$

Onde,

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

$F$  é o coeficiente de fricção viscoso da carga ou também coeficiente de atrito

$T_e$  é o torque elétrico

$T_m$  é o torque mecânico

$\theta_r$  é o ângulo do rotor

O torque elétrico da máquina é determinado através da equação (4.26)

$$T_e = 1.5 \cdot p (\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (4.26)$$

Onde,

$p$  é o número de pares de pólos da máquina

### 4.2.3. Microturbina com Máquina Síncrona a Imãs Permanentes *MTG-SINPER*

A Figura 4.9 representa o modelo da microturbina ligada a uma máquina síncrona a imãs permanentes simplificada, obtida da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*. O bloco que representa a microturbina *GAST* é um subsistema dos blocos da Figura 4.6, a ele é aplicada a potência de referência e a velocidade de realimentação obtida da máquina síncrona a imãs permanentes. A potência de saída da microturbina *GAST* é então ligada na entrada da máquina e esta alimenta uma carga trifásica. A velocidade da máquina é realimentada na microturbina e dela é extraída a frequência. Nesta situação, utilizando máquina síncrona a imãs permanentes, a velocidade inicial é ajustada para 1 p.u. e os valores de potência de referência são todos positivos.

O bloco da máquina síncrona a imãs permanentes é representado, no modelo, por um bloco de uma máquina síncrona tradicional, extraída do *SimPowerSystem*, com os parâmetros em p.u.. Então, para representar este bloco como uma máquina síncrona a imãs permanentes, foi

atribuído um valor constante (excitação constante) para a tensão de campo, igual a 1,489 p.u. e os parâmetros da máquina, em p.u., foram reduzidos a terça parte, comparados com os parâmetros de uma máquina síncrona tradicional de mesma potência, devido ao entreferro das máquinas síncronas a imãs permanentes ser maior que os das máquinas síncronas tradicionais. Na área de sistemas de energia, para análise de estudos dinâmicos e transitórios, como também limites de operação de fontes, este tipo de simplificação é bastante comum. Em [Gil, 2003] uma máquina síncrona a imãs permanentes é representada desta forma.

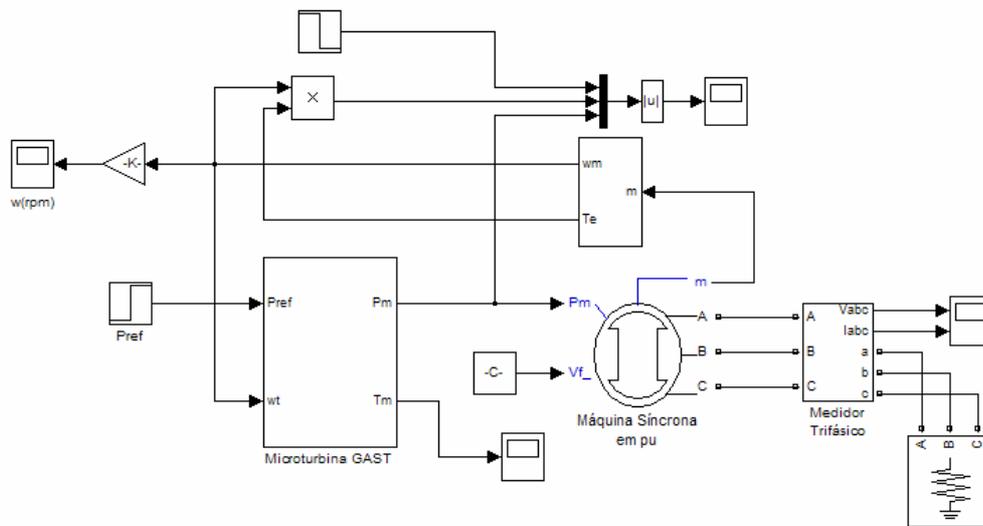


Figura 4.9 – Modelo *MTG-SINPER*

A máquina síncrona a imãs permanentes apresentada na Figura 4.9 tem capacidade de gerar 300 kW e opera com 380 V e 60 Hz. Sua velocidade nominal é 1800 rpm e possui 4 pólos. Os parâmetros usados para a configuração da máquina encontram-se na Tabela 4.5.

O bloco da máquina síncrona, do *SimPowerSystem*, pode funcionar tanto como motor ou como gerador. O modo de funcionamento é determinado pelo sinal do torque mecânico (positivo para funcionamento como gerador e negativo para funcionamento como motor, o contrário da máquina assíncrona). A parte elétrica da máquina é representada por um sistema de sexta ordem, que leva em conta o efeito dos enrolamentos do estator, do sistema de excitação e dos enrolamentos amortecedores no comportamento dinâmico. A parte mecânica é representada por um sistema de segunda ordem. Todas as grandezas estão representadas em p.u. (exceto se existir informação em contrário).

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
$P_n$	Potência Nominal	300 kVA
$V_n$	Tensão Nominal	380 V
$f_n$	Frequência Nominal	60 Hz
$X_d$	Reatância de Eixo Direto	1,073 p.u.
$X_d'$	Reatância de Eixo Direto Transitória	0,07 p.u.
$X_d''$	Reatância de Eixo Direto Sub-Transitória	0,0467 p.u.
$X_q$	Reatância de Eixo em Quadratura	0,93 p.u.
$X_q'$	Reatância de Eixo em Quadratura Transitória	0,126 p.u.
$X_q''$	Reatância de Eixo em Quadratura Sub-Transitória	0,03 p.u.
$T_{do}'$	Constante de Tempo Eixo Direto Transitória	0,08 s
$T_{do}''$	Constante de Tempo Eixo Direto Sub-Transitória	0,019 s
$T_{q}''$	Constante de Tempo Eixo em Quadratura Sub-Transitória	0,019 s
$R_s$	Resistência do Estator	0,05 p.u.
$H$	Constante de Inércia	0,3 s
$F$	Fator de Fricção	0,007 p.u.
$p$	Par de Pólos	2

Tabela 4.5 – Parâmetros da Máquina Síncrona a Imãs Permanentes

O circuito equivalente do modelo encontra-se representado num sistema de eixos  $dq0$  cuja referência se encontra fixa no rotor, rodando assim a mesma velocidade deste. Todos os parâmetros rotóricos estão referidos ao estator, sendo representados da maneira tradicional, 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

Tendo em conta as considerações efetuadas, apresenta-se o esquema equivalente de cada um dos eixos definidos para o modelo da máquina síncrona [MathWorks, 2007]:

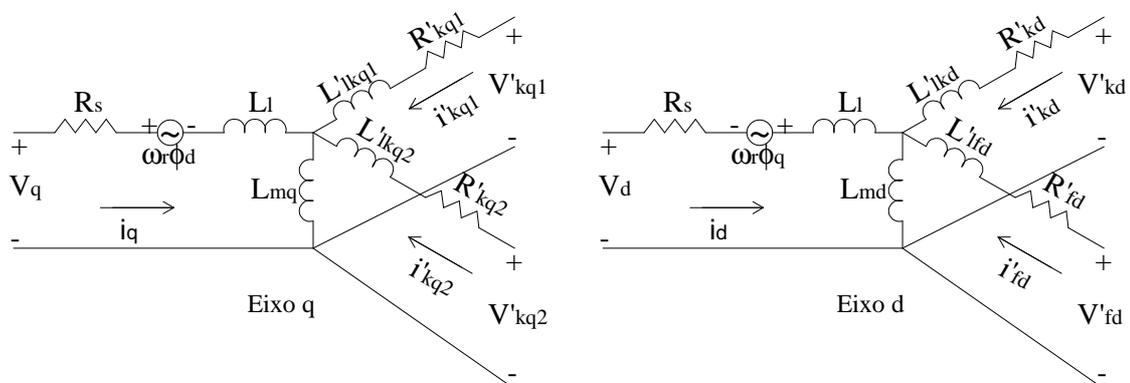


Figura 4.10 – Esquema Equivalente da Máquina Síncrona [MathWorks, 2007]

As equações das tensões que se podem extrair diretamente deste esquema da Figura 4.10 são:

$$\begin{aligned}
 V_d &= R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_r \varphi_q \\
 V_q &= R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega_r \varphi_d \\
 V'_{fd} &= R'_{fd} \cdot i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd} \\
 V'_{kd} &= R'_{kd} \cdot i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd} \\
 V'_{kq1} &= R'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1} \\
 V'_{kq2} &= R'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Nas expressões das equações de (4.27), os fluxos são dados por:

$$\begin{aligned}
 \varphi_d &= L_d \cdot i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \\
 \varphi_q &= L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i'_{kq} \\
 \varphi'_{fd} &= L'_{fd} \cdot i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \\
 \varphi'_{kd} &= L'_{kd} \cdot i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}) \\
 \varphi'_{kq1} &= L'_{kq1} \cdot i'_{kq1} + L_{mq} \cdot i_q \\
 \varphi'_{kq2} &= L'_{kq2} \cdot i'_{kq2} + L_{mq} \cdot i_q
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Essas expressões representam resumidamente a componente elétrica do modelo implementado no *Matlab/Simulink* [MathWorks, 2007]. As equações mecânicas, significativamente mais simples que as anteriores, são representadas por:

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \cdot \Delta\omega_r) \tag{4.29}$$

Onde,

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

$K_D$  é o coeficiente de atrito ou de amortecimento

$T_e$  é o torque elétrico

$T_m$  é o torque mecânico

$\omega_r$  é a velocidade do rotor

$\omega_0$  é a velocidade síncrona (normalmente 1 p.u.)

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

A Figura 4.10 e as equações (4.27 a 4.29), descrevem o modelo do bloco da máquina síncrona tradicional, extraída do *SimPowerSystem*. Obviamente, no modelo de uma máquina síncrona a imãs permanentes, não existem os enrolamentos amortecedores e portanto as equações de tensão  $V'_{kd}$ ,  $V'_{kq1}$  e  $V'_{kq2}$ , em (4.27), devem ser iguais a zero. Na modelagem da máquina síncrona a imãs permanentes, utilizando um bloco de uma máquina síncrona tradicional, este efeito foi eliminado através da redução dos parâmetros das reatâncias transitórias e sub-transitórias, como também, através da redução do tempo das constantes de tempo transitórias e sub-transitórias do modelo da máquina síncrona tradicional, conforme Tabela 4.5. Assim este efeito, que mesmo em máquina síncrona tradicional é pequeno, será minimizado ou deixará de existir, não contribuindo com as análises dinâmicas e transitórias a serem realizadas neste trabalho.

#### 4.2.4. Condições Iniciais do Modelo *GAST*, *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*

Todos os blocos das funções de transferência do modelo da microturbina *GAST* são do tipo que permite a especificação dos valores iniciais de saída de cada bloco. Estes blocos foram retirados da caixa de ferramentas *Extras* do *Simulink*. Por esta razão, o modelo inicia sua simulação em regime normal de operação, sendo que os valores iniciais de saída de cada bloco são determinados em função da potência inicial estimada na referência. Portanto, para o exemplo da análise dinâmica com microturbinas, é estimada uma potência inicial de 0.7 p.u.. Logo, todas as funções de transferência do modelo da microturbina *GAST* são ajustadas para este valor.

No caso dos blocos das máquinas síncrona a imãs permanentes (*MTG-SINPER*) e assíncrona (*MTG-ASSIN*), as condições iniciais são ajustadas dentro do bloco de parâmetros de cada máquina. É estimado o valor da corrente inicial de partida de cada máquina e suas defasagens. A corrente inicial é considerada igual a potência inicial da máquina no sistema por unidade (p.u.) e a defasagem entre as correntes de cada máquina é considerada  $120^\circ$ .

## 4.3. Modelagem dos Conversores

Alguns sistemas de geração distribuída, como é o caso das células combustíveis, produzem energia na forma contínua. Por este motivo, requerem um sistema de interface que permita a ligação destes tipos de fonte a rede de tensão alternada. Além disso, um sistema de controle de tensão é necessário para que não ocorram variações na tensão devido a uma variação na carga. Este sistema de interface é traduzido pela modelagem de um inversor que transforma a tensão contínua de saída da *SOFC* em tensão alternada trifásica, com nível de tensão adequado para conectá-la a rede elétrica.

Da mesma forma que nas células combustíveis, um sistema de interface entre os modelos de microturbinas, *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*, se faz necessário para evitar variações da tensão em função da variação de velocidade e oscilações de tensão causada pela variação do combustível de entrada ou variação da carga. Ao contrário do modelo da célula combustível os modelos *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER* geram energia na forma alternada, então é necessário, além de um inversor controlado por tensão, um retificador para transformar a tensão alternada dos modelos em tensão contínua e, através do inversor em alternada, novamente. Este sistema traduz-se pela modelagem de um conversor CA/CC/CA. Embora seja possível que as fontes de microturbinas operem sem o conversor, no conceito de microrede, definido por [NTUA, 2006], numa microrede não são utilizadas fontes de geração com máquina síncrona logo, todas as microfuentes devem utilizar um conversor ou inversor para que a regulação da tensão e frequência seja garantida. E também, são necessários, para permitir a comunicação entre os controles locais da microrede (inversores e conversores) com a central de controle.

Nesta seção, é apresentado o modelo do inversor utilizado para realizar a interface entre a célula combustível e a rede de distribuição e de um conversor utilizado para realizar a interface entre os dois modelos de microturbinas, *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*, e a rede de distribuição. Os modelos são desenvolvidos em ambiente de *Matlab/Simulink* usando o bloco da ponte universal extraído da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*.

### 4.3.1. Modelagem do Conversor para a *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*

A modelagem do conversor utiliza as ferramentas da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem* e realiza o controle da tensão de saída do sistema com base na comparação da

tensão na carga com uma tensão de referência. A Figura 4.11 apresenta o modelo do conversor no *Simulink*. O modelo contempla uma ponte retificadora a diodo com seis pulsos, um filtro LC que evita as flutuações de tensão, um inversor comutado a *IGBT* com 8 kHz de frequência de carregamento, outro filtro LC para eliminação de harmônicos, um regulador de tensão e um gerador de sinal PWM. O circuito é discretizado com um tempo de amostragem de  $2\mu\text{s}$ . O regulador de tensão foi construído com os blocos *Extras* do *SimPowerSystem* e bibliotecas de controle discreto, ele ajusta a frequência e tensão com base na comparação da tensão de saída com a referência, onde a diferença é corrigida por um controlador do tipo PI que envia o sinal corrigido ao gerador PWM.

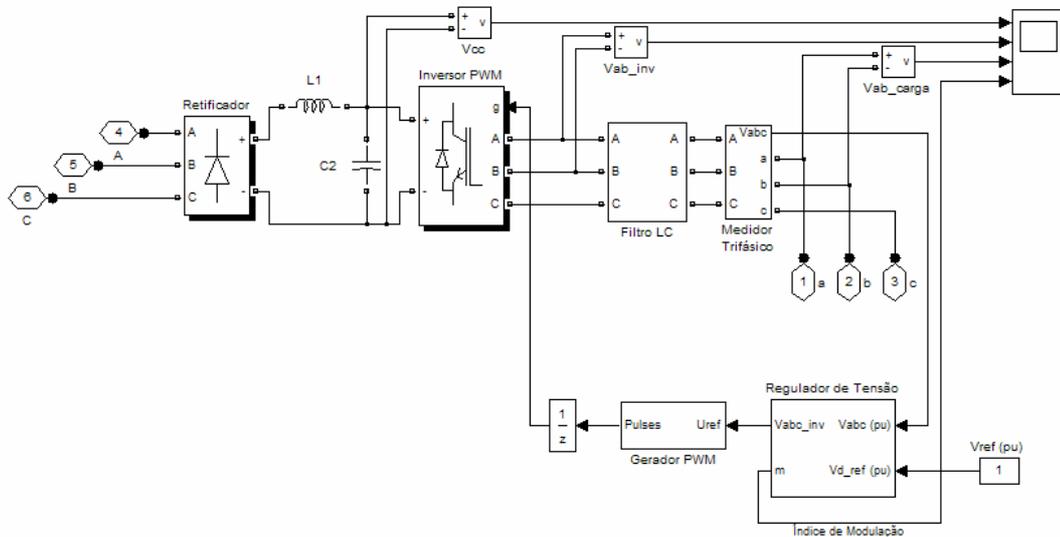


Figura 4.11 – Modelo do Conversor para a *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*

O bloco do Retificador, que é representado por uma ponte universal, da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*, consiste de seis chaves a diodo e transforma o sinal alternado do gerador de cada modelo em sinal contínuo. O bloco do inversor utiliza comutação forçada através do *IGBT/Diodo*. O bloco do retificador e o bloco do inversor da Figura 4.11 são configurados diretamente através da inserção dos valores dos parâmetros corretos do modelo. Para o modelo *MTG-ASSIN*, utilizado neste trabalho, a configuração dos parâmetros do retificador é apresentada na Tabela 4.6 e do inversor na Tabela 4.7. Os parâmetros do retificador do modelo *MTG-SINPER* são apresentados na Tabela 4.8 e os do inversor são os mesmos da Tabela 4.7.

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>Rs</i>	<i>Resistência Snubber</i>	$100 \Omega$
<i>Cs</i>	<i>Capacitância Snubber</i>	$0,5e^{-6} F$
<i>Ron</i>	<i>Resistência Interna da Ponte Universal</i>	$1e^{-3} \Omega$
<i>Lon</i>	<i>Indutância Interna da Ponte Universal</i>	0
<i>Vf</i>	<i>Tensão de Campo</i>	0,8 V
<i>DEP</i>	<i>Dispositivo de Eletrônica de Potência</i>	Diodos

 Tabela 4.6 – Parâmetros do Retificador do Modelo *MTG-ASSIN*

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>Rs</i>	<i>Resistência Snubber</i>	$5000 \Omega$
<i>Cs</i>	<i>Capacitância Snubber</i>	<i>inf</i>
<i>Ron</i>	<i>Resistência Interna do Inversor</i>	$1e^{-3} \Omega$
<i>Vf</i>	<i>Tensão de Campo</i>	0
<i>Vfd</i>	<i>Tensão de Campo dos Diodos</i>	0
<i>Tf</i>	<i>Fall Time</i>	$1e^{-6} s$
<i>Tt</i>	<i>Tail Time</i>	$2e^{-6} s$
<i>DEP</i>	<i>Dispositivo de Eletrônica de Potência</i>	IGBT/Diodo

 Tabela 4.7 – Parâmetros do Inversor PWM do Modelo *MTG-ASSIN*

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>Rs</i>	<i>Resistência Snubber</i>	$200 \Omega$
<i>Cs</i>	<i>Capacitância Snubber</i>	$0,1e^{-6} F$
<i>Ron</i>	<i>Resistência Interna da Ponte Universal</i>	$1e^{-3} \Omega$
<i>Lon</i>	<i>Indutância Interna da Ponte Universal</i>	0
<i>Vf</i>	<i>Tensão de Campo</i>	0,8 V
<i>DEP</i>	<i>Dispositivo de Eletrônica de Potência</i>	Diodos

 Tabela 4.8 – Parâmetros do Retificador do Modelo *MTG-SINPER*

De acordo com as Tabelas 4.6 e 4.8, o parâmetro *Rs* representa a *resistência snubber*, seu valor é ajustado em ohms ( $\Omega$ ), se necessário pode ser ajustado para infinito para eliminar os transitórios elétricos do modelo. O parâmetro *Cs* representa a *capacitância snubber*, seu valor é ajustado em faradays (F) e também pode ser ajustado para infinito para eliminar os transitórios elétricos do modelo. O dispositivo de eletrônica de potência seleciona o tipo de comutação a ser realizada pelo conversor e no caso do retificador, é a *diodo*. O parâmetro *Ron* é a resistência interna do retificador e é ajustada em ohms ( $\Omega$ ). O parâmetro *Lon* que representa a indutância interna do retificador, é dado em henry (H). Nas Tabelas 4.6 e 4.8, *Lon* foi ajustado para zero porque a simulação é discretizada [Mathworks, 2007] e a tensão *Vf*, que é a tensão de cada diodo, é especificada em volts (V). Alguns parâmetros ajustados para o retificador do modelo *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER* (*Rs* e *Cs*) são diferentes, devido a diferença dos transitórios apresentados por cada modelo.

O modelo do inversor PWM, que é representado por uma ponte universal da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*, consiste de seis chaves de potência, conectadas na configuração em ponte trifásica com comutação forçada a *IGBT/Diodo* [MathWorks, 2007]. Os parâmetros do bloco são apresentados na Tabela 4.7. Da mesma forma que o bloco do retificador, o parâmetro  $R_s$ , representa a *resistência snubber*, seu valor é ajustado em ohms ( $\Omega$ ). O parâmetro  $C_s$ , representa a *capacitância snubber*, seu valor é ajustado em faradays (F) e pode ser ajustado para infinito para eliminar os transitórios elétricos do modelo. O dispositivo de eletrônica de potência seleciona o tipo de comutação a ser realizada pelo inversor, no caso *IGBT/Diodo*. Para que o dispositivo de comutação forçada opere de forma satisfatória, em simulações discretizadas, apenas o valor da *resistência snubbers* deve ser ajustado e o valor da capacitância deve ser ajustado para infinito. O parâmetro  $R_{on}$  é a resistência interna do inversor e é ajustada em ohms ( $\Omega$ ). O parâmetro que avalia a tensão de campo do *IGBT* e dos diodos não foi considerado neste modelo. Os parâmetros  $T_f$  e  $T_t$  significam o *fall time* ( $T_f$ ) e o *tail time* ( $T_t$ ) do *IGBT*. O  $T_f$  representa o tempo requerido para que a amplitude da tensão caia a 10% do seu valor de pico e o  $T_t$  representa o tempo requerido para que a amplitude do valor da tensão de 10% caia a zero. Estes parâmetros são usados toda vez que o sinal de gatilho é zerado [Mathworks, 2007].

Para o bloco da ponte universal do *SimPowerSystem*, quando o sistema é discretizado, é necessário especificar os valores de  $R_s$  e  $C_s$  para as pontes a diodos ou transistores (no caso a ponte do retificador), respeitando as inequações abaixo:

$$\begin{aligned} R_s &> 2 \cdot \frac{T_s}{C_s} \\ C_s &< \frac{P_n}{1000 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot V_n^2} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Onde,

$P_n$  é a Potência nominal (VA)

$f$  é a frequência fundamental (Hz)

$V_n$  é a Tensão nominal (Vrms)

$T_s$  é o Tempo de amostragem (Sample Time) (s)

Para dispositivos de comutação forçada (*GTO*, *MOSFET*, *IGBT*) a ponte opera satisfatoriamente apenas com o valor de  $R_s$ , ajustando  $C_s$  para infinito (no caso dos inversores a *IGBT/Diodo*). Este ajuste foi feito tanto para o inversor da célula combustível como também para

o inversor dos modelos *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*. Através dos ajustes de  $R_s$  e  $C_s$ , a estabilidade numérica da simulação discreta é garantida [Mathworks, 2007].

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam o esquemático do retificador e do inversor, ambos representam o esquema interno da ponte universal apresentada na Figura 4.11. A Figura 4.12 apresenta o esquema do bloco do retificador e a Figura 4.13 apresenta o esquema do bloco do inversor PWM.

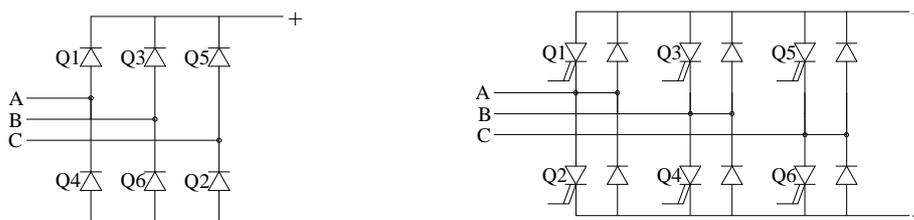


Figura 4.12 – Esquema do Bloco do Retificador    Figura 4.13 – Esquema do Bloco do Inversor

O primeiro filtro LC da Figura 4.11, posicionado entre o retificador e o inversor PWM, apresenta uma indutância de  $2e^{-4}$  H e uma capacitância de  $5e^{-3}$  F. O segundo filtro, representado pelo bloco *Filtro LC*, apresenta o esquema da Figura 4.14.

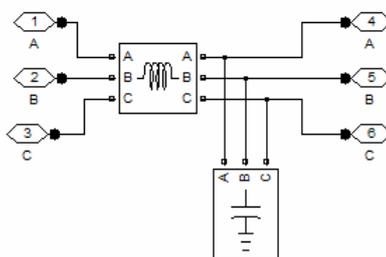


Figura 4.14 – Filtro LC do Inversor

Tanto para o modelo *MTG-SINPER* como para o modelo *MTG-ASSIN*, a indutância, da Figura 4.14, é ajustada para  $4e^{-3}$  H e a capacitância possui a potência de 3 kvar de potência.

O bloco *Medidor Trifásico*, da Figura 4.11, é utilizado para realizar a interface entre o inversor e a carga, como também, medir os valores de tensão e corrente que circulam por ele. A tensão trifásica medida neste bloco alimenta o bloco do regulador de tensão onde é comparada com uma tensão de referência e corrigida por um controlador PI, onde o sinal de saída é enviado ao bloco do gerador PWM.

O bloco do *Regulador de Tensão* é apresentado na Figura 4.15. Ele tem como entrada o sinal da tensão trifásica, em p.u., medido pelo bloco *Medidor Trifásico* da Figura 4.11 e os

valores de referência das tensões de eixo direto e quadratura, que são atribuídos como sendo 1 p.u. e 0 p.u. respectivamente. Então, o sinal da tensão trifásica de entrada é transformado no sistema de eixo  $Vdq0$  e comparado com a referência  $Vdq0$ . O erro, gerado pela diferença de tensão na comparação, é corrigido por um controlador do tipo PI que possui ganhos de acordo com a Tabela 4.9:

	MTG-ASSIN	MTG-SINPER
$K_i$	500	500
$K_p$	0,8	0,4

Tabela 4.9 – Ganhos do controlador PI

O sinal corrigido é então novamente transformado do eixo  $dq0$  para abc e enviado ao gerador PWM. O esquema da Figura 4.15 utiliza um bloco discreto do tipo PLL, extraído da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*, para fornecer um sinal senoidal, com 60 Hz de frequência e para realizar as transformações dos eixos  $dq0$  para abc e vice-versa. Assim, é assegurado o controle da frequência para 60 Hz e da tensão através da comparação com a referência. O bloco da Unidade de Atraso (*Unit Delay*) é utilizado para quebrar os chamados *algebraic loops*, ou seja, para evitar um erro do *Simulink* que acontece quando a saída de um sistema depende instantaneamente de uma entrada que recebe o valor da própria saída.

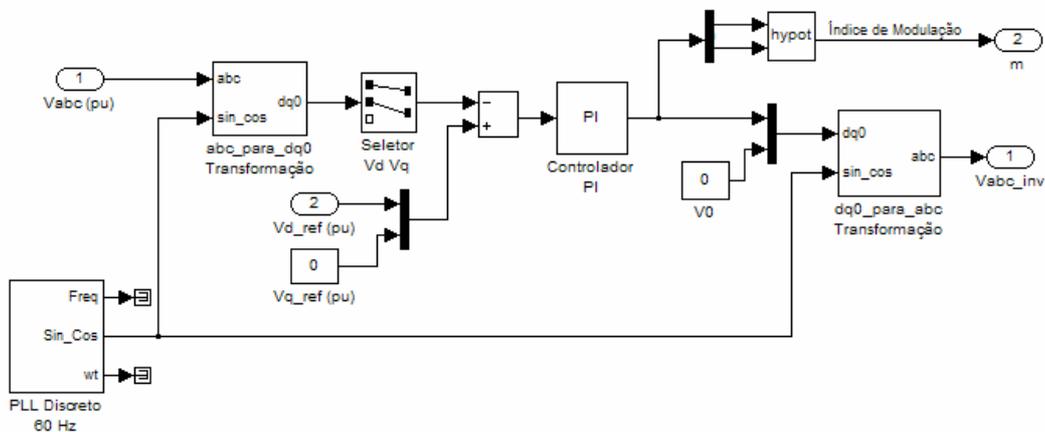


Figura 4.15 – Diagrama de Blocos do Regulador de Tensão

Para a validação dos testes do modelo do conversor, é ligado uma carga resistiva na saída do conversor de cada modelo (*MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*) e na entrada é colocado a fonte que representa cada modelo, *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*. Na Figura 4.16, é apresentado o modelo com máquina assíncrona (*MTG-ASSIN*) e, nas Figuras 4.17 a 4.20, são apresentadas as respostas

de tensão e corrente na carga, através de duas simulações: uma com carga nominal 150 kW, e outra, com 75 kW.

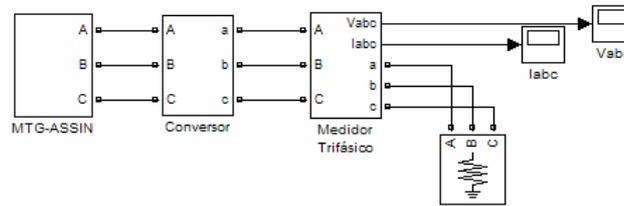


Figura 4.16 – Modelo do Conversor Conectado a *MTG-ASSIN* e a Carga

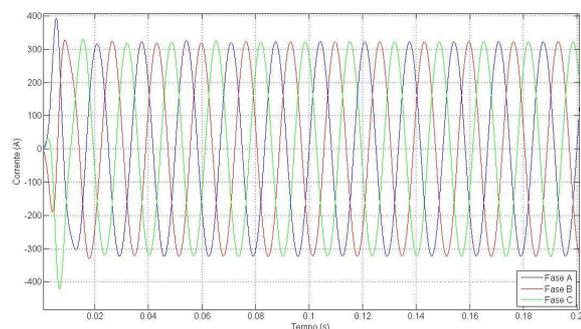
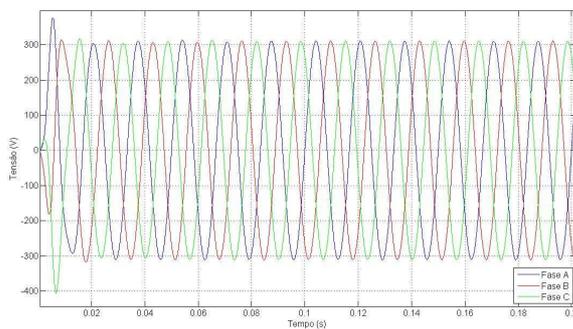


Figura 4.17 – Tensão de Saída - Carga 150 kW      Figura 4.18 – Corrente de Saída - Carga 150 kW

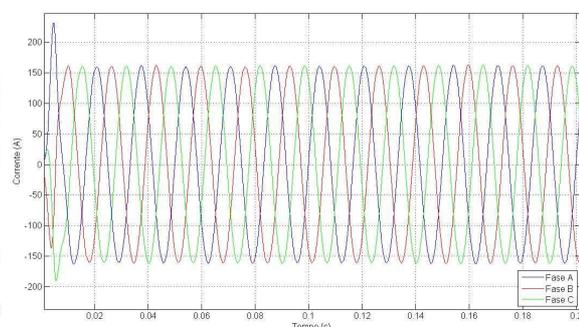
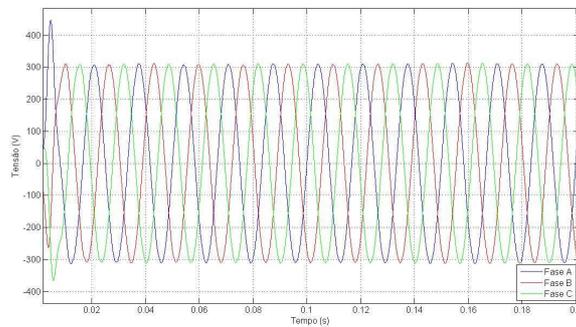


Figura 4.19 – Tensão de Saída - Carga 75 kW      Figura 4.20 – Corrente de Saída - Carga 75 kW

Na Figura 4.21, é apresentado o modelo com máquina síncrona a ímãs permanentes (*MTG-SINPER*) e nas Figuras 4.22 a 4.25, são apresentadas as respostas de tensão e corrente na carga através das duas simulações, com carga nominal 300 kW e, com 150 kW.

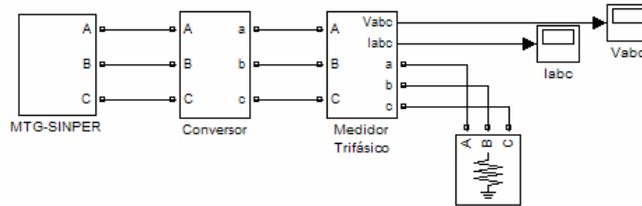


Figura 4.21 – Modelo do Conversor Conectado a *MTG-SINPER* e a Carga

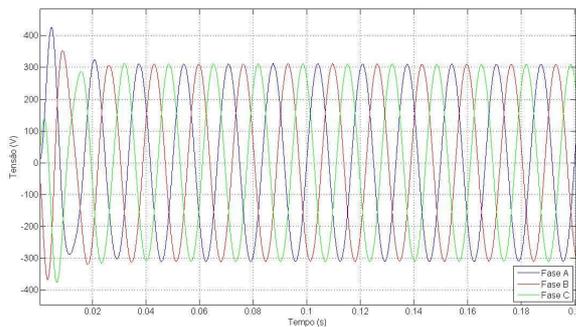


Figura 4.22 – Tensão de Saída - Carga 300 kW

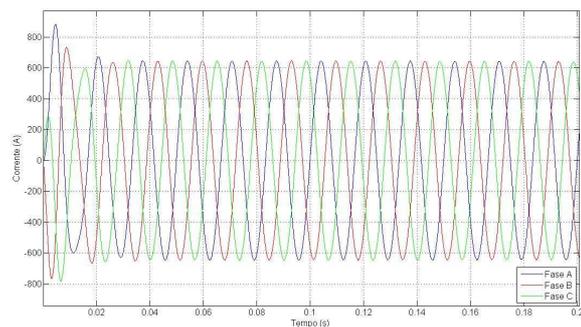


Figura 4.23 – Corrente de Saída - Carga 300 kW

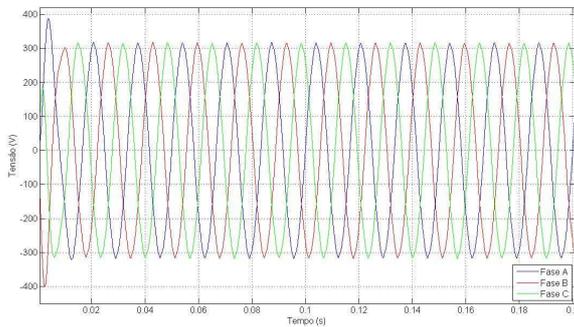


Figura 4.24 – Tensão de Saída - Carga 150 kW

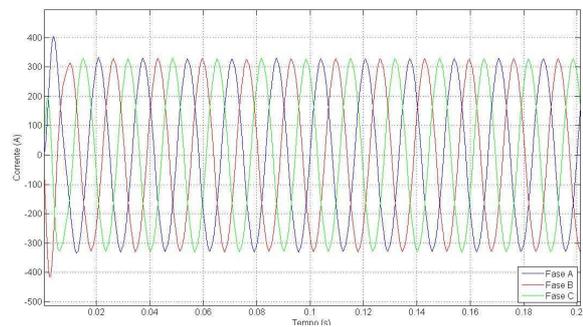


Figura 4.25 – Corrente de Saída - Carga 150 kW

As respostas temporais das tensões fase-neutro e correntes de linha, na carga ligada ao conversor, tanto as do modelo *MTG-ASSIN* como as do modelo *MTG-SINPER*, são apresentadas nas Figuras 4.17 a 4.25. Através das respostas, observa-se um pequeno distúrbio transitório na partida que estabiliza muito rapidamente. Verifica-se que, tanto para a carga nominal como para 50% do valor da carga, a resposta de tensão é a mesma e a corrente possui amplitude de acordo com a potência da carga. A tensão fornecida na saída do inversor é então de 380V (rms) fase-fase e 220 V (rms) entre fase e neutro, na frequência de 60 Hz. Através destas simulações considera-se o modelo do conversor adequado para a aplicação nas análises e simulações deste trabalho.

### 4.3.2. Modelagem do Inversor para a SOFC

O modelo do inversor é simples e foi projetado com um único objetivo, o de transformar o sinal de tensão contínua da SOFC num sinal de tensão alternada trifásica, de modo a permitir a interface com a rede. A modelagem do inversor utiliza a ponte universal da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*, onde o dispositivo eletrônico da ponte é um *IGBT*. Em princípio, a entrada do inversor é o valor de saída da tensão contínua da SOFC e este a transforma em um sinal de tensão trifásico alternado. O controle é realizado através de um PI que corrige o erro de saída do *IGBT*, originado da comparação do sinal de tensão de saída da ponte universal com a referência, como também é feito nos inversores das microturbinas. O ganho  $k_i$  do controlador PI do Inversor da célula combustível é ajustado para 250 e o  $k_p$  para 0,4. A Figura 4.26 apresenta o modelo do inversor no *Simulink*. Cabe observar, na Figura 4.26, que é utilizado uma fonte de tensão controlada na entrada do inversor. Esta fonte, que apenas mede o valor da tensão de entrada, é utilizada para permitir a interface entre a caixa de ferramentas do *Simulink* e a do *SimPowerSystems*, já que o modelo SOFC foi montado somente com os blocos do *Simulink* e do *Extras* do *Simulink*.

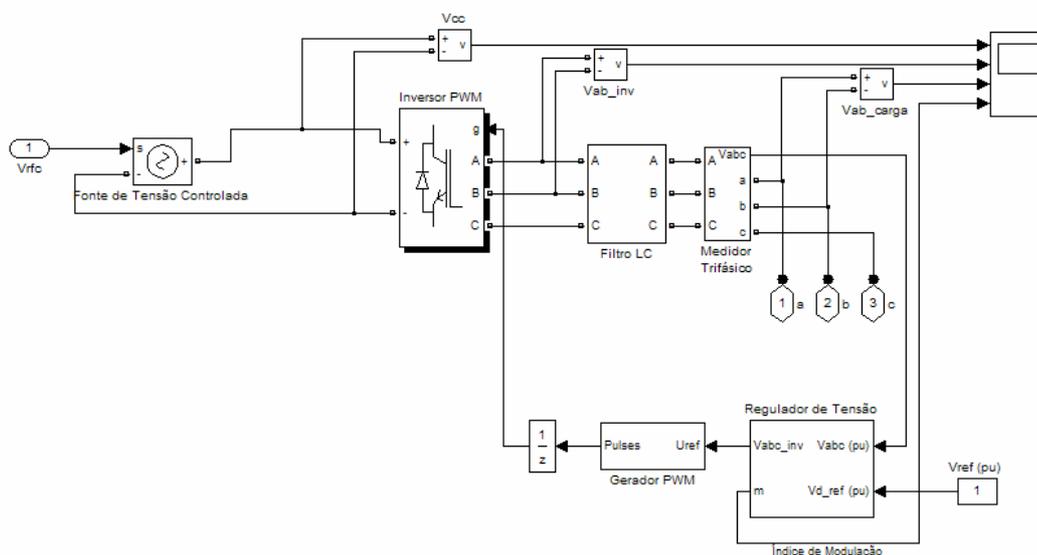


Figura 4.26 – Diagrama de Blocos do Inversor SOFC

O modelo da Figura 4.25 é o mesmo do inversor PWM utilizado pelos dois modelos de microturbinas (*MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*). Os parâmetros ajustados para o inversor SOFC,

também são os mesmos apresentados na Tabela 4.7 porém, o filtro LC, utilizado no modelo, apresenta uma indutância de  $1,8e^{-3}$  H e a capacitância tem uma potência de 3 kvar. O esquema interno do bloco é o mesmo da Figura 4.14.

Para a validação dos testes do modelo do inversor, assim como feito nos modelos das microturbinas, é ligado uma carga resistiva na saída do inversor e na entrada é colocado o sinal de tensão de saída da *SOFC*, conforme ilustrado na Figura 4.27. O modelo *SOFC*, da Figura 4.27, é responsável por gerar 500 kVA de potência e resulta da associação de cinco células individuais de 100 kVA cada uma, conforme descrito em 4.1., dando origem a um grupo de 500 kVA. Assim, são verificados as respostas de tensão e corrente na carga através de duas simulações: uma com carga nominal 500 kW e uma com 250 kW. O sistema proposto é simulado com tempo de amostragem de  $2\mu s$ .

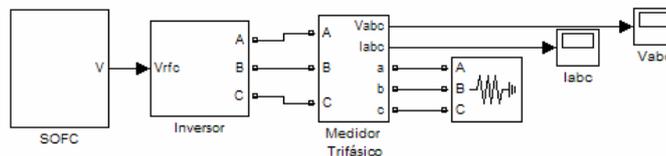


Figura 4.27 – Modelo do Inversor Conectado a *SOFC* e a Carga

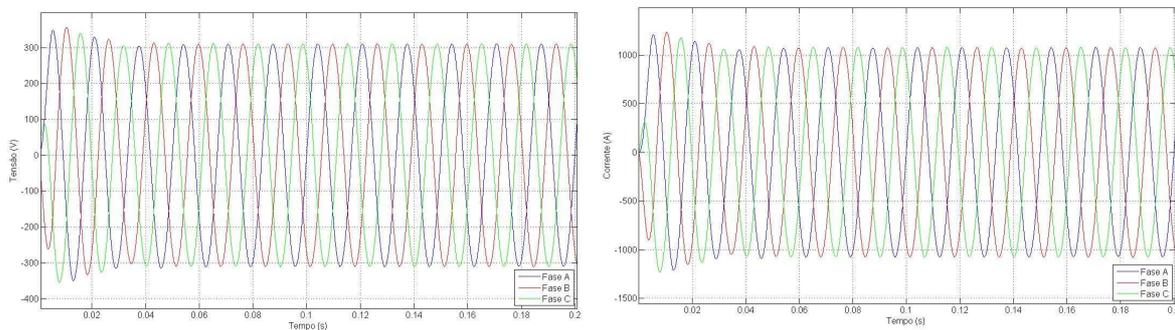


Figura 4.28 – Tensão de Saída - Carga 500 kW      Figura 4.29 – Corrente de Saída - Carga 500 kW

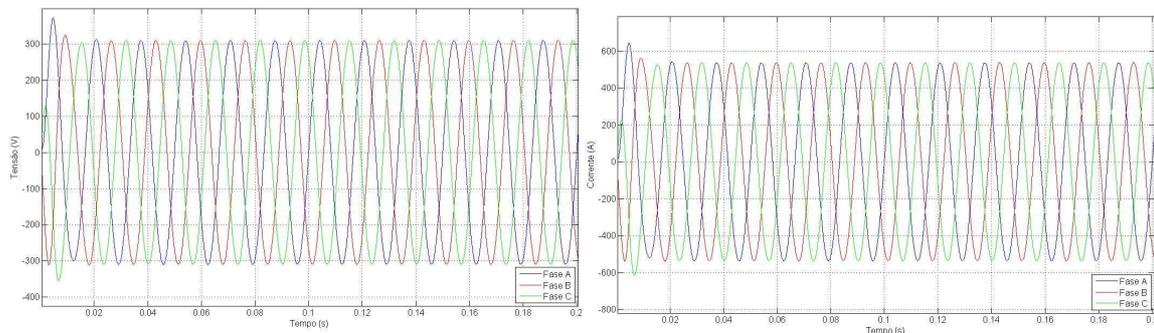


Figura 4.30 – Tensão de Saída - Carga 250 kW      Figura 4.31 – Corrente de Saída - Carga 250 kW

As Figuras 4.28 a 4.31 apresentam as respostas temporais da tensão fase-neutro e da corrente de linha na carga ligada ao inversor. Através das respostas observa-se que tanto para a carga nominal como para 50% do valor da carga nominal a resposta de tensão é a mesma e a corrente possui amplitude de acordo com a potência da carga, conforme a teoria da lei de ohm. Ambas, tensão e corrente, apresentam curvas senoidais com 60 Hz de frequência. A tensão apresenta uma amplitude de 380 V (rms) entre fases e 220 V (rms) entre fase e neutro. Através destas simulações, considera-se o modelo do inversor adequado para a aplicação nas análises e simulações deste trabalho.

# 5. Modelagem da Plataforma de Simulação

Neste capítulo, será descrito a integração das fontes de GD utilizadas neste trabalho com uma rede de distribuição. O objetivo é criar uma plataforma de simulação, com as fontes de geração distribuída e a rede elétrica, dando origem a uma microrrede, para realização de estudos de simulações dinâmicas e transitórias, observando o impacto destas fontes operando juntas com uma rede de distribuição, como também de forma isolada ou ilhada.

O capítulo divide-se em três partes: a primeira apresenta uma síntese geral sobre a integração dos modelos das fontes com a rede elétrica; a segunda descreve a modelagem da plataforma de simulação para a realização de simulações com incrementos de carga (análise dinâmica), e testes de curto-circuito (análise transitória); na terceira são apresentadas as conclusões e dificuldades encontradas na integração dos modelos. A montagem das plataformas de simulação leva em consideração os modelos das fontes desenvolvidos no capítulo 4, considerando todos trabalhando com potência nominal desde a partida de cada fonte.

## 5.1 Integração dos Modelos

Todos os modelos, descritos no capítulo 4, foram aqui agrupados numa plataforma com quatro ou cinco barramentos, que depende do tipo de simulação a ser realizada (análise dinâmica ou transitória), correspondente a um pequeno sistema ligado a uma pequena rede de distribuição, que também pode ser chamada de uma microrrede, sendo que a preocupação fundamental foi a avaliação da tensão quando os modelos foram agrupados.

Assim, foi criado no *Simulink* um modelo que inclui as três fontes de GD, os conversores associados às respectivas fontes, os transformadores, que elevam a tensão gerada por cada fonte

de 380 V para 13,8 kV, as linhas de distribuição, que no modelo representam a distância entre cada fonte da rede elétrica, a rede de distribuição e as cargas ligadas ao sistema. A Figura 5.1 apresenta o esquema da microrede ligada a uma rede de distribuição do tipo radial. Nas Figuras 5.2 e 5.3, este esquema da microrede é representado através de diagramas de bloco, utilizando as caixas de ferramentas do *Simulink* e *SimPowerSystem*.

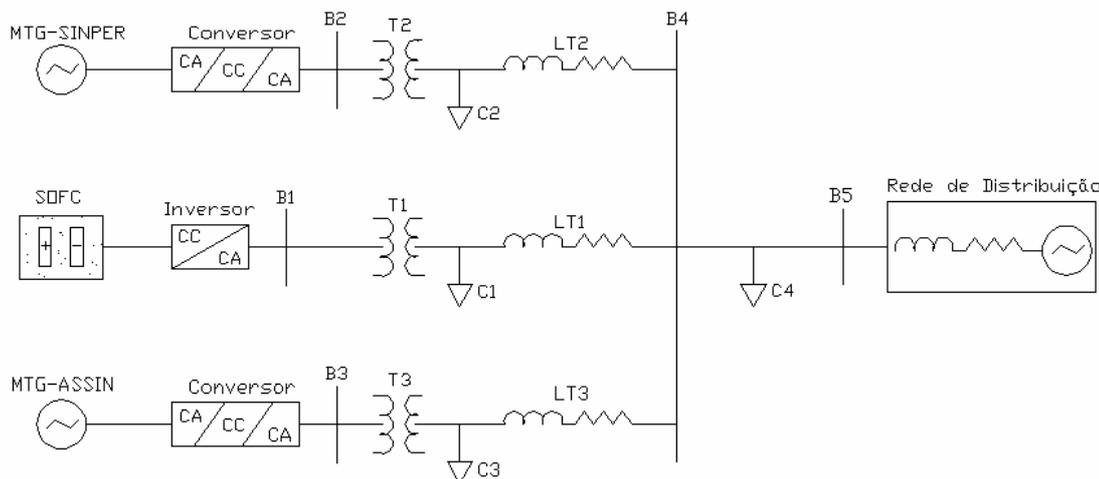


Figura 5.1 – Estrutura da Microrede com as Fontes de GD

Todos os modelos são configurados de modo idêntico ao apresentado nos capítulos anteriores, sendo que as entradas da célula combustível e dos modelos de microturbinas a gás (*MTG-SINPER* e *MTG-ASSIN*), a potência de referência, apesar de representadas por degraus, tem os tempos de transição ajustados para um valor nulo, de modo que a transição ocorra logo no início da simulação. Deste modo, ambas apresentarão potências de saída constantes e iguais a 500 kVA para o caso da célula combustível, 300 kVA para o modelo *MTG-SINPER* e 150 kVA para o modelo *MTG-ASSIN*. O valor da potência fornecida pelo grupo de células combustíveis é elevado se comparado com o modelo desenvolvido no capítulo 4, porém, o elevado valor da potência da célula combustível resulta da associação de cinco células combustíveis individuais de 100 kVA cada uma formando um grupo de células combustíveis de 500 kVA. Na simulação, este grupo de células combustíveis é representado pela multiplicação da tensão e potência da célula de 100 kVA, modelada no capítulo 4, pelo fator adequado.

Os transformadores apresentam potência nominal igual a da fonte que são ligados, 500 kVA, 300 kVA e 150 kVA, respectivamente, e suas impedâncias apresentam os mesmos valores percentuais, já que os três transformadores são ligados em paralelo. As linhas apresentam 10 km

de comprimento cada uma e a rede de distribuição opera com 13,8 kV, a 60 Hz com capacidade de 2 MVA.

## 5.2 Plataforma de Simulação

Nesta plataforma, os modelos são agrupados, em ambiente de *Matlab/Simulink*, e ligados em paralelo entre si e conectados a uma barra seguida de uma rede de distribuição que pode ser representada por um barramento infinito. O modelo da plataforma inclui além das fontes, os conversores, inversor, transformadores, pequenas linhas de distribuição, cargas e a fonte trifásica que representa a rede de distribuição. O sistema é composto por barramentos, onde cada um é capaz de fazer a leitura de tensão e corrente que circula por ele. A Figura 5.2 apresenta a plataforma de simulação com um incremento de carga, o modelo da Figura 5.2 é utilizado para a análise dinâmica. A Figura 5.3 apresenta um curto-circuito, o modelo da Figura 5.3 é utilizado para análise transitória da plataforma de simulação.

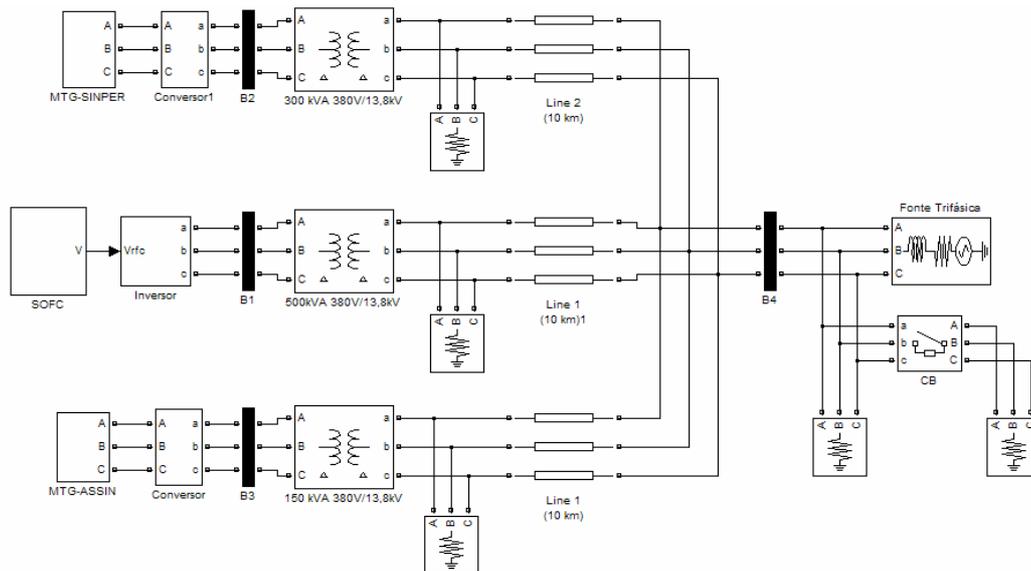


Figura 5.2 – Plataforma de Simulação para Análise Dinâmica

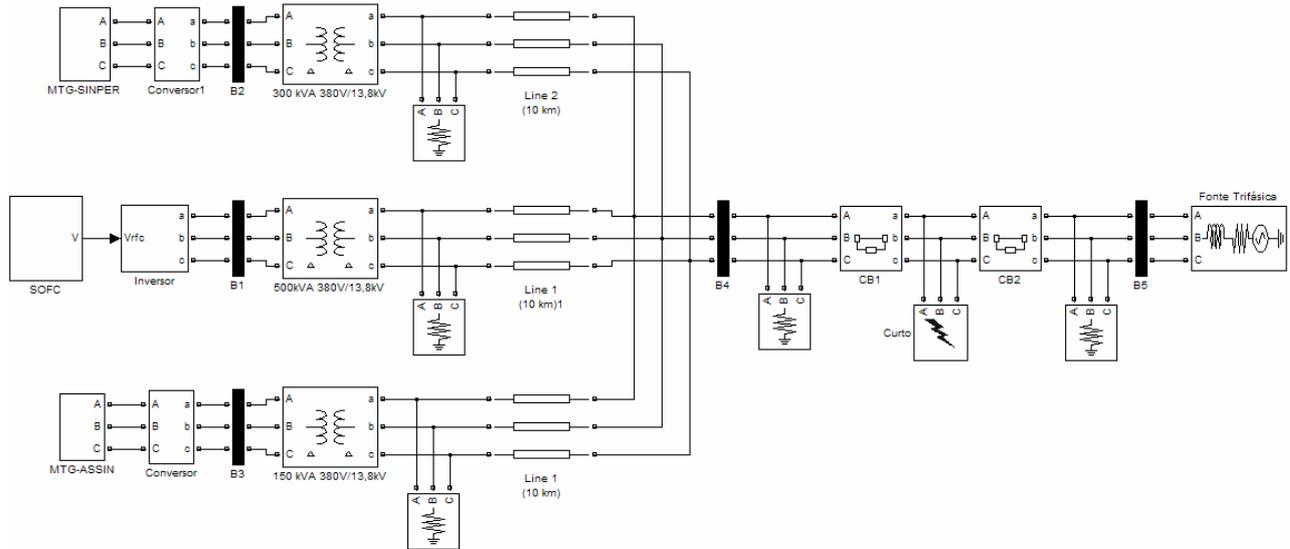


Figura 5.3 – Plataforma de Simulação para Análise Transitória

Todas as fontes, sejam as células combustíveis como as microturbinas a gás com máquina síncrona a ímãs permanentes e máquina assíncrona (*MTG-SINPER* e *MTG-ASSIN*), são ajustadas para partirem em condição nominal, logo, os parâmetros iniciais de entrada já são os valores nominais de cada fonte.

A célula combustível, por gerar tensão contínua, é ligada ao inversor apresentado em 4.3.2 e este faz a interface com o sistema, sendo ligado a barra 1 conforme Figuras 5.2 e 5.3. Os modelos *MTG-SINPER* e *MTG-ASSIN* são ligados aos seus conversores apresentados na seção 4.3.1 e fazem interface com a rede, sendo ligados, respectivamente, às barras 2 e 3 do sistema das Figuras 5.2 e 5.3.

Cada barra do sistema possui um subsistema que contém um medidor de tensão trifásico, logo, em cada barra é determinado o nível de tensão e corrente que circula em cada uma, em p.u.. Neste trabalho considerou-se uma base de potência de 1 MVA.

Os três transformadores utilizados no sistema possuem as mesmas impedâncias percentuais e potência de acordo com a potência nominal de cada fonte, ao qual são conectados. Todos transformam as tensões das fontes de 380 V para 13,8 kV na frequência de 60 Hz. O bloco do transformador foi extraído da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem* e seus parâmetros podem ser visualizados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente.

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>P<sub>n</sub></i>	<i>Potência Nominal</i>	500 kVA
<i>f<sub>n</sub></i>	<i>Frequência Nominal</i>	60 Hz
<i>EBT</i>	<i>Ligação do Enrolamento de BT</i>	<i>Delta (D1)</i>
	<i>Tensão BT</i>	380 V
	<i>Resistência BT</i>	0,008 p.u.
	<i>Indutância BT</i>	0,008 p.u.
<i>EAT</i>	<i>Ligação do Enrolamento de AT</i>	<i>Delta (D1)</i>
	<i>Tensão AT</i>	13800 V
	<i>Resistência AT</i>	0,008 p.u.
	<i>Indutância AT</i>	0,008 p.u.
<i>R<sub>m</sub></i>	<i>Resistência de Magnetização</i>	50 p.u.
<i>L<sub>m</sub></i>	<i>Reatância de Magnetização</i>	50 p.u.

Tabela 5.1 – Parâmetros Ajustados para o Transformador de 500 kVA

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>P<sub>n</sub></i>	<i>Potência Nominal</i>	300 kVA
<i>f<sub>n</sub></i>	<i>Frequência Nominal</i>	60 Hz
<i>EBT</i>	<i>Ligação do Enrolamento de BT</i>	<i>Delta (D1)</i>
	<i>Tensão BT</i>	380 V
	<i>Resistência BT</i>	0,0048 p.u.
	<i>Indutância BT</i>	0,0048 p.u.
<i>EAT</i>	<i>Ligação do Enrolamento de AT</i>	<i>Delta (D1)</i>
	<i>Tensão AT</i>	13800 V
	<i>Resistência AT</i>	0,0048 p.u.
	<i>Indutância AT</i>	0,0048 p.u.
<i>R<sub>m</sub></i>	<i>Resistência de Magnetização</i>	50 p.u.
<i>L<sub>m</sub></i>	<i>Reatância de Magnetização</i>	50 p.u.

Tabela 5.2 – Parâmetros Ajustados para o Transformador de 300 kVA

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>P<sub>n</sub></i>	<i>Potência Nominal</i>	150 kVA
<i>f<sub>n</sub></i>	<i>Frequência Nominal</i>	60 Hz
<i>EBT</i>	<i>Ligação do Enrolamento de BT</i>	<i>Delta (D1)</i>
	<i>Tensão BT</i>	380 V
	<i>Resistência BT</i>	0,0024 p.u.
	<i>Indutância BT</i>	0,0024 p.u.
<i>EAT</i>	<i>Ligação do Enrolamento de AT</i>	<i>Delta (D1)</i>
	<i>Tensão AT</i>	13800 V
	<i>Resistência AT</i>	0,0024 p.u.
	<i>Indutância AT</i>	0,0024 p.u.
<i>R<sub>m</sub></i>	<i>Resistência de Magnetização</i>	50 p.u.
<i>L<sub>m</sub></i>	<i>Reatância de Magnetização</i>	50 p.u.

Tabela 5.3 – Parâmetros Ajustados para o Transformador de 150 kVA

O bloco do transformador implementa um transformador trifásico real com dois enrolamentos. O modelo leva em consideração as resistências dos enrolamentos, as reatâncias de dispersão de cada enrolamento e a resistência e reatância de magnetização. De acordo com o modelo do bloco do transformador, pode-se optar por considerar a saturação do núcleo ou não,

além disto, o bloco possibilita a escolha de diversas ligações dos enrolamentos de alta e baixa tensão de acordo com a aplicação do modelo a ser utilizado. Neste trabalho, não se considerou a saturação do núcleo, admitiu-se o transformador ser linear e as ligações dos enrolamentos são do tipo Delta-Delta.

As linhas de distribuição apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3 são de pequeno comprimento pois considera-se que cada fonte de GD está localizada a um ponto próximo da rede. Neste trabalho, considerou-se uma distância de 10 km da rede de distribuição. Cada fonte do sistema das Figuras 5.2 e 5.3 atende a uma demanda local, por isso, são ligadas cargas na saída dos transformadores de cada fonte. O bloco das linhas de distribuição também foi extraído da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem* e possui a configuração descrita na Tabela 5.4. O modelo da linha do tipo  $\pi$  leva em consideração a resistência e reatâncias indutivas e capacitivas de seqüência zero, positiva e negativa, sendo que os valores dos parâmetros de seqüência positiva são iguais aos de seqüência negativa. Ambas, as três linhas, apresentam a mesma configuração.

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>N</i>	<i>Número de Fases</i>	3
<i>fn</i>	<i>Frequência</i>	60 Hz
<i>R1</i>	<i>Resistência por Unidade de Comprimento – Seqüência Positiva</i>	0,01273 $\Omega$ /km
<i>R0</i>	<i>Resistência por Unidade de Comprimento – Seqüência Zero</i>	0,3864 $\Omega$ /km
<i>L1</i>	<i>Indutância por Unidade de Comprimento – Seqüência Positiva</i>	0,9337e <sup>-3</sup> H/km
<i>L0</i>	<i>Indutância por Unidade de Comprimento – Seqüência Zero</i>	4,1264e <sup>-3</sup> H/km
<i>C1</i>	<i>Capacitância por Unidade de Comprimento – Seqüência Positiva</i>	12,74e <sup>-9</sup> F/km
<i>C0</i>	<i>Capacitância por Unidade de Comprimento – Seqüência Zero</i>	7,751e <sup>-9</sup> F/km
<i>L</i>	<i>Comprimento</i>	10 km

Tabela 5.4 – Parâmetros Ajustados para as Linhas de Distribuição

O bloco da fonte trifásica que representa a rede de distribuição e também pode ser entendido como um barramento infinito, também foi extraído da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*, ele possui a configuração descrita na Tabela 5.5.

<b>Parâmetro</b>	<b>Representação</b>	<b>Valor</b>
<i>V<sub>ff</sub></i>	<i>Tensão Fase-Fase</i>	13,8 kV
<i>AfA</i>	<i>Ângulo da Fase A</i>	0
<i>fn</i>	<i>Frequência Nominal</i>	60 Hz
<i>CI</i>	<i>Conexão Interna</i>	<i>Y<sub>g</sub></i>
<i>BNCC</i>	<i>Base do Nível de Curto-Circuito</i>	2 MVA
<i>BV</i>	<i>Base de Tensão</i>	13,8 kV
<i>X/R</i>	<i>Relação X/R</i>	5

Tabela 5.5 – Parâmetros Ajustados para a Rede de Distribuição

A rede de distribuição tem uma tensão de 13,8 kV, 2 MVA de potência e opera a 60 Hz, conforme mostrado na Tabela 5.5. O bloco da fonte de trifásica implementa uma fonte de tensão

trifásica, balanceada, com impedância interna RL. A fonte possui ligação interna em estrela com o neutro aterrado ( $Y_g$ ), o bloco também permite que esta ligação não seja aterrada, ou ainda seja aterrada através de um quarto terminal. A fonte também permite que seja especificado diretamente a resistência e indutância interna, caso seja necessário, ao invés de especificar-se a relação X/R, como feito neste trabalho.

Os blocos com as cargas podem ser configurados com característica puramente resistiva, indutiva e/ou capacitiva, como também através de combinações destes. Estes blocos também foram extraídos da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem* e a cada bloco foi atribuído um diferente valor de carga, que representa uma demanda de consumo. O bloco é simples e permite a especificação da tensão da carga, frequência e as respectivas potências de cada tipo de carga, seja a potência ativa como a reativa. Este bloco também permite que a conexão interna das três fases seja com neutro aterrado, como feito neste trabalho, ou com neutro sem aterramento, ou com um quarto terminal para aterramento ou ainda em triângulo. Os valores de potência de cada carga são especificados em watts (W) ou volt-ampere-reativo (vars).

A chave CB, que implementa o incremento de carga através de seu chaveamento e abertura do sistema no caso do curto-circuito, permite especificar o tempo em que deverá ser acionada bem como o número de fases que deverão ser ligadas ou desligadas. O tempo de acionamento é inserido em ciclos de segundos, e o número de fases que a chave deve abrir é selecionado manualmente no bloco da chave, entre as fases ABC. Neste bloco também é permitido especificar a *resistência snubber* como também a *capacitância snubber*. Ambas são utilizadas para eliminar transitórios durante as simulações e ainda uma pequena resistência interna. Neste trabalho, todas as chaves CB utilizadas, tanto nas simulações da análise dinâmica como nas da análise transitória, possuem a mesma configuração, sendo a resistência interna da chave configurada para  $1e^{-3}\Omega$ , a *resistência snubber* para  $1e^5\Omega$  e a *capacitância snubber* para infinito. O único parâmetro que muda é o tempo de abertura e fechamento de cada chave que varia de acordo com cada simulação. A chave também permite ser programada para partir de modo aberto ou fechado, de acordo com a necessidade.

O bloco do curto-circuito permite especificar se o curto é monofásico, bifásico ou trifásico, se envolve a terra ou não, a resistência interna do bloco, o tempo que o mesmo deverá ocorrer e sua duração. Nesta dissertação, considerou-se a resistência interna do bloco do curto igual a 0,01 p.u. e a resistência interna do bloco do curto, para casos em que envolve a terra,

igual a 1 p.u. para todas as simulações que envolvem curto-circuito, tanto para curtos monofásicos, como trifásicos.

O ajuste dos parâmetros dos transformadores, das linhas, da fonte trifásica, das cargas e das chaves, foram realizados de acordo com [MathWorks, 2007]. Em [MathWorks, 2007], são apresentados, em detalhes, o modelo e a função de cada bloco, bem como a forma de ajustá-los. Para o caso dos transformadores e linhas, segue-se a mesma teoria de modelagem encontrada em diversos livros e trabalhos.

Assim, se completa a modelagem da plataforma de simulação para análise dinâmica e transitória utilizando as fontes de geração distribuída. A partir destes modelos, juntamente com os modelos individuais de cada fonte, são simulados e verificados os resultados deste trabalho.

## 5.3 Dificuldades Encontradas

Ao finalizar-se a modelagem das duas plataformas de simulação constatou-se que a inclusão do modelo da rede, dos transformadores, das linhas e das chaves CB podem dificultar bastante a convergência dos cálculos efetuados pelo *Simulink*, atrasando, ou mesmo impossibilitando, as simulações, devido ao aumento da dimensão do modelo, pois cada fonte agrega um inversor ou conversor, e, também, devido aos problemas numéricos causados pelas reduzidas impedâncias dos transformadores, linhas e principalmente pelas chaves CB que abrem o sistema.

Em maior grau, os conversores de potência limitaram, e muito, o tempo de simulação empregado nas plataformas de simulação, devido ao bloco da ponte universal do *SimPowerSystem*, não permitindo que durante a análise do incremento de carga, como também na análise do curto-circuito, se obtivessem informações de parâmetros internos de cada fonte como a velocidade, pressão, potência mecânica, entre outros, devido ao tempo de simulação ser muito reduzido, variando de 1 a 5 segundos, de acordo com cada simulação. Entretanto, como as análises realizadas neste trabalho, do perfil da tensão, de incremento de carga e de curto-circuito não exigiam muito tempo de simulação, de apenas alguns ciclos de segundos, e pelo fato de não haver um software no mercado que contemple os modelos de vários tipos de conversores e blocos de máquinas em um mesmo ambiente, considerou-se os modelos das plataformas de simulação aceitáveis para as análises que serão realizadas neste trabalho. Não cabendo aqui,

desenvolver estratégias de simulação que permitissem maiores tempos de simulação para os modelos das plataformas implementados computacionalmente, ou mesmo a implementação computacional dos modelos em outro *software*. O método de integração utilizado nas plataformas de simulação foi a *ode3 (Bogacki-Shampine)*, com passo de integração *fixo* e tempo de amostragem de  $2e^{-6}$  s.

No próximo capítulo são apresentados os resultados das simulações usando as plataformas de simulação dinâmica e transitória apresentadas neste capítulo, bem como, outros resultados utilizando as fontes com microturbinas e células combustíveis.

## 6. Resultados e Simulações

Os resultados das simulações das plataformas de simulação, bem como, das fontes operando isoladamente são discutidos e apresentados neste capítulo. São realizados estudos de simulações dinâmicas, transitórias e de regime permanente. Cada estudo é apresentado e discutido em diferentes seções. Parte-se da análise do perfil da tensão, seguido da análise dinâmica e, por fim, a análise transitória. As respostas das simulações (corrente, tensão e potência) são todas fornecidas em p.u., utilizando como base uma potência de 1 MVA.

### 6.1 Análise do Perfil da Tensão

Nesta seção foi realizada uma análise do comportamento da tensão para diferentes situações de carregamento, ou seja, procurou-se variar a carga ligada ao sistema de células combustíveis, ao sistema *MTG-ASSIN* e ao sistema *MTG-SINPER* separadamente e verificar o comportamento da tensão. Assim, determinam-se as condições de mínimo e máximo carregamento de cada uma das fontes de geração distribuída utilizadas neste trabalho. Estas análises foram realizadas em ambiente de *Matlab/Simulink*, configurado com passo de integração fixo, método de integração ode3 (*Bogacki-Shampine*) e tempo de amostragem de 2  $\mu$ s.

#### 6.1.1 Carregamento *SOFC*

Para a análise do perfil da tensão das células a combustível, partiu-se do modelo *SOFC* desenvolvido no capítulo 4 e seu respectivo inversor para ligá-lo a uma carga resistiva trifásica na mesma tensão de saída do inversor (380 V). As simulações foram realizadas através da variação desta carga e foi observado o comportamento da tensão perante a estas variações de carga. O modelo da Figura 6.1 ilustra o sistema de células combustíveis, o inversor e o respectivo bloco da carga trifásica utilizado para a análise do perfil da tensão.

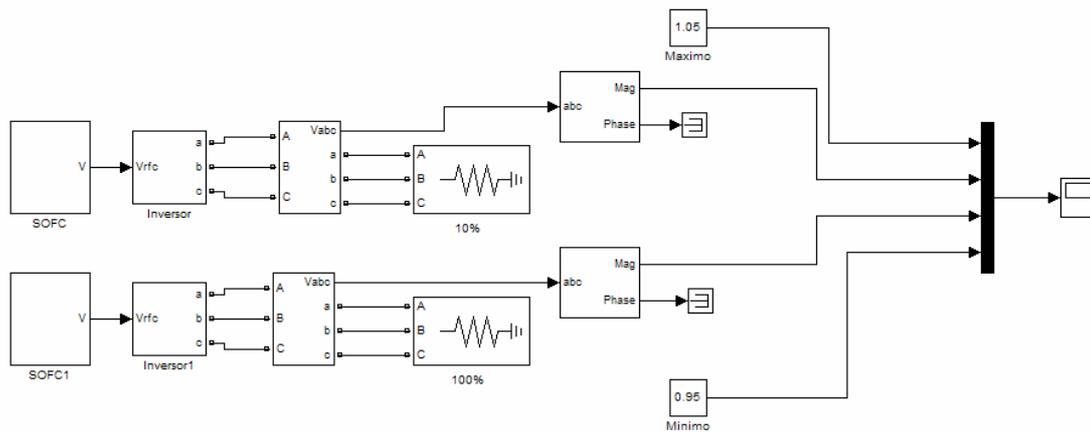


Figura 6.1 – Modelo *SOFC* para Análise de Carregamento

O esquema da Figura 6.1 apresenta dois grupos de células combustíveis iguais, com capacidade de gerar, cada um, 500 kVA. O bloco *SOFC* é um subsistema do esquema da Figura 4.2, onde todos os parâmetros são ajustados para iniciarem a simulação com potência nominal. A cada grupo é ligado um determinado valor de carga de forma a verificar a resposta de tensão, considerando uma carga máxima e uma carga mínima de consumo de energia elétrica. Então, atribui-se como carga mínima 10% da potência nominal do grupo de células combustíveis e carga máxima 100% da potência nominal, conforme indicado nas cargas da Figura 6.1. A Figura 6.2 mostra a resposta da tensão para os dois diferentes carregamentos (10 % e 100 % da potência nominal) considerando também os limites mínimos (0,95 p.u.) e máximos (1,05 p.u.) de tensão.

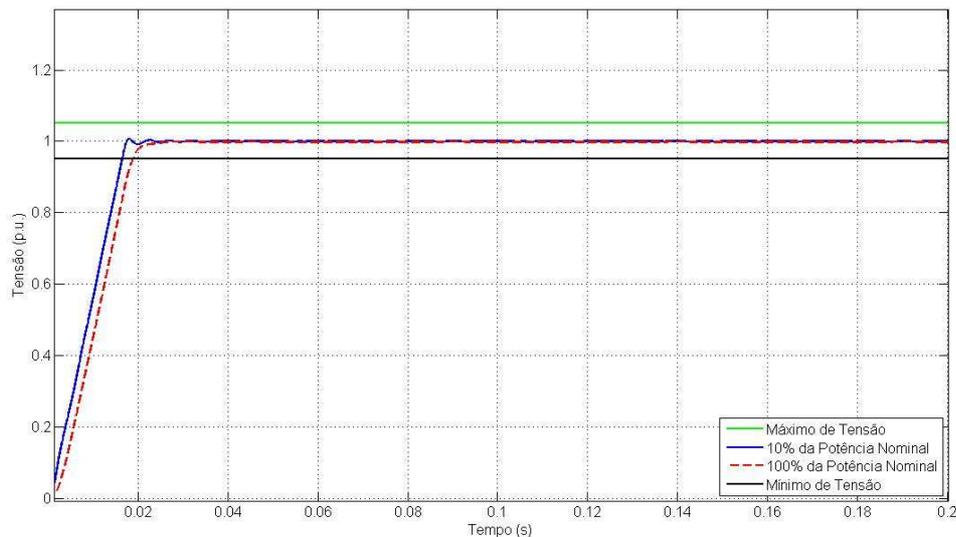


Figura 6.2 – Variação da Tensão para Mínimo e Máximo Carregamento *SOFC*

Cabe observar que, para os valores de carga mínima e máxima ajustados, a tensão não extrapolou os limites de operação, ou seja, ficou dentro da faixa entre 0,95 e 1,05 p.u. permitida de acordo com a resolução 505 da ANEEL [ANEEL, 2007]. A tensão atinge seu valor de regime permanente em aproximadamente 3 centésimos de segundos, esta resposta rápida ocorreu devido a presença do inversor, uma vez que a célula combustível operando sem o inversor apresenta uma resposta bem mais lenta, conforme será apresentado na seção 6.2.

Em parte, o atraso de 3 centésimos de segundos é decorrente do bloco *3-Phase Sequence Analyzer*, o qual determina a magnitude e fase da tensão com base na resposta temporal. Este bloco calcula a magnitude e fase através de uma *série de Fourier* que impõe um atraso de 1 ciclo (0,01667 s). Assim, parte do atraso de tempo é decorrente do bloco de transformação da resposta temporal da tensão em magnitude e fase e o restante é decorrente da resposta do sistema e, obviamente é um pouco mais lento para o caso com maior carregamento.

### 6.1.2 Carregamento *MTG-ASSIN*

Para a análise do perfil da tensão das microturbinas com máquina assíncrona, partiu-se do modelo *MTG-ASSIN*, desenvolvido no capítulo 4 e seu respectivo conversor para ligá-los a uma carga resistiva trifásica na mesma tensão de saída do conversor (380 V). As simulações foram realizadas através da variação desta carga e foi observado o comportamento da tensão perante a estas variações de carga. O modelo da Figura 6.3 ilustra o sistema *MTG-ASSIN*, o conversor e o respectivo bloco da carga trifásica.

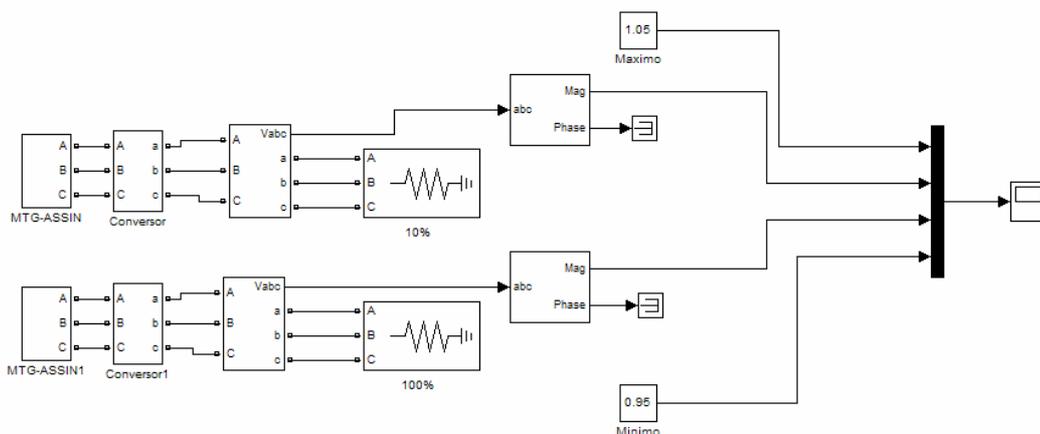


Figura 6.3 – Modelo *MTG-ASSIN* para Análise de Carregamento

O esquema da Figura 6.3 apresenta dois grupos *MTG-ASSIN* iguais, com capacidade de gerar, cada um, 150 kVA. O bloco *MTG-ASSIN* é um subsistema do esquema da Figura 4.7, onde todos os parâmetros são ajustados para iniciarem a simulação com potência nominal. Da mesma forma que na análise de carregamento da *SOFC*, atribui-se como carga mínima 10% da potência nominal do modelo *MTG-ASSIN* e carga máxima 100% da potência nominal. A Figura 6.4 mostra a resposta da tensão para os dois diferentes carregamentos.

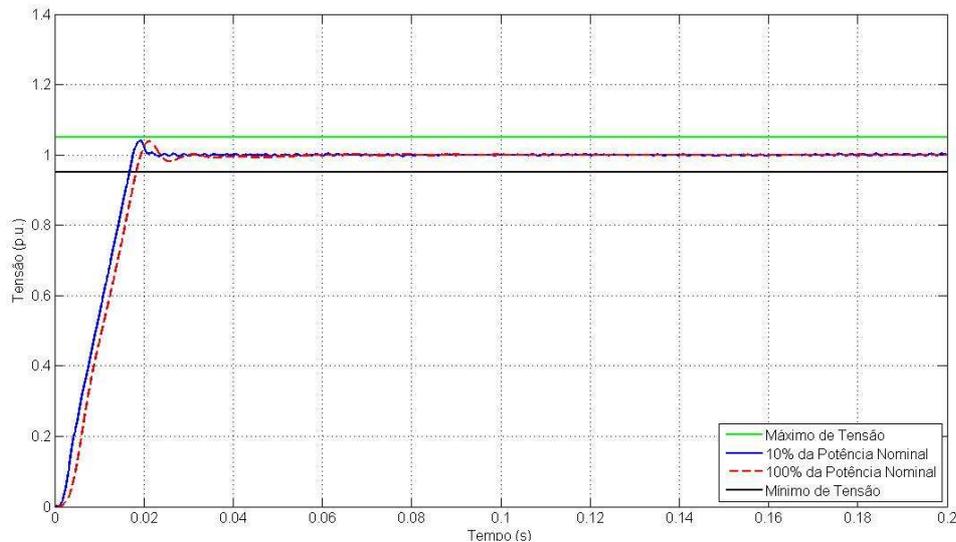


Figura 6.4 – Variação da Tensão para Mínimo e Máximo Carregamento *MTG-ASSIN*

Assim como observado nos resultados de carregamento *SOFC*, os valores de tensão não extrapolaram os limites de operação. As tensões atingem o regime em menos de 4 centésimos de segundos, resposta esta devido a presença do conversor.

Na Figura 6.4, observa-se também um pequeno sobre-sinal em ambas as curvas de carregamento (10 e 100%), o qual está relacionado com o comportamento do modelo da máquina, uma vez que o modelo elétrico da máquina assíncrona é representado por uma função de quarta ordem. Na Figura 6.4, a curva para o carregamento de 10% oscila menos e estabiliza-se um pouco mais rápido que a curva com carregamento de 100%, em função da resposta do modelo ser mais rápida para carregamentos baixos.

### 6.1.3 Carregamento *MTG-SINPER*

Para a análise do perfil da tensão das microturbinas com máquina síncrona a imãs permanentes, partiu-se do modelo desenvolvido no capítulo 4 e seu respectivo conversor para

ligá-los a uma carga resistiva trifásica na mesma tensão de saída do conversor (380 V). As simulações foram realizadas através da variação desta carga e foi observado o comportamento da tensão perante a estas variações de carga. O modelo da Figura 6.5 ilustra o sistema *MTG-SINPER*, o conversor e o respectivo bloco da carga trifásica.

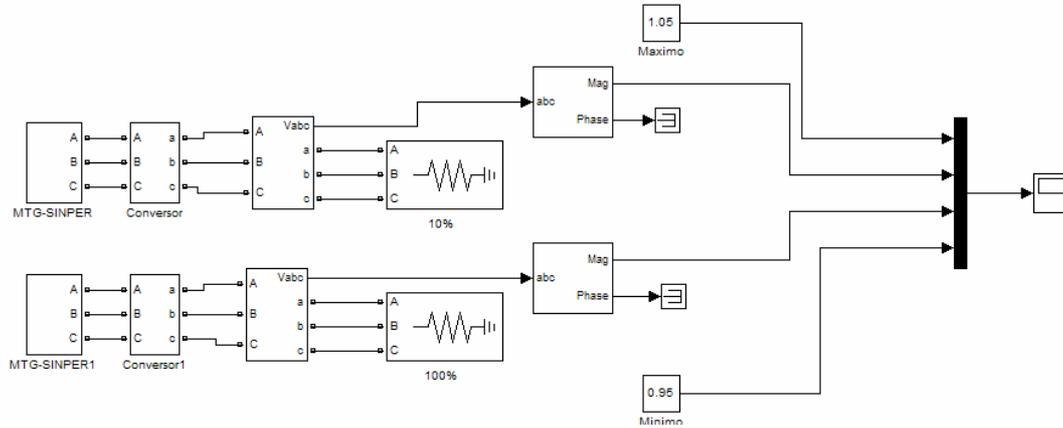


Figura 6.5 – Modelo *MTG-SINPER* para Análise de Carregamento

O esquema da Figura 6.5 apresenta dois grupos *MTG-SINPER* iguais, com capacidade de gerar, cada um, 300 kVA. O bloco *MTG-SINPER* é um subsistema do esquema da Figura 4.9, onde todos os parâmetros são ajustados para iniciarem a simulação com potência nominal. Da mesma forma que na análise de carregamento *SOFC* e *MTG-ASSIN*, considerou-se carga mínima 10% e carga máxima 100% da potência nominal da *MTG-SINPER*. A Figura 6.6 mostra a resposta da tensão para os dois diferentes carregamentos.

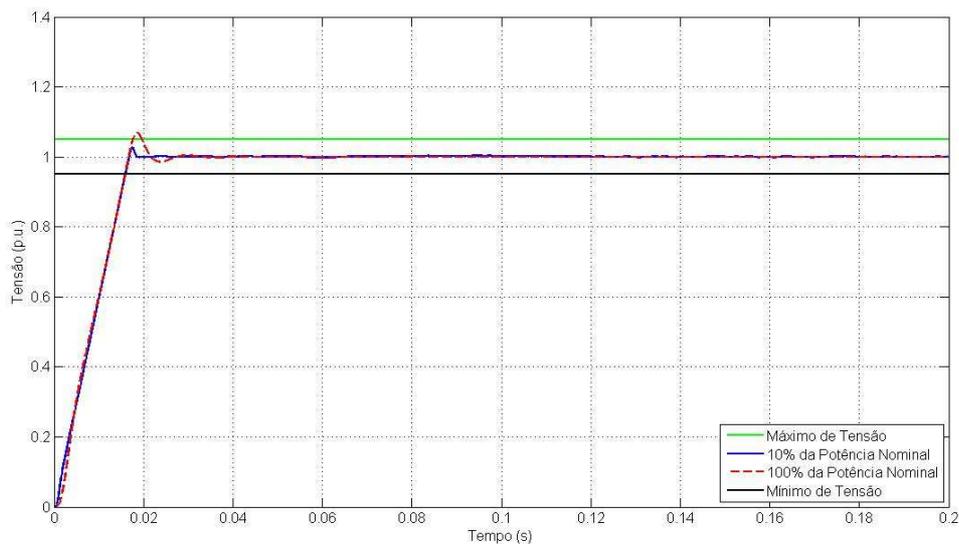


Figura 6.6 – Variação da Tensão para Mínimo e Máximo Carregamento *MTG-SINPER*

De acordo com a Figura 6.6, os valores de tensão também não extrapolaram os limites de operação para os carregamentos simulados. As tensões atingiram o regime em menos de 4 centésimos de segundos.

Na Figura 6.6 também verifica-se um pequeno sobre-sinal em ambas as curvas de carregamento, sendo maior para o carregamento de 100% da potência nominal. Novamente o sobre-sinal e a oscilação estão relacionados ao comportamento da máquina, que é representado por uma função de sexta ordem, onde a resposta que apresenta o maior sobre-sinal e maior oscilação é a resposta de tensão com maior carregamento.

### 6.1.4 Avaliação dos Resultados da Análise do Perfil da Tensão

Para verificar-se os limites de carregamento de cada tipo de fonte foram simulados diversos carregamentos, por fonte, e verificado o comportamento da tensão. Assim foi elaborado o gráfico da Figura 6.7 que apresenta o perfil da tensão para carregamentos de 1 % a 130 % do valor da potência nominal de cada fonte.

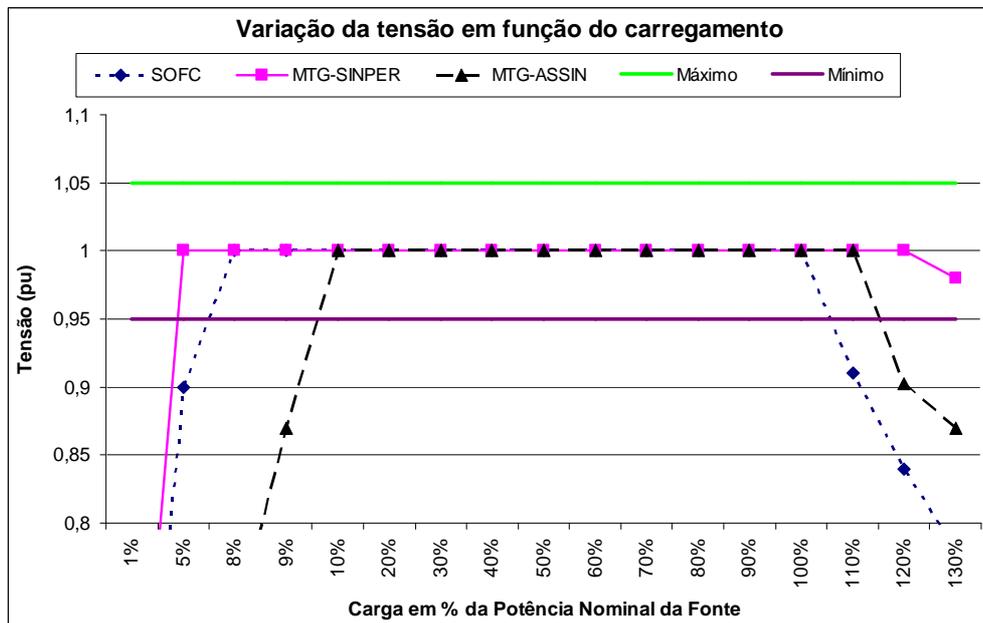


Figura 6.7 – Variação da Tensão em Função da Carga

Com base na Figura 6.7 conclui-se que o grupo de células combustíveis com seu respectivo inversor pode operar dentro dos limites aceitáveis de tensão para carregamentos entre 40 kW e 500 kW. A fonte *MTG-ASSIN* pode operar dentro dos limites aceitáveis de tensão para

carregamentos de 15 kW até 165 kW e a fonte *MTG-SINPER* pode operar dentro dos limites aceitáveis de tensão para carregamentos de 15 kW até 390 kW, conforme apresentado nas curvas da Figura 6.7. Para carregamentos de 10 a 100% da potência nominal de cada fonte, os valores de tensão apresentam comportamento constante e igual a 1 p.u. e para valores acima de 100% e abaixo de 10% o comportamento da tensão varia de acordo com cada fonte.

Segundo [MathWorks, 2007], quando são utilizados os blocos das máquinas síncronas e assíncronas da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*, em sistemas discretos, deve ser usado uma pequena resistência de carga parasita conectada nos terminais da máquina de forma a evitar oscilações numéricas. A mínima resistência de carga é proporcional ao tempo de amostragem. Por este motivo, carregamentos inferiores a 10% da potência nominal apresentaram violação da tensão, ou seja, a tensão não atingiu os limites mínimos de operação devido a esta restrição imposta pelo *Simulink*, conforme pode ser verificado na Figura 6.7. No caso da *SOFC*, atribui-se a mesma conclusão para carregamentos inferiores a 10%, referente a restrição imposta pelo *Simulink*, uma vez que a simulação é discretizada. Além disto, também se utiliza a carga parasita, com um valor mínimo de resistência para evitar erros de convergência numérica quando são utilizados os blocos dos transformadores e linhas de distribuição do *SimPowerSystem*.

As análises de carregamento para as três fontes, 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3, apresentaram um transitório rápido e muito rapidamente atingiram o regime permanente. Estas respostas rápidas ocorreram devido ao inversor e conversor de cada fonte. A tensão ficou dentro dos limites aceitáveis para carregamentos de 10 % a 100 % , no mínimo, da potência nominal de cada fonte.

## 6.2 Análise Dinâmica

Esta análise é desenvolvida com base na aplicação de um degrau de carga quando cada fonte opera isoladamente e, também, através de um incremento de carga quando as fontes de GD operam juntas e ligadas ao sistema de distribuição. Primeiramente, é simulado um degrau de carga para o grupo de células a combustível, seguido do mesmo degrau para os dois sistemas de microturbinas (*MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*) e, por último, faz-se a análise do incremento de carga no sistema considerando as três fontes de GD operando, em paralelo, e ligadas a rede de distribuição.

### 6.2.1 Aplicação de um Degrau de Carga na SOFC

O modelo da célula a combustível utilizado para a análise dinâmica é mostrado na Figura 6.8. Dentro do bloco *SOFC*, da Figura 6.8, está inserido o modelo da célula combustível apresentado na Figura 4.2. Este modelo possui a chamada *mask* que permite posicionar e substituir os valores de determinadas variáveis no modelo da célula combustível permitindo realizar simulações alterando os valores de determinados parâmetros, neste caso, a potência inicial que é considerada 70% do valor nominal do grupo de células combustíveis, a tensão de entrada e fator de utilização do combustível, considerado 85 %. Esta análise é realizada em ambiente de *Matlab/Simulink*, configurado com passo de integração variável e método de integração *ode45 (Dormand-Prince)*.

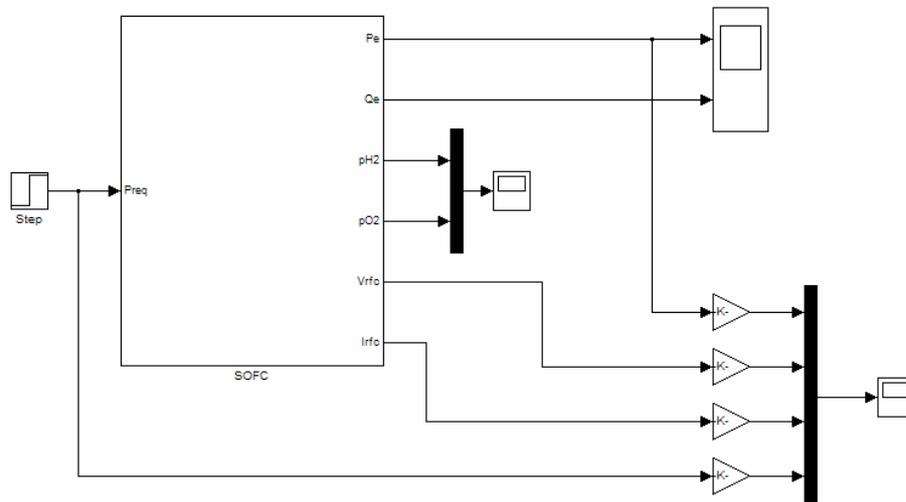


Figura 6.8 – Modelo Dinâmico da SOFC

A análise dinâmica das células combustíveis consiste na aplicação de um degrau de 0.7 p.u. para 1 p.u. na potência de referência do sistema modelado e apresentado na Figura 6.8, onde os parâmetros do modelo são os mesmos da Tabela 4.2. O incremento de potência ocorre no instante de tempo igual a 1 segundo. A Figura 6.9 mostra a resposta dinâmica da potência demandada, da potência de saída, da tensão e corrente de saída quando simulado o degrau de carga e a Figura 6.10 apresenta a pressão do hidrogênio e do oxigênio que são aplicadas na equação de *Nernst* para obtenção da tensão da célula, resultantes da simulação do degrau de carga. Nesta análise, é observado o desempenho de apenas uma célula combustível de 100 kVA, e não do grupo de células de 500 kVA, utilizado nas demais análises.

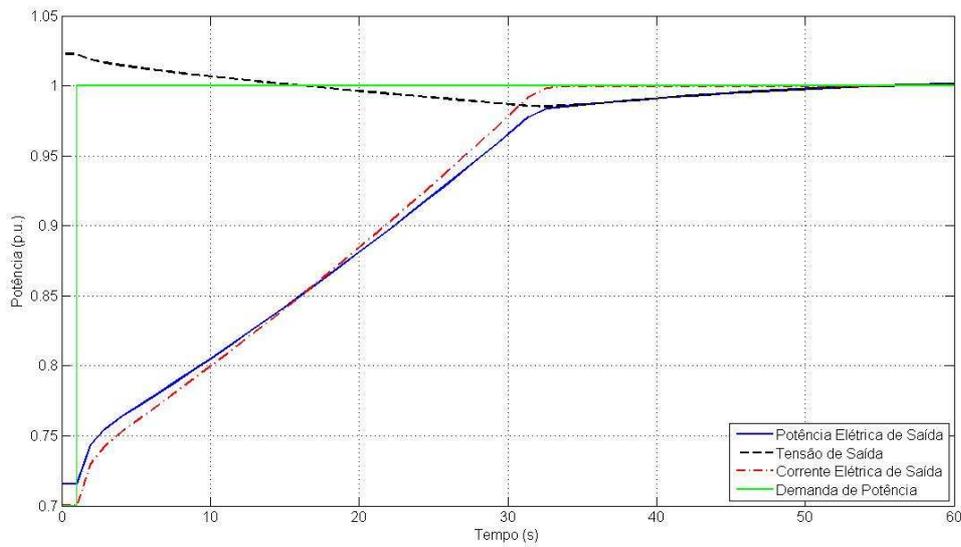


Figura 6.9 – Resposta ao Degrau da *SOFC*

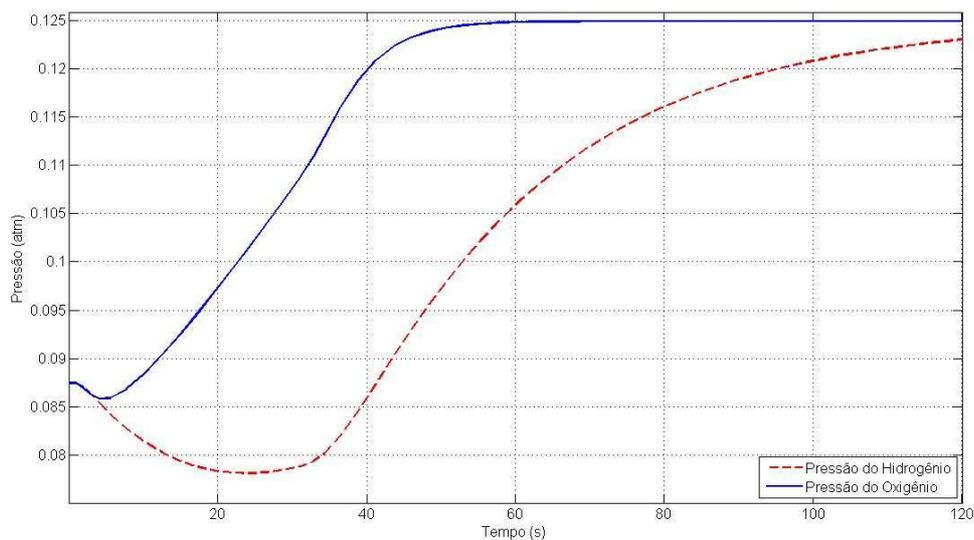


Figura 6.10 – Pressão do Hidrogênio e Oxigênio

Na resposta da Figura 6.9 observa-se que a potência elétrica, leva aproximadamente 50 segundos para atingir 1 p.u. e a corrente aproximadamente 30 segundos. A potência leva mais tempo para atingir 1 p.u. devido a resposta da tensão que também leva aproximadamente 50 segundos para atingir 1 p.u.. Estas respostas lentas ocorrem devido ao tempo de resposta do processador de combustível, ou seja, devido as reações químicas que ocorreram no processador.

Na Figura 6.10 a diferença de pressão entre o hidrogênio e o oxigênio aumenta até um pico de 3,5 kPa (0,029608 atm), que é menor que a máxima diferença de pressão de 8 kPa

(0,078954 atm) durante o funcionamento transitório [He, 1998] e em regime a diferença de pressão é próxima de zero.

### 6.2.2 Aplicação de um Degrau de Carga na *MTG-ASSIN*

O modelo da microturbina com máquina assíncrona utilizado para a análise dinâmica é mostrado na Figura 6.11. Dentro do bloco Microturbina *GAST*, da Figura 6.11, está inserido o modelo da microturbina apresentado na Figura 4.6. Este modelo também possui a chamada *mask* que permite posicionar e substituir os valores de determinadas variáveis no modelo *MTG-ASSIN* permitindo realizar simulações alterando os valores de determinados parâmetros, neste caso, a potência inicial que é considerada 70% do valor da potência nominal da microturbina. Esta análise é realizada em ambiente de *Matlab/Simulink*, configurado com passo de integração variável e método de integração *ode45 (Dormand-Prince)*.

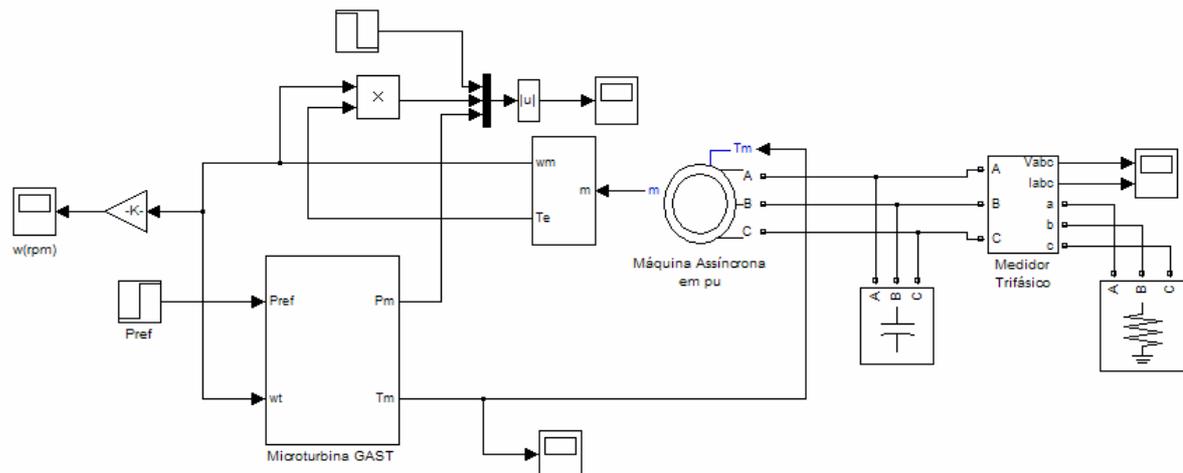


Figura 6.11 – Modelo Dinâmico da *MTG-ASSIN*

A análise dinâmica da microturbina com máquina assíncrona (*MTG-ASSIN*) consiste na aplicação de um degrau de 0.7 p.u. para 1 p.u. na potência de referência do sistema modelado na Figura 6.11, onde os parâmetros do modelo são os mesmos apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4. O incremento de potência ocorre no instante de tempo igual a 1 segundo. A Figura 6.12 mostra a resposta dinâmica da potência demandada, da potência elétrica de saída e da potência mecânica fornecida pela microturbina a máquina elétrica quando simulado o degrau de carga, e, a Figura 6.13, apresenta a resposta da velocidade da máquina assíncrona na ocorrência do degrau.

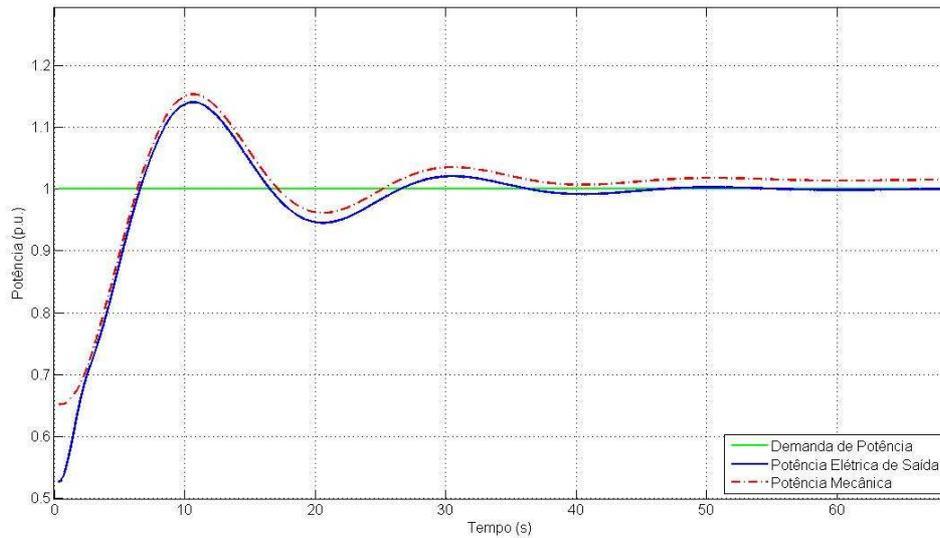


Figura 6.12 – Resposta ao Degrau da *MTG-ASSIN*

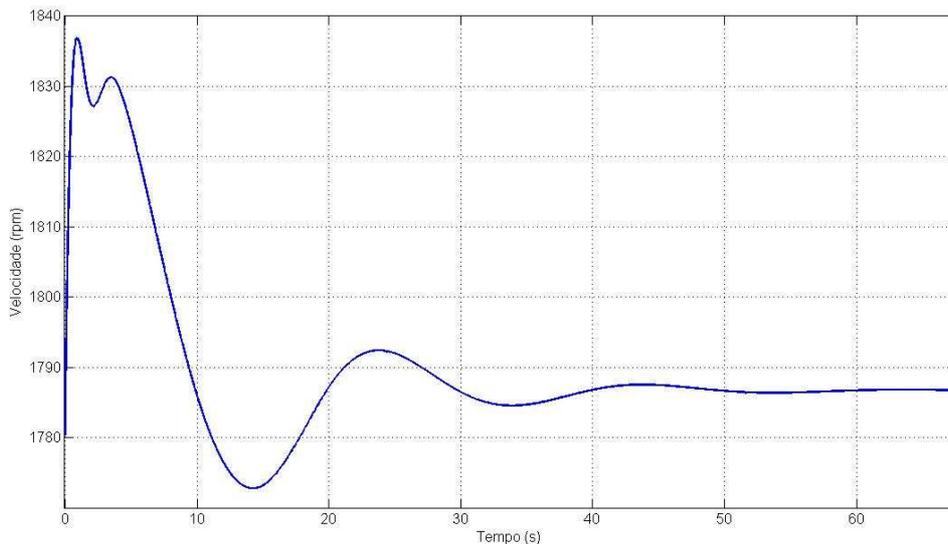


Figura 6.13 – Velocidade da *MTG-ASSIN*

Na Figura 6.12 a potência mecânica e elétrica apresentam comportamento semelhante e atingem o regime em aproximadamente 50 segundos. A diferença entre a potência mecânica e elétrica está relacionada com as perdas da máquina, por este motivo a potência mecânica é maior. As duas respostas apresentam um atraso de tempo e uma oscilação até atingirem o regime permanente. O atraso ocorre principalmente devido ao tempo de resposta da microturbina e a oscilação ocorre devido ao baixo coeficiente de inércia da máquina assíncrona, de acordo com a Figura 6.12, esta oscilação chega a apresentar um sobre-sinal próximo de 15 %.

Na Figura 6.13, a velocidade também apresenta uma leve oscilação devido a partida da máquina, a qual é proporcional ao efeito ocorrido nas potências de entrada e saída estabilizando-se em aproximadamente 50 segundos, igualmente. Por se tratar de uma máquina assíncrona, devido a presença do escorregamento, a velocidade simulada da máquina em regime permanente é 1787 rpm, ou seja, diferente dos 1800 rpm equivalente a uma máquina de 4 pólos.

### 6.2.3 Aplicação de um Degrau de Carga na *MTG-SINPER*

O modelo da microturbina com máquina síncrona a imãs permanentes utilizado para a análise dinâmica é mostrado na Figura 6.14. Dentro do bloco Microturbina *GAST*, da Figura 6.14, está inserido o modelo da microturbina apresentado na Figura 4.6. Este modelo também possui a chamada *mask* que permite posicionar e substituir os valores de determinadas variáveis no modelo *MTG-SINPER* permitindo realizar simulações alterando os valores de determinados parâmetros, neste caso, a potência inicial que é considerada 70% do valor da potência nominal da microturbina. Esta análise é realizada em ambiente de *Matlab/Simulink*, configurado com passo de integração variável e método de integração *ode45 (Dormand-Prince)*.

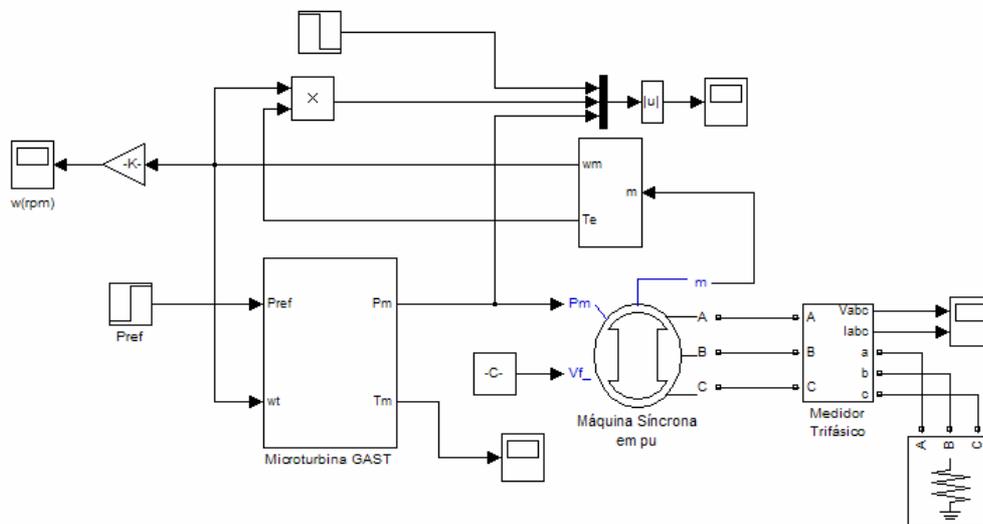


Figura 6.14 – Modelo Dinâmico da *MTG-SINPER*

A análise dinâmica da microturbina com máquina síncrona a imãs permanentes (*MTG-SINPER*) consiste na aplicação de um degrau de 0.7 p.u. para 1 p.u. na potência de referência do sistema modelado na Figura 6.14, onde os parâmetros do modelo são os mesmos apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.5. O incremento de potência ocorre no instante de tempo igual a 1 segundo.

A Figura 6.15 mostra a resposta dinâmica da potência demandada, da potência elétrica de saída e da potência mecânica fornecida pela microturbina a máquina elétrica quando aplicado o degrau de carga e a Figura 6.16 apresenta a resposta da velocidade da máquina síncrona a ímãs permanentes na ocorrência do degrau.

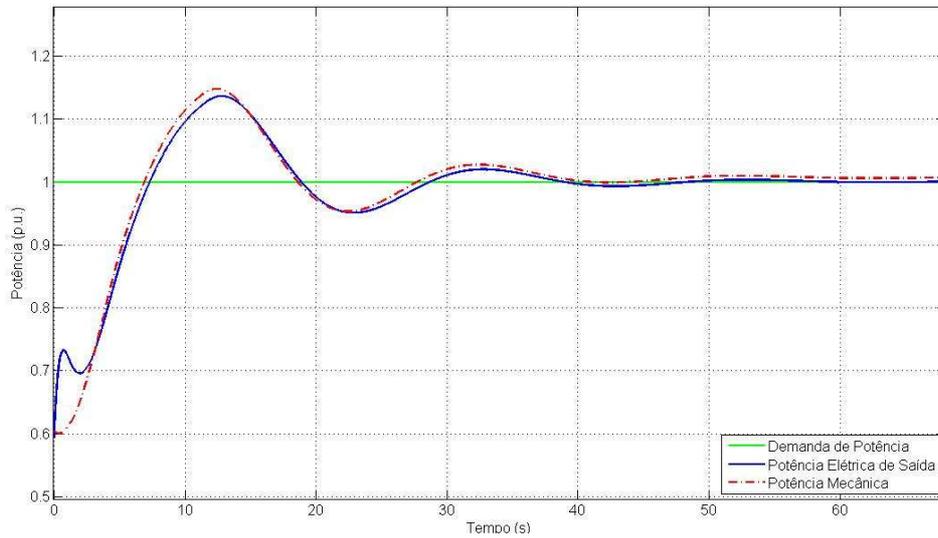


Figura 6.15 – Resposta ao Degrau da *MTG-SINPER*

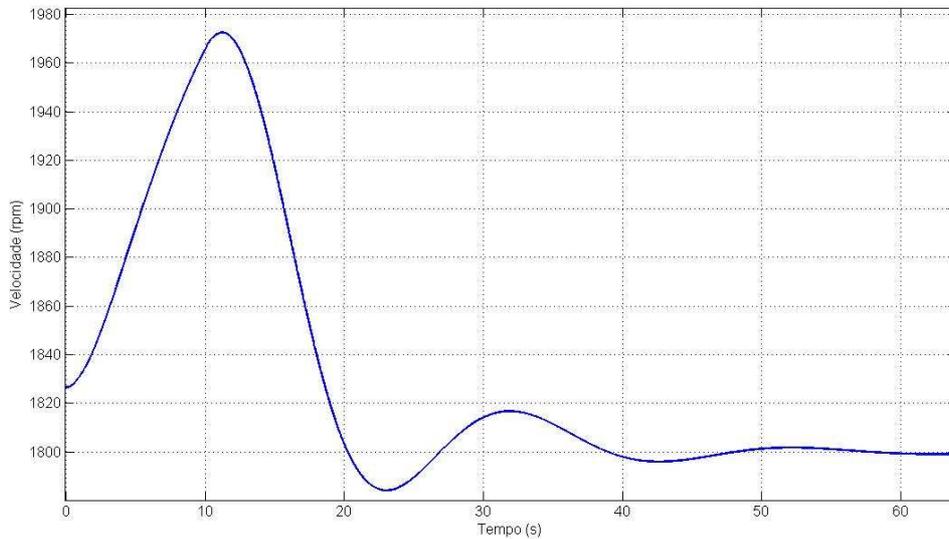


Figura 6.16 – Velocidade da *MTG-SINPER*

Assim como na análise com máquina assíncrona, na Figura 6.15 as potências mecânica e elétrica também apresentam comportamento semelhante e atingem o regime permanente, no mesmo tempo aproximado que a microturbina com máquina assíncrona, em 50 segundos. A diferença entre a potência mecânica e elétrica está relacionada com as perdas da máquina, por

este motivo a potência mecânica é um pouco maior. As duas respostas também apresentam o mesmo atraso e oscilação que a *MTG-ASSIN*, decorrentes do tempo da resposta da microturbina e o baixo coeficiente de inércia, o sobre-sinal, neste caso, é de aproximadamente 15 % também.

A velocidade da máquina síncrona a ímãs permanentes, apresentada na Figura 6.16, apresentou um sobre-sinal e oscilação muito maior que o sobre-sinal e oscilação com máquina assíncrona, a velocidade chegou a atingir quase 2000 rpm, sendo que a velocidade nominal da máquina é 1800 rpm. Por se tratar de uma máquina síncrona, esta atinge a velocidade nominal e estabiliza aproximadamente no mesmo tempo da sua potência, em torno de 50 segundos.

#### **6.2.4 Análise do Incremento de Carga Utilizando Células Combustíveis e Microturbinas a Gás**

Nesta seção colocou-se os dois modelos de microturbina, *MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*, e o grupo de células combustíveis *SOFC* juntos, operando em paralelo, e ligados a uma rede de distribuição, originando a plataforma de simulação dinâmica da Figura 5.2. Nesta análise, é simulado um incremento de carga de 450 kW através do chaveamento da chave *CB*, conforme mostrado na Figura 5.2, após 35 ciclos de operação. O sistema composto pelos modelos *MTG-ASSIN*, *MTG-SINPER* e *SOFC*, tem capacidade de gerar 950 kVA juntos e a rede de distribuição é de 2 MVA e, antes do incremento de carga, o sistema está atendendo uma demanda de 965 kW. O modelo da célula combustível e das microturbinas são os mesmos apresentados nas seções anteriores, porém, todos os modelos foram ajustados para trabalharem com potência nominal desde a partida, não mais estando sujeito ao degrau de carga simulado, como nos itens 6.2.1, 6.2.2 e 6.2.3. Esta análise é realizada em ambiente de *Matlab/Simulink*, configurado com passo de integração fixo, método de integração ode3 (*Bogacki-Shampine*) e tempo de amostragem de 2  $\mu$ s.

As Figuras 6.17 a 6.24 mostram as respostas dinâmicas da potência elétrica trifásica de saída de cada barra do sistema da Figura 5.2, bem como, as respectivas variações de corrente que ocorrem em cada barra.

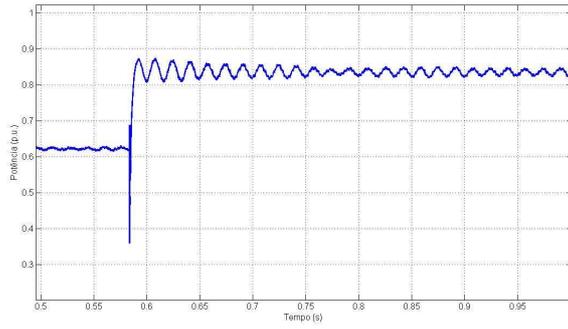


Figura 6.17 – Variação da Potência na Barra 1

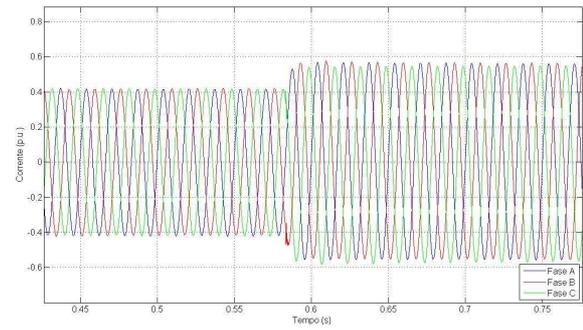


Figura 6.18 – Variação da Corrente na Barra 1

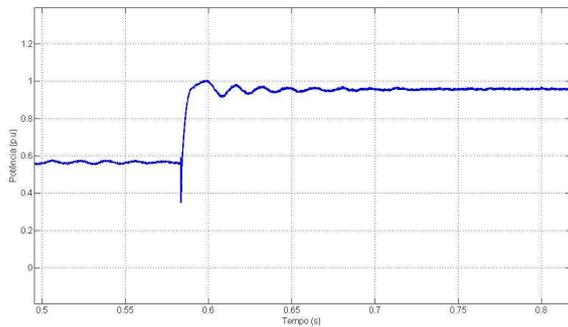


Figura 6.19 – Variação da Potência na Barra 2

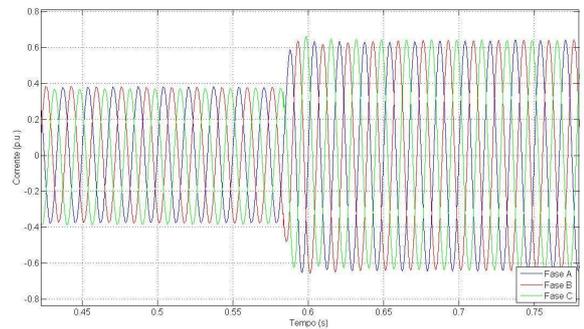


Figura 6.20 – Variação da Corrente na Barra 2

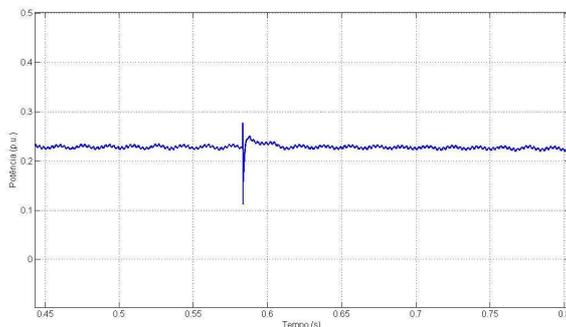


Figura 6.21 – Variação da Potência na Barra 3

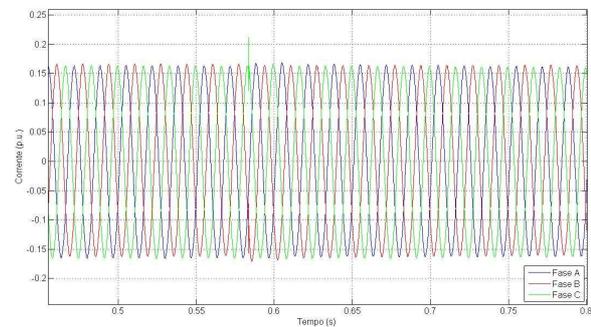


Figura 6.22 – Variação da Corrente na Barra 3

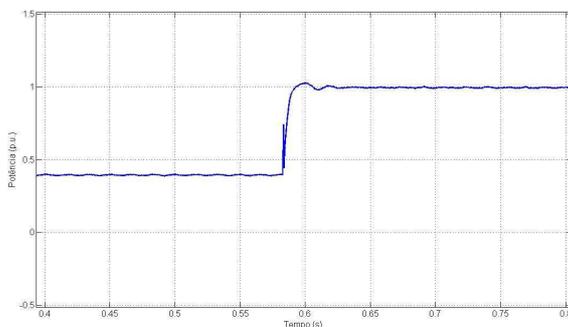


Figura 6.23 – Variação da Potência na Barra 4

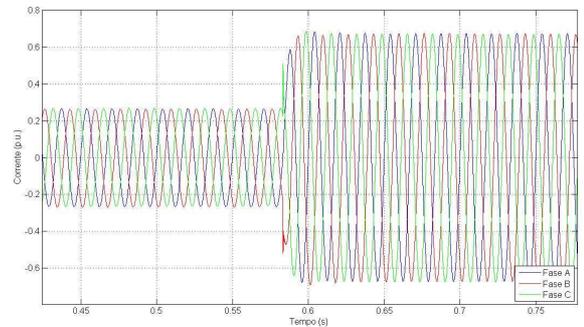


Figura 6.24 – Variação da Corrente na Barra 4

Observa-se claramente, nas Figuras 6.17 a 6.24, a mudança da amplitude, tanto da potência trifásica quanto da corrente, quando simulado o incremento de carga. Como a demanda do sistema aumenta 450 kW o mesmo passa a fornecer maior potência e corrente, por cada fonte, a exceção da fonte *MTG-ASSIN*, onde não ocorreram modificações. Ambas, potência e corrente, das barras 1, 2 e 4 mudam a amplitude e voltam a operar de forma segura e estável após alguns ciclos de operação.

As Figuras 6.21 e 6.22 apresentam as respostas da barra 3, onde está ligada a microturbina com máquina assíncrona, modelo *MTG-ASSIN*. Verifica-se que não ocorre modificação no comportamento das curvas de potência e corrente, logo, o impacto do incremento de carga não é sentido pela máquina assíncrona, que continua fornecendo os mesmos valores de potência fornecidos, por ela, antes do incremento. Observa-se a ocorrência de um distúrbio de milésimos de segundos, que ocorre no instante em que é simulado o incremento de carga, o qual é amortecido rapidamente pela máquina, que retorna ao mesmo estado de operação anterior.

O grupo de células combustíveis é o que mais sente o incremento de carga e oscila por mais tempo que as demais fontes, como pode ser visto na curva de potência da Figura 6.17. Isso acontece, porque a *SOFc* não possui nenhum tipo de amortecimento contra os distúrbios simulados e nenhum sistema de controle que evite a flutuação da tensão, tal como ocorre com as máquinas assíncrona e síncrona a ímãs permanentes. A curva de potência da Figura 6.17 permanece oscilando após o incremento de carga devido as flutuações da tensão causadas pela mudança de carga.

Nas Figuras 6.23 e 6.24, da barra 4, observa-se os resultados de potência e corrente gerado pelo grupo das três fontes de GD, para atender a nova carga imposta ao sistema, tanto a potência quanto a corrente mudam de amplitude, e muito rapidamente passam a operar de forma estável, provando-se, assim, que o sistema pode operar de forma satisfatória, quando simulado um incremento de carga.

### **6.2.5 Avaliação dos Resultados da Análise Dinâmica**

Avaliando-se os resultados obtidos das simulações de incremento de carga conclui-se que, quando as fontes operam de forma isolada, conectadas a uma carga e, sem a presença dos

inversores e conversores, elas apresentam respostas lentas e levam de 30 a 50 segundos para atingirem o regime permanente, quando simulado um incremento de 30 % de potência.

Este estudo dinâmico com as células combustíveis e as microturbinas também foi realizado por [Zhu, 2002], através da análise da operação isolada (*stand-alone*) descrita por ele, onde obteve-se respostas dinâmicas semelhantes. Logo cabe considerar o modelo das fontes de células combustíveis e microturbinas a gás validado em função da sua comparação com as respostas das simulações realizadas por [Zhu, 2002], em seu artigo. Cabe resaltar que [Zhu, 2002] faz os testes dinâmicos em microturbinas apenas com máquina assíncrona, entretanto, espera-se uma resposta dinâmica semelhante para o modelo de microturbina com máquina síncrona a imãs permanentes, como é verificado na seção 6.2.3.

Dos resultados das análises apresentadas na seção 6.2.4, conclui-se que somente as fontes *MTG-SINPER*, *SOFC* e a rede de distribuição fornecem potência à nova carga imposta ao sistema e a *MTG-ASSIN* não muda a amplitude da corrente e potência, devido a baixa capacidade de geração desta fonte, comparada com as demais, e também por ser a máquina que mais amortece os distúrbios simulados. Isto também deve-se ao fato de não haver um controle de repartição de carga implementado.

Uma comparação entre as Figuras 6.12 e 6.15 com as Figuras 6.17 a 6.24, da análise do incremento de potência, mostra um amortecimento muito mais rápido no segundo caso. Isso ocorre devido à utilização dos conversores acoplados aos modelos *MTG-SINPER* e *MTG-ASSIN*, os quais também estão de acordo com resultados apresentados na literatura por [Slootweg, 2002 e Leon, 2001].

## 6.3 Análise Transitória

Para esta análise, são realizadas quatro diferentes simulações. A primeira, considera-se somente o grupo de células combustíveis (*SOFC*) operando com a rede de distribuição e, então, é aplicado um curto-circuito. A segunda análise utiliza somente o grupo de microturbinas a gás com máquina síncrona a imãs permanentes (*MTG-SINPER*). A terceira análise utiliza somente o grupo de microturbinas com máquina assíncrona (*MTG-ASSIN*) conectado a rede de distribuição e, na última análise, as três fontes operam juntas, em paralelo, ligadas à rede. Em todas as análises são simulados um curto-circuito monofásico e um trifásico e são analisados o

comportamento da tensão e corrente durante a ocorrência desses distúrbios. Estas análises são realizadas em ambiente de *Matlab/Simulink*, configurado com passo de integração fixo, método de integração ode3 (*Bogacki-Shampine*) e tempo de amostragem de 2  $\mu$ s.

### 6.3.1 Análise Transitória do Modelo *SOFC*

O esquema da Figura 6.25 é composto pelo grupo de células combustíveis (5 unidades de 100 kVA) operando em regime nominal desde a partida, pelo inversor controlado por tensão, um transformador de 380/13800 V com potência de 500 kVA, uma linha de distribuição de 10 km que representa a distância entre a *SOFC* e a rede de distribuição, as barras que medem a corrente e tensão que circulam por elas, as cargas, os blocos das chaves e o bloco que simula o curto-circuito. A fonte de célula combustível tem capacidade de gerar 500 kVA e a fonte trifásica que representa a rede tem capacidade de 2 MVA. O sistema apresenta uma demanda de 650 kW. O curto-circuito é simulado para ocorrer após 35 ciclos de operação e tem duração de 4 ciclos. Primeiramente, é simulado um curto-circuito monofásico no sistema da Figura 6.25 e as chaves CB1 e CB2 abrem o sistema após 3 ciclos. Então, após a eliminação do curto, a *SOFC* e a rede operam de forma isolada fornecendo energia as cargas ligadas no sistema. A *SOFC* passa a alimentar sozinho uma carga de 350 kW e a rede uma de 300 kW. A mesma análise é feita quando aplicado um curto-circuito trifásico.

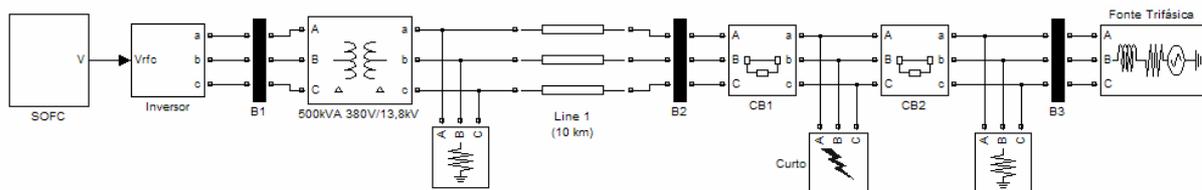


Figura 6.25 – Análise Transitória do Modelo *SOFC*

#### • Aplicação de um Curto-Circuito Monofásico

As Figuras 6.26 a 6.31 mostram as respostas na ocorrência do curto-circuito monofásico no sistema da Figura 6.25.

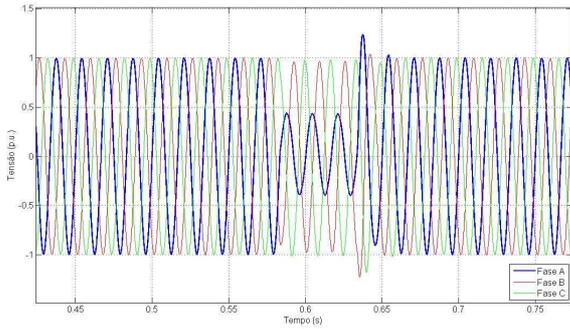


Figura 6.26 – Resposta da Tensão na Barra 1

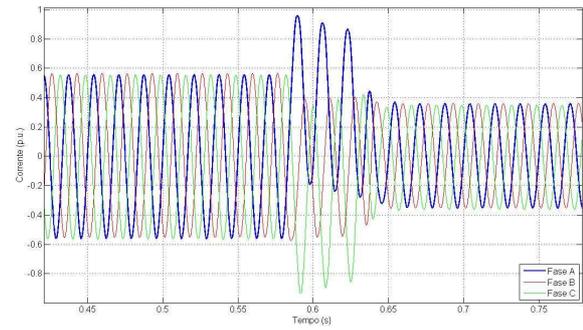


Figura 6.27 – Resposta da Corrente na Barra 1

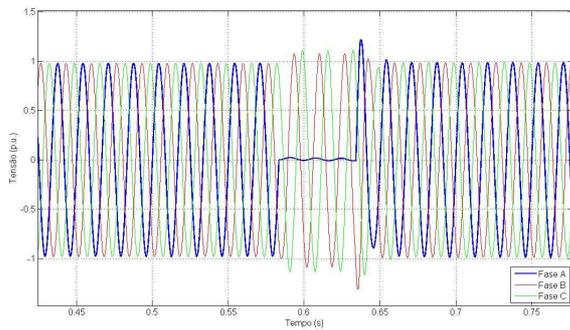


Figura 6.28 – Resposta da Tensão na Barra 2

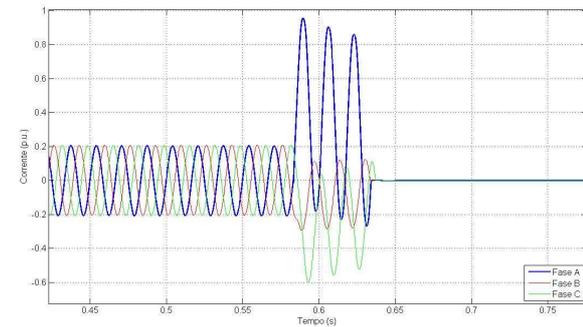


Figura 6.29 – Resposta da Corrente na Barra 2

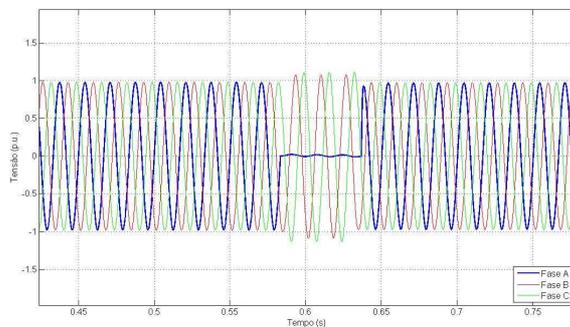


Figura 6.30 – Resposta da Tensão na Barra 3

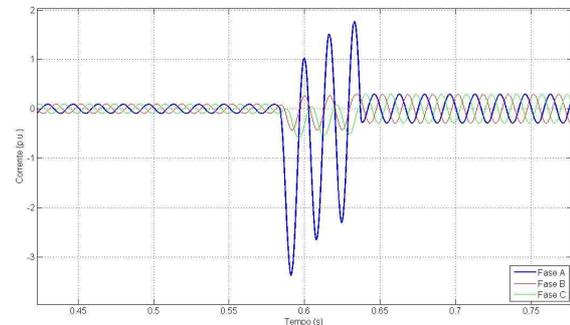


Figura 6.31 – Resposta da Corrente na Barra 3

As curvas de tensão de todas as barras do sistema apresentam comportamento satisfatório. Após a eliminação do curto, as três fases voltam a operar de forma estável e equilibrada, defasadas uma da outra de  $120^\circ$ , porém, com diferentes amplitudes de corrente, comparadas com a amplitude de corrente antes do curto. Isso ocorre, porque antes do curto a *SOFC* alimenta a carga de 300 kW ligada entre as barras 1 e 2 e fornece parte da sua energia para a carga ligada entre as barras 2 e 3 do sistema da Figura 6.25. Após o curto, a *SOFC* fornece energia somente para a carga ligada entre as barras 1 e 2 e, por isso, a amplitude da corrente da

barra 3 aumenta após a eliminação do curto, pois a rede passa a alimentar sozinha a carga ligada entre as barras 2 e 3.

Na análise do curto monofásico, verifica-se que o nível de curto é maior no lado da rede (barra 3) e menor no lado da fonte de GD (barra 1). Na barra 2, verifica-se também que não circula corrente após a eliminação do curto, isso acontece porque a barra 2 está posicionada próxima ao curto, do lado da chave, conforme mostra a Figura 6.25. Então, quando a chave CB1 abre não existe corrente circulando na barra 2, porque não há carga ligada após a barra 2 que exija o fornecimento de energia.

### • Aplicação de um Curto-Circuito Trifásico

As Figuras 6.32 a 6.37 apresentam as respostas de corrente e tensão, na ocorrência de um curto-circuito trifásico no sistema da Figura 6.25.

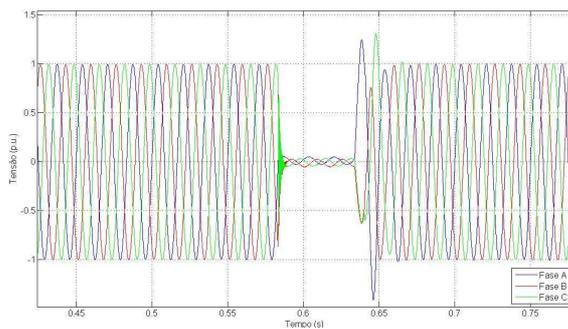


Figura 6.32 – Resposta da Tensão na Barra 1

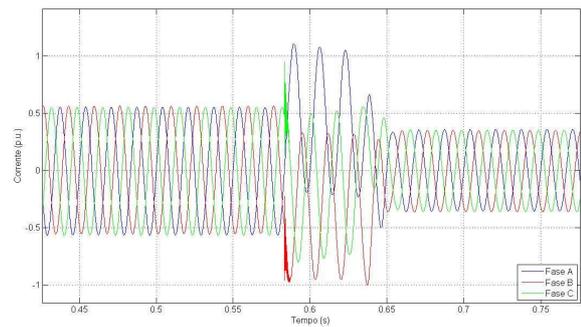


Figura 6.33 – Resposta da Corrente na Barra 1

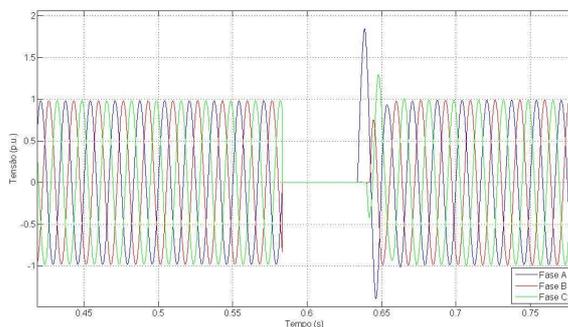


Figura 6.34 – Resposta da Tensão na Barra 2

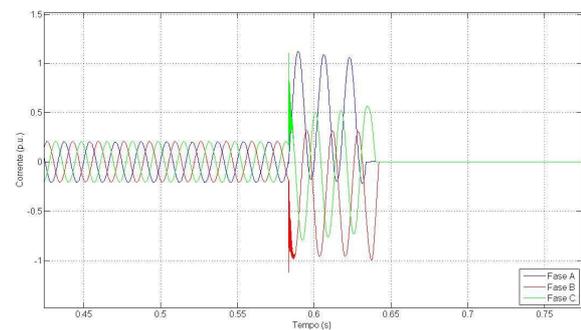


Figura 6.35 – Resposta da Corrente na Barra 2

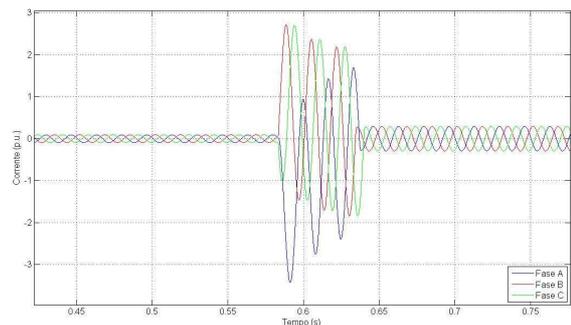
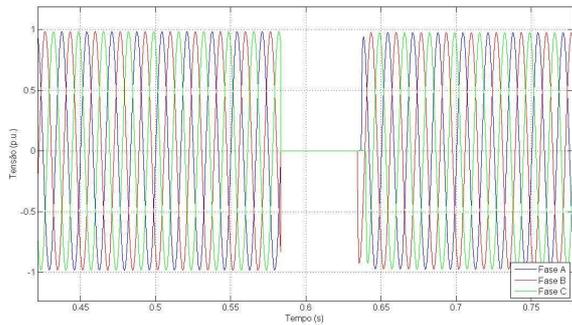


Figura 6.36 – Resposta da Tensão na Barra 3      Figura 6.37 – Resposta da Corrente na Barra 3

A Tabela 6.1 apresenta os valores das correntes antes do curto ( $T_0$ ), o pico do primeiro ciclo após a ocorrência do curto ( $T_0^-$ ), o último pico antes da eliminação do curto ( $T_0^+$ ) e a corrente após a eliminação do curto ( $T_1$ ). Os valores apresentados na Tabela 6.1, são valores medidos na fase A do sistema da Figura 6.25.

<b>1Φ</b>		<b>Barra 1</b>	<b>Barra 2</b>	<b>Barra 3</b>
	<i>Antes (<math>T_0</math>)</i>		0,555 p.u. (843,2A)	0,21 p.u. (8,7A)
<i>Durante (<math>T_0^-</math>)</i>		0,96 p.u. (1458,5A)	0,97 p.u. (40,5A)	3,36 p.u. (140,5A)
<i>Durante (<math>T_0^+</math>)</i>		0,865 p.u. (1314,2A)	0,87 p.u. (36,4A)	2,3 p.u. (96,2A)
<i>Depois (<math>T_1</math>)</i>		0,35 p.u. (531,7A)	0 p.u. (0A)	0,293 p.u. (12,3A)
<b>3Φ</b>	<i>Antes (<math>T_0</math>)</i>	0,555 p.u. (843,2A)	0,21 p.u. (8,7A)	0,09 p.u. (3,7A)
	<i>Durante (<math>T_0^-</math>)</i>	1,11 p.u. (1686,5A)	1,12 p.u. (46,8A)	3,44 p.u. (143,9A)
	<i>Durante (<math>T_0^+</math>)</i>	1,05 p.u. (1595,3A)	1,06 p.u. (44,3A)	2,4 p.u. (100,4A)
	<i>Depois (<math>T_1</math>)</i>	0,35 p.u. (531,7A)	0 p.u. (0A)	0,293 p.u. (12,3A)

Tabela 6.1 – Valores das Correntes de Curto do Sistema SOFC

Nas Figuras 6.32 a 6.37 as curvas de tensão das três fases caem a zero durante o curto e as correntes das três fases aumentam e se defasam. A defasagem das três correntes apresenta soma fasorial igual a zero. As respostas apresentam resultados satisfatórios sendo que o sistema volta a operar de forma estável após a eliminação do curto. O comportamento das correntes antes e depois do curto é o mesmo que o monofásico e também pode ser verificado através dos valores na Tabela 6.1.

O nível das correntes de curto-circuito trifásico, das barras 1 e 2, apresentam amplitudes um pouco maiores que as do curto monofásico e são mais sustentadas, ou seja, decaem menos que as do curto monofásico, durante os 3 ciclos. A corrente sustentada e a mais amortecida podem ser verificadas através dos valores da Tabela 6.1 onde, quanto menor for a diferença entre  $T_0^-$  e  $T_0^+$ , mais a corrente é sustentada e, do contrário, é menos sustentada.

Na barra 3, a corrente de curto trifásico também apresenta nível de curto maior que o das barras 1 e 2 e também um pouco maior que o nível da corrente de curto monofásico da barra 3. Isto ocorre porque a capacidade de curto do lado da rede é maior.

### 6.3.2 Análise Transitória do Modelo *MTG-SINPER*

O esquema da Figura 6.38 é composto pela microturbina com máquina síncrona a ímãs permanentes operando em regime nominal desde a partida, pelo conversor CA/CC/CA controlado por tensão, um transformador de 380/13800 V com potência de 300 kVA, uma linha de distribuição de 10 km que representa a distância entre a fonte e a rede de distribuição, as barras que medem a corrente e tensão que circulam por elas, as cargas, os blocos das chaves e o bloco que simula o curto-circuito. O modelo *MTG-SINPER* tem capacidade de gerar 300 kVA e a fonte que representa a rede tem capacidade de 2 MVA. O sistema apresenta uma demanda de 510 kW. O curto-circuito é simulado para ocorrer após 35 ciclos de operação e tem duração de 4 ciclos. Primeiramente, é simulado um curto-circuito monofásico no sistema da Figura 6.38 e as chaves CB1 e CB2 abrem o sistema após 3 ciclos. Então, após a eliminação do curto, a *MTG-SINPER* e a rede operam de forma isolada fornecendo energia as cargas ligadas no sistema. A *MTG-SINPER* passa a alimentar uma carga de 210 kW e a rede uma de 300 kW. A mesma análise é feita quando aplicado um curto-circuito trifásico.

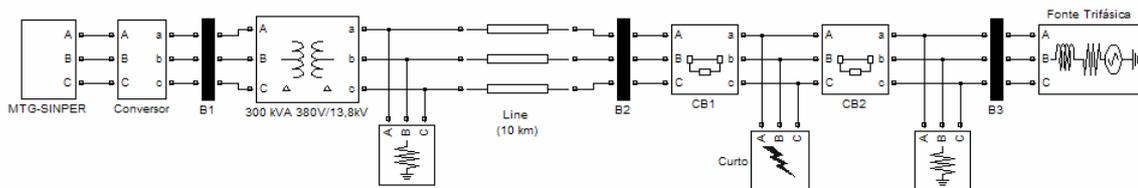


Figura 6.38 – Análise Transitória do Modelo *MTG-SINPER*

- **Aplicação de um Curto-Circuito Monofásico**

As Figuras 6.39 a 6.44 mostram as respostas na ocorrência do curto-circuito monofásico no sistema da Figura 6.38.

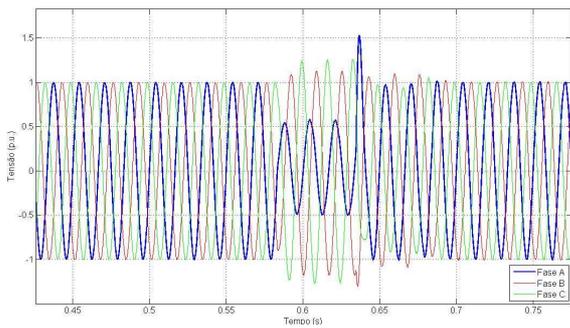


Figura 6.39 – Resposta da Tensão na Barra 1

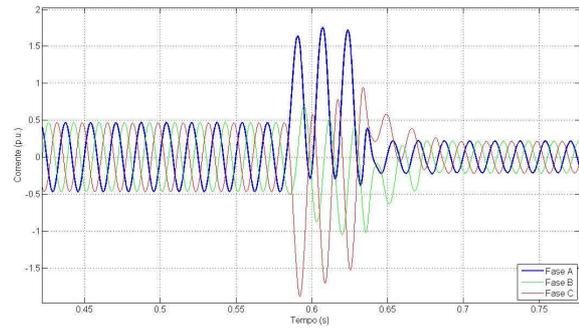


Figura 6.40 – Resposta da Corrente na Barra 1

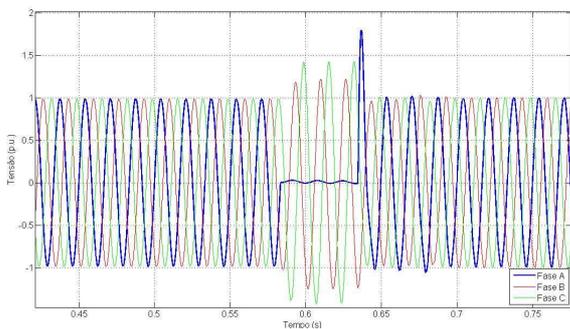


Figura 6.41 – Resposta da Tensão na Barra 2

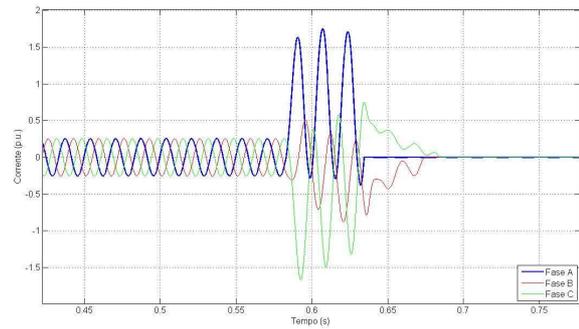


Figura 6.42 – Resposta da Corrente na Barra 2

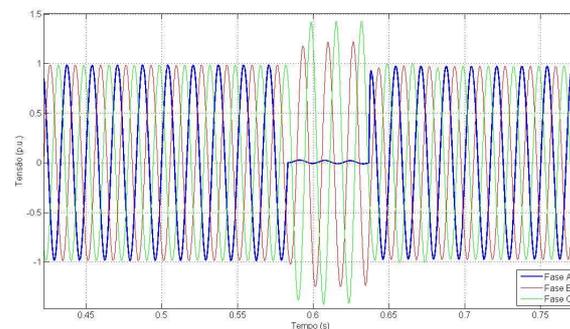


Figura 6.43 – Resposta da Tensão na Barra 3

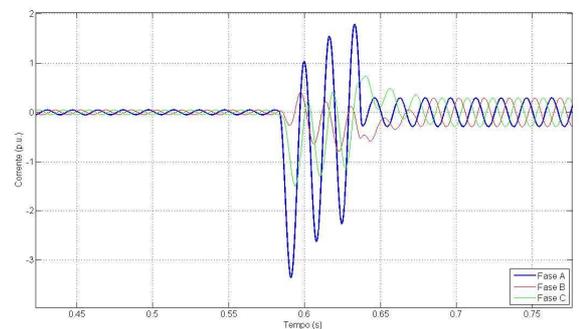


Figura 6.44 – Resposta da Corrente na Barra 3

As curvas de tensão de todas as barras do sistema, assim como as células combustíveis, também apresentam comportamento satisfatório, sendo que a corrente da fase que sofreu o curto aumenta e a sua tensão diminui. Após a eliminação do curto, as três fases voltam a operar de forma estável e equilibrada, defasadas uma da outra de  $120^\circ$ , com níveis de corrente de acordo com a nova demanda do sistema na forma isolada. A diferença das curvas de curto-circuito monofásico das células combustíveis, comparadas com as do modelo *MTG-SINPER*, estão relacionadas ao nível de curto-circuito, sendo maiores no caso da *MTG-SINPER*, conforme também pode ser verificado nas Tabelas 6.1 e 6.2.

• **Aplicação de um Curto-Circuito Trifásico**

As Figuras 6.45 a 6.50 apresentam as respostas de corrente e tensão, na ocorrência de um curto-circuito trifásico no sistema da Figura 6.38.

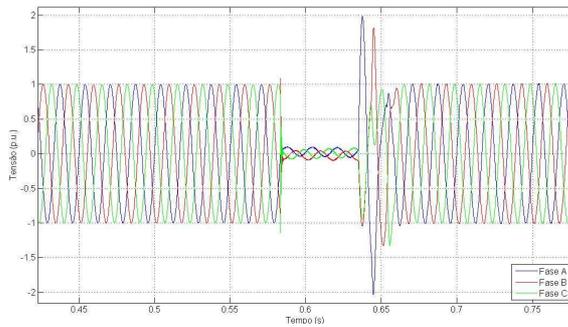


Figura 6.45 – Resposta da Tensão na Barra 1

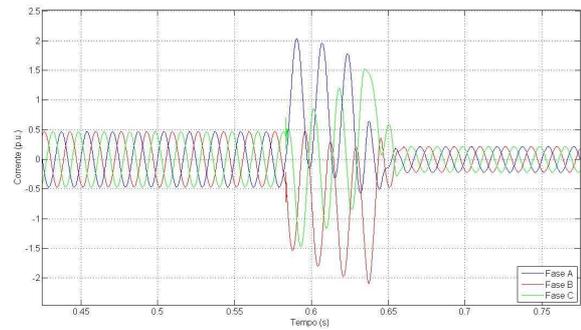


Figura 6.46 – Resposta da Corrente na Barra 1

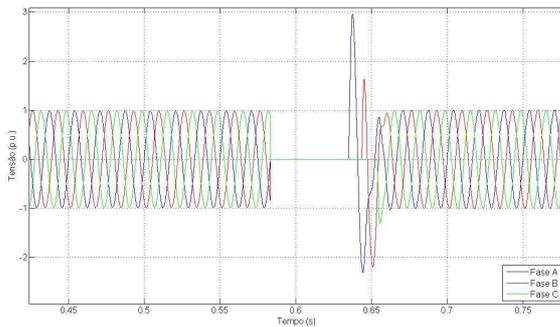


Figura 6.47 – Resposta da Tensão na Barra 2

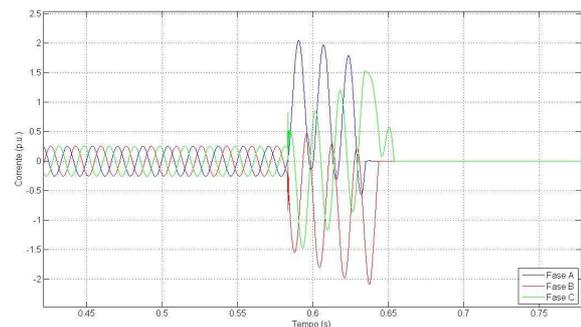


Figura 6.48 – Resposta da Corrente na Barra 2

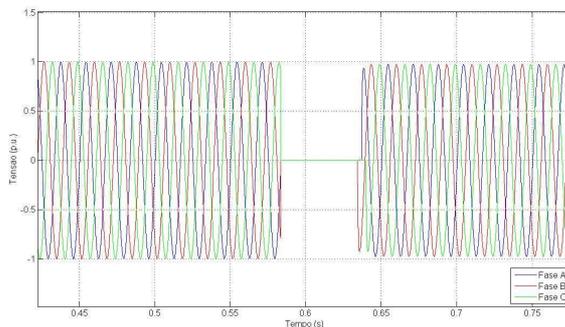


Figura 6.49 – Resposta da Tensão na Barra 3

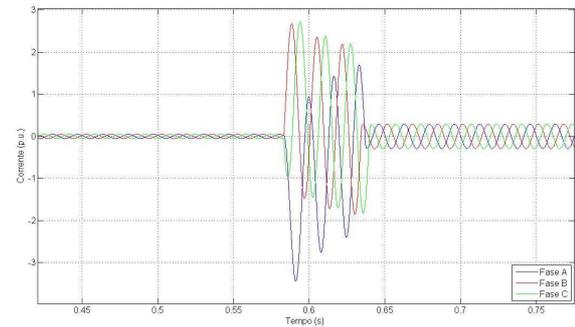


Figura 6.50 – Resposta da Corrente na Barra 3

A Tabela 6.2 apresenta os valores das correntes antes do curto ( $T_0$ ), o pico do primeiro ciclo após a ocorrência do curto ( $T_0^+$ ) e a

corrente após a eliminação do curto ( $T1$ ). Os valores apresentados na Tabela 6.1, são valores medidos na fase A do sistema da Figura 6.38.

$1\Phi$		<b>Barra 1</b>	<b>Barra 2</b>	<b>Barra 3</b>
	<i>Antes (<math>T0</math>)</i>		0,47 p.u. (714A)	0,255 p.u. (10,6A)
<i>Durante (<math>T0^+</math>)</i>		1,64 p.u. (2491,7A)	1,65 p.u. (69,0A)	3,36 p.u. (140,5A)
<i>Durante (<math>T0^+</math>)</i>		1,72 p.u. (2613,2A)	1,73 p.u. (72,4A)	2,27 p.u. (94,9A)
<i>Depois (<math>T1</math>)</i>		0,22 p.u. (334,2A)	0 p.u. (0A)	0,293 p.u. (12,2A)
$3\Phi$	<i>Antes (<math>T0</math>)</i>	0,47 p.u. (714A)	0,255 p.u. (10,6A)	0,05 p.u. (2,1A)
	<i>Durante (<math>T0^+</math>)</i>	2,03 p.u. (3084,2A)	2,05 p.u. (85,7A)	3,44 p.u. (143,9A)
	<i>Durante (<math>T0^+</math>)</i>	1,78 p.u. (2704,4A)	1,79 p.u. (74,8A)	2,4 p.u. (100,4A)
	<i>Depois (<math>T1</math>)</i>	0,22 p.u. (334,2A)	0 p.u. (0A)	0,293 p.u. (12,2A)

Tabela 6.2 – Valores das Correntes de Curto do Sistema *MTG-SINPER*

Da mesma forma comparativa da análise do curto monofásico entre a *SOFC* e a *MTG-SINPER*, os curtos trifásicos apresentam curvas semelhantes as do modelo *SOFC*, porém, com níveis de curto-circuito maiores (praticamente o dobro) nas barras onde as fontes são ligadas, como também verificado nas curvas do curto monofásico. A barra 3 apresenta os mesmos níveis de curto-circuito, tanto no modelo *SOFC*, quanto no *MTG-SINPER*, devido a capacidade de curto da rede ser a mesma. Através da Tabela 6.2, verifica-se que as correntes de curto monofásico são mais sustentadas que as do curto trifásico, durante a ocorrência dos curtos, ao contrário do que ocorre com a *SOFC* e, os níveis de corrente antes e depois do curto são os mesmos para a análise do curto trifásico e monofásico.

### 6.3.3 Análise Transitória do Modelo *MTG-ASSIN*

O esquema da Figura 6.51 é composto pela microturbina a gás com máquina assíncrona operando em regime nominal desde a partida, pelo conversor CA/CC/CA controlado por tensão, um transformador de 380/13800 V com potência de 150 kVA, uma linha de distribuição de 10 km que representa a distância entre a fonte e a rede de distribuição, as barras que medem a corrente e tensão que circulam por elas, as cargas, os blocos das chaves e o bloco que simula o curto-circuito. O modelo *MTG-ASSIN* tem capacidade de gerar 150 kVA e a fonte que representa a rede tem capacidade de 2 MVA. O sistema apresenta uma demanda de 405 kW. O curto circuito é simulado para ocorrer após 35 ciclos de operação e tem duração de 4 ciclos. Primeiramente, é simulado um curto-circuito monofásico no sistema da Figura 6.51 e as chaves CB1 e CB2 abrem o sistema após 3 ciclos. Então, após a eliminação do curto, a *MTG-ASSIN* e a rede operam de forma isolada, fornecendo energia às cargas ligada no sistema. A *MTG-ASSIN* passa a alimentar

uma carga de 105 kW e a rede uma de 300 kW. A mesma análise é feita quando aplicado um curto-circuito trifásico.

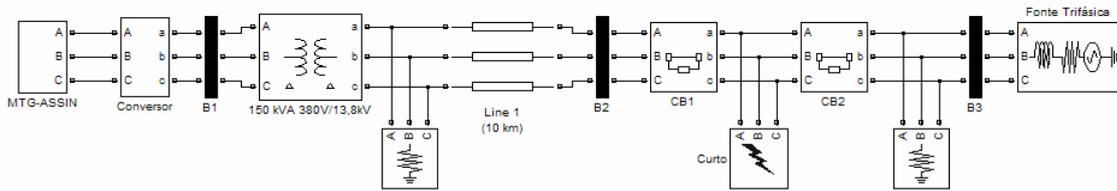


Figura 6.51 – Análise Transitória do Modelo *MTG-ASSIN*

• **Aplicação de um Curto-Circuito Monofásico**

As Figuras 6.52 a 6.57 mostram as respostas na ocorrência do curto-circuito monofásico no sistema da Figura 6.51.

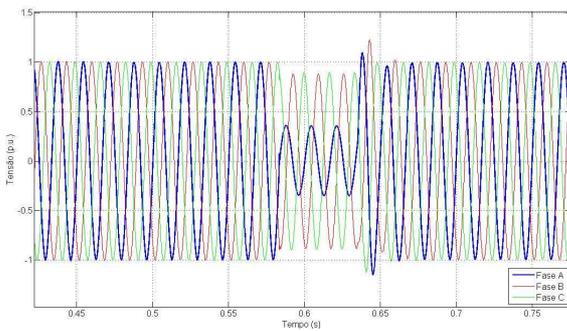


Figura 6.52 – Resposta da Tensão na Barra 1

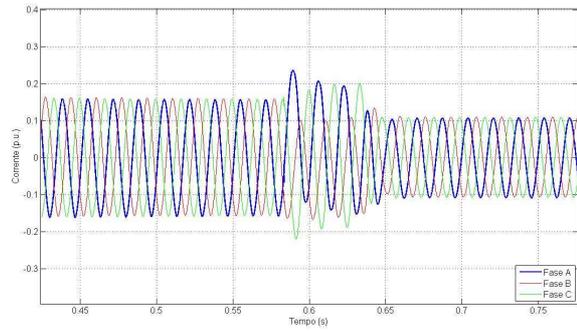


Figura 6.53 – Resposta da Corrente na Barra 1

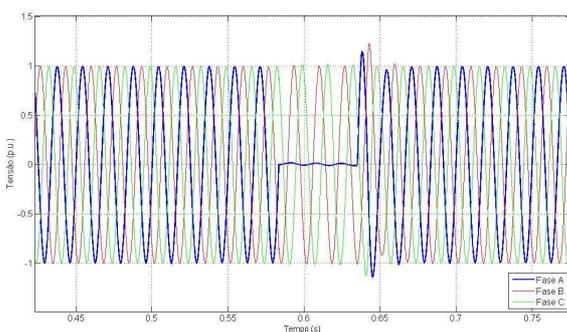


Figura 6.54 – Resposta da Tensão na Barra 2

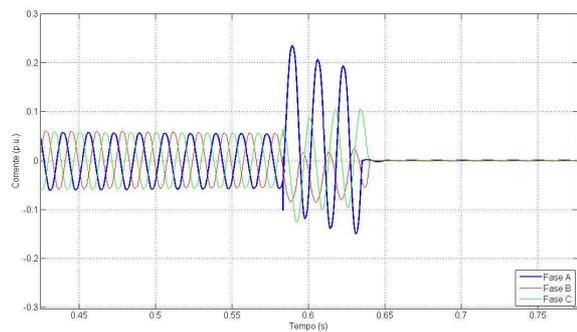


Figura 6.55 – Resposta da Corrente na Barra 2

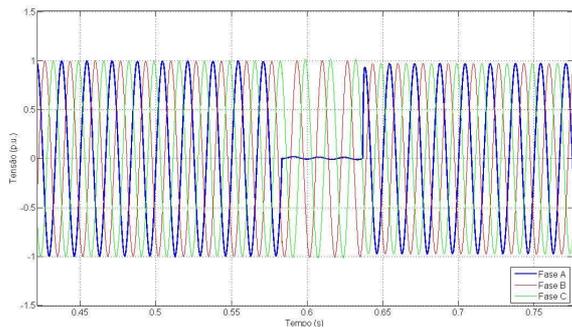


Figura 6.56 – Resposta da Tensão na Barra 3

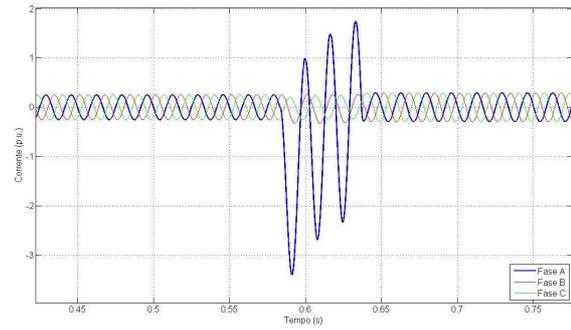


Figura 6.57 – Resposta da Corrente na Barra 3

Diferente das análises de curto-circuito monofásico em 6.3.1 e 6.3.2, no caso onde é utilizado máquina assíncrona como gerador, as correntes de curto das barras 1 e 2, das Figuras 6.53 e 6.55, apresentam níveis bem mais baixos de curto-circuito que os das curvas de corrente de curto-circuito monofásico dos sistemas *SOFC* e *MTG-SINPER*. De fato, a máquina assíncrona não tem condições de manter a corrente de curto sustentada como os modelos *SOFC* e *MTG-SINPER*. Após a eliminação do curto o sistema opera satisfatoriamente com novos níveis de corrente que surgem da modificação no carregamento do sistema, onde a fonte *MTG-ASSIN* e a rede operam de forma isolada.

### • Aplicação de um Curto-Circuito Trifásico

As Figuras 6.58 a 6.63 apresentam as respostas de corrente e tensão, na ocorrência de um curto-circuito trifásico no sistema da Figura 6.51.

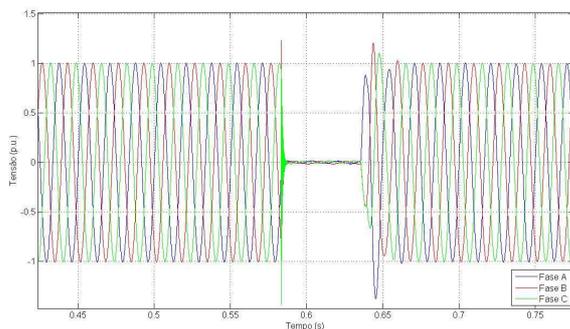


Figura 6.58 – Resposta da Tensão na Barra 1

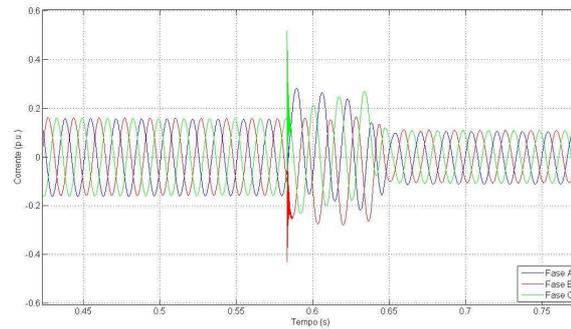


Figura 6.59 – Resposta da Corrente na Barra 1

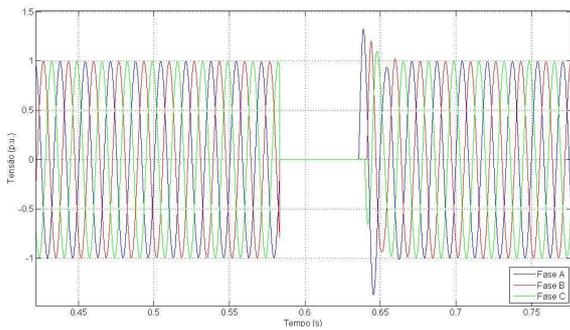


Figura 6.60 – Resposta da Tensão na Barra 2

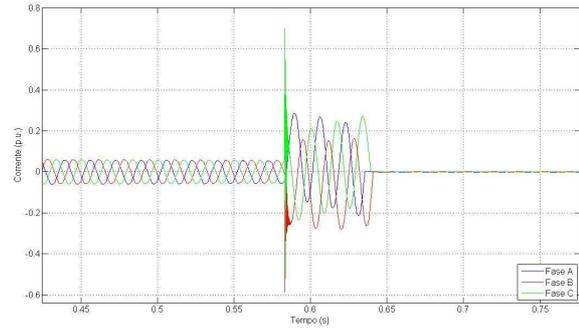


Figura 6.61 – Resposta da Corrente na Barra 2

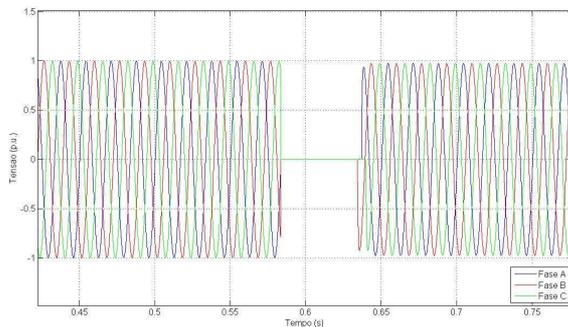


Figura 6.62 – Resposta da Tensão na Barra 3

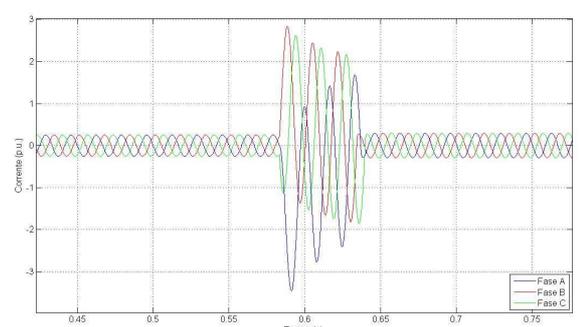


Figura 6.63 – Resposta da Corrente na Barra 3

A Tabela 6.3 apresenta os valores das correntes antes do curto ( $T_0$ ), o pico do primeiro ciclo após a ocorrência do curto ( $T_0'$ ), o último pico antes da eliminação do curto ( $T_0^+$ ) e a corrente após a eliminação do curto ( $T_1$ ). Os valores apresentados na Tabela 6.1, são valores medidos na fase A do sistema da Figura 6.51.

$1\Phi$		<b>Barra 1</b>	<b>Barra 2</b>	<b>Barra 3</b>
	<b>Antes (<math>T_0</math>)</b>		0,16 p.u. (243,1A)	0,055 p.u. (2,3A)
<b>Durante (<math>T_0'</math>)</b>		0,236 p.u. (358,56A)	0,236 p.u. (9,8A)	3,41 p.u. (142,6A)
<b>Durante (<math>T_0^+</math>)</b>		0,19 p.u. (288,6A)	0,20 p.u. (8,3A)	2,33 p.u. (97,4A)
<b>Depois (<math>T_1</math>)</b>		0,108 p.u. (4,5A)	0 p.u. (0A)	0,29 p.u. (12,13A)
$3\Phi$	<b>Antes (<math>T_0</math>)</b>	0,16 p.u. (243,1A)	0,055 p.u. (2,3A)	0,255 p.u. (10,6A)
	<b>Durante (<math>T_0'</math>)</b>	0,28 p.u. (425,4A)	0,28 p.u. (11,7A)	3,46 p.u. (144,7A)
	<b>Durante (<math>T_0^+</math>)</b>	0,239 p.u. (363,1A)	0,242 p.u. (10,1 A)	2,40 p.u. (100,4A)
	<b>Depois (<math>T_1</math>)</b>	0,108 p.u. (4,5A)	0 p.u. (0A)	0,29 p.u. (12,13A)

Tabela 6.3 – Valores das Correntes de Curto do Sistema MTG-ASSIN

Da mesma forma de comportamento das correntes de curto-monofásico, comportam-se as correntes de curto trifásico, também com baixos níveis de curto-circuito trifásico, comparado com as demais fontes e amortecidos pela máquina assíncrona. Novamente o nível de curto-

circuito da barra 3 é equivalente aos das duas análises anteriores, isto se deve a capacidade de curto-circuito da rede de distribuição.

Também de acordo com as análises anteriores, as correntes de curto trifásico apresentam níveis maiores que as correntes de curto monofásico e, nesta situação, as correntes trifásicas e monofásicas apresentam, praticamente, a mesma diferença entre  $T0^-$  e  $T0^+$ .

### 6.3.4 Análise Transitória com Células Combustíveis e Microturbinas a Gás

Na análise transitória, considerando o grupo de células combustíveis e os dois de microturbinas a gás (*MTG-ASSIN* e *MTG-SINPER*) é analisado a resposta da variação da corrente de cada barra do sistema apresentado na Figura 5.3. A fonte de célula combustível tem capacidade de gerar 500 kVA, o modelo *MTG-ASSIN* e o modelo *MTG-SINPER* geram juntos 450 kVA e a fonte que representa a rede tem capacidade de 2 MVA. O sistema apresenta uma demanda de 1,07 MW. O curto-circuito é simulado para ocorrer após 30 ciclos de operação e tem duração de 4 ciclos. Primeiramente, é simulado um curto-circuito monofásico no sistema da Figura 5.3 e as chaves CB1 e CB2 abrem o sistema após 3 ciclos. Então, após a eliminação do curto, o sistema composto pelas três fontes, em paralelo, passa a operar de forma isolada da rede de distribuição. Assim o sistema composto pelas três fontes de GD gera energia para atender uma demanda de 770 kW e a rede uma demanda de 300 kW. A mesma análise é feita quando aplicado um curto-circuito trifásico.

- **Aplicação de um Curto-Circuito Monofásico**

As Figuras 6.64 a 6.68 mostram as respostas na ocorrência do curto-circuito monofásico no sistema da Figura 5.3.

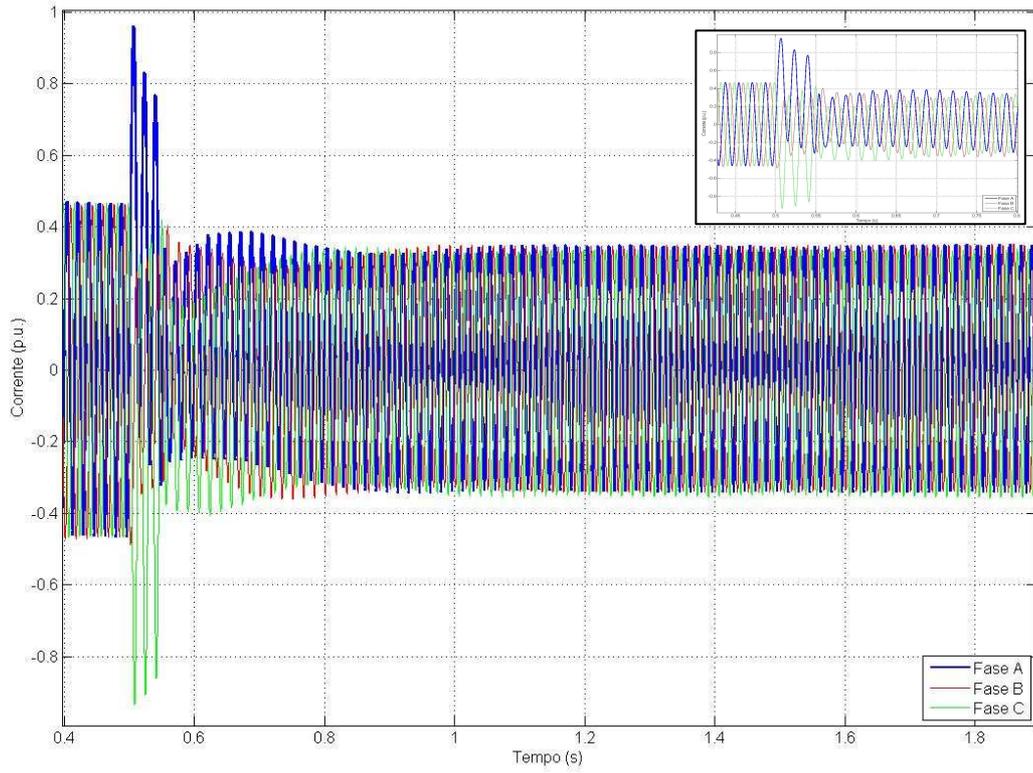


Figura 6.64 – Resposta da Corrente na Barra 1

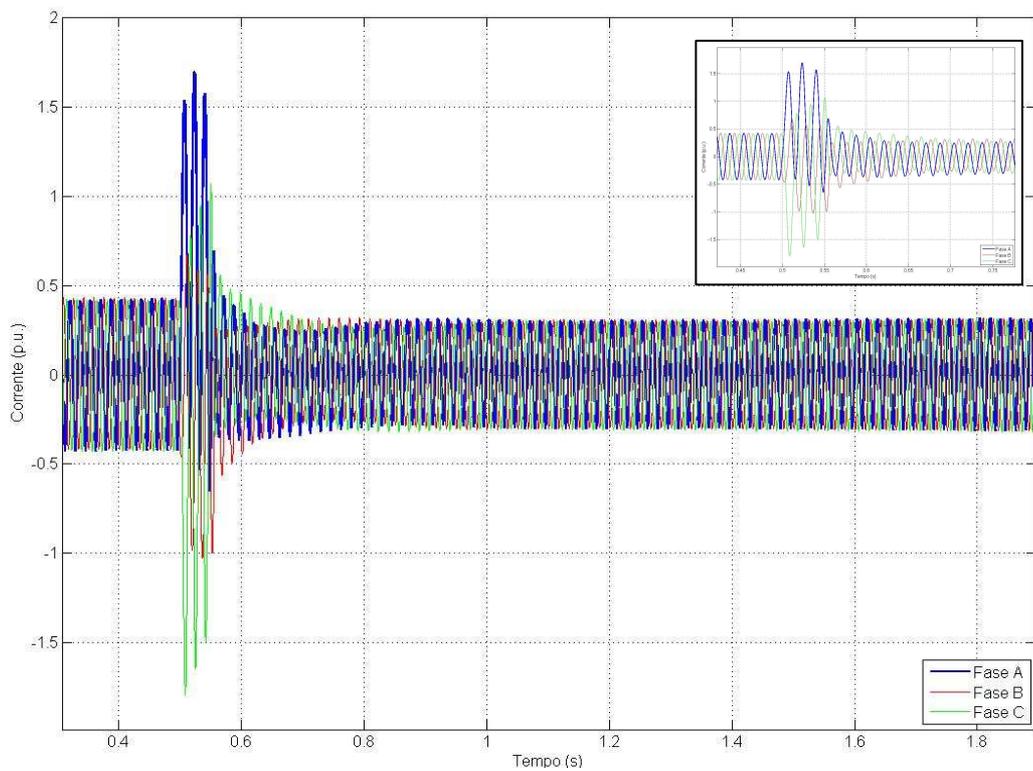


Figura 6.65 – Resposta da Corrente na Barra 2

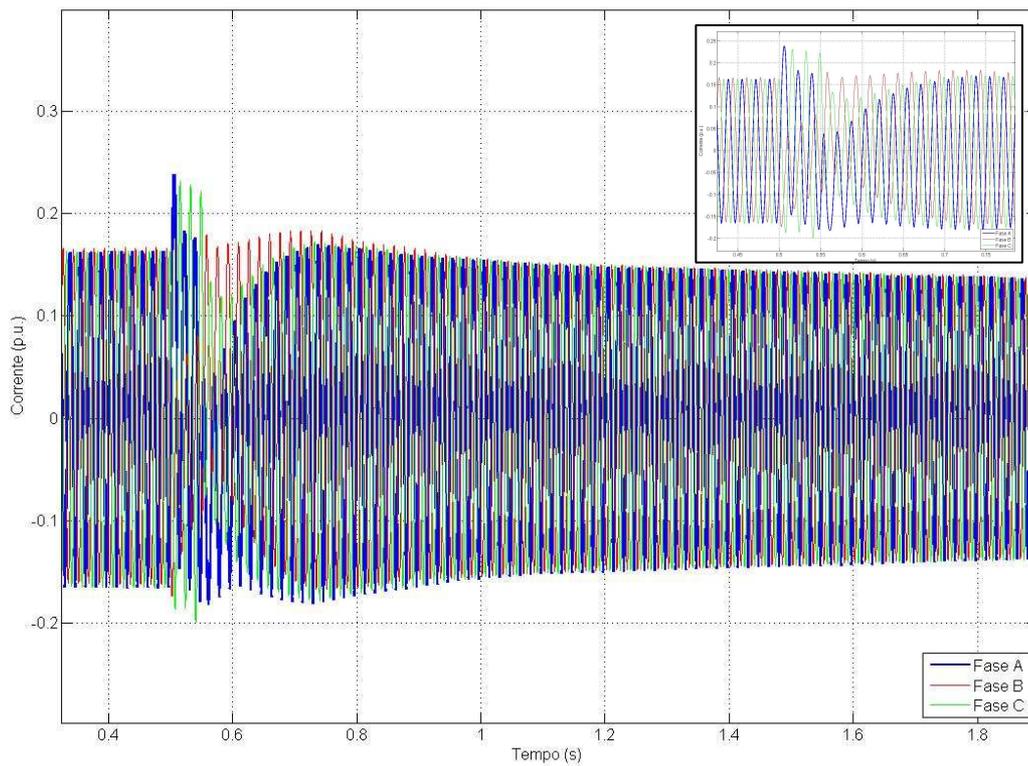


Figura 6.66 – Resposta da Corrente na Barra 3

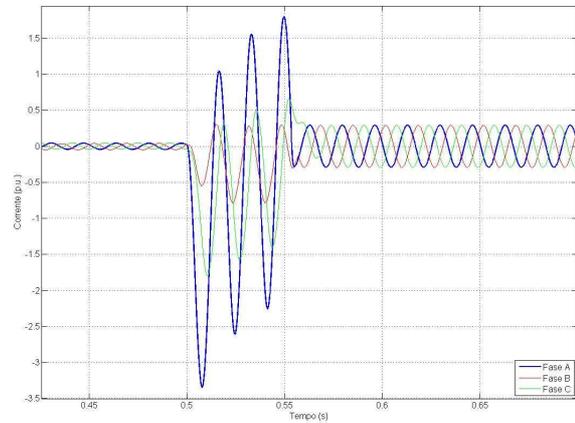
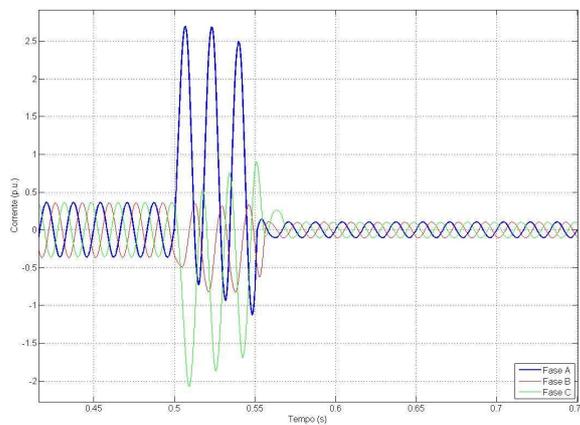


Figura 6.67 – Resposta da Corrente na Barra 4    Figura 6.68 – Resposta da Corrente na Barra 5

Assim como afirmado na análise individual da operação de cada tipo de fonte conectada a rede de distribuição, na análise da operação das três fontes juntas, na ocorrência de um curto-circuito monofásico, o comportamento das correntes é semelhante, sendo que o impacto maior é sentido pela *MTG-SINPER*, seguido da *SOFC*, que apresentam os maiores níveis de curto-circuito. Do contrário, como também analisado em 6.3.3, o impacto das correntes de curto na

barra 3, do modelo *MTG-ASSIN*, é bem menor. Assim, confirmam-se os resultados das análises individuais. Observa-se, neste caso que, após a eliminação do curto, as correntes permanecem oscilando por alguns ciclos até entrarem em sincronismo. Verifica-se também que a corrente de curto dos modelos *MTG-SINPER* e *SOFC* é sustentada durante a ocorrência dos 3 ciclos do curto e a corrente do modelo *MTG-ASSIN* não é sustentada ao longo dos ciclos do curto.

Diferente das análises individuais, as curvas de corrente das barras 1, 2 e 3 são plotadas com maior tempo de simulação. Isto foi feito porque a corrente na barra 3 cai ao longo dos ciclos enquanto que a corrente das barras 1 e 2 crescem muito lentamente. Este efeito ocorre devido a ausência de um sistema que controle do despacho de potência de cada fonte. Assim, logo após o curto, o modelo *MTG-ASSIN* fornece mais corrente que os modelos *MTG-SINPER* e *SOFC* e, ao longo do tempo, as correntes de cada fonte assumem um determinado valor, mesmo sem um sistema de controle, e passam a operar em regime permanente e de forma estável. O sincronismo ocorre após 3 segundos de operação.

- **Aplicação de um Curto-Circuito Trifásico**

As Figuras 6.69 a 6.73 apresentam as respostas de corrente, na ocorrência de um curto-circuito trifásico no sistema da Figura 5.3.

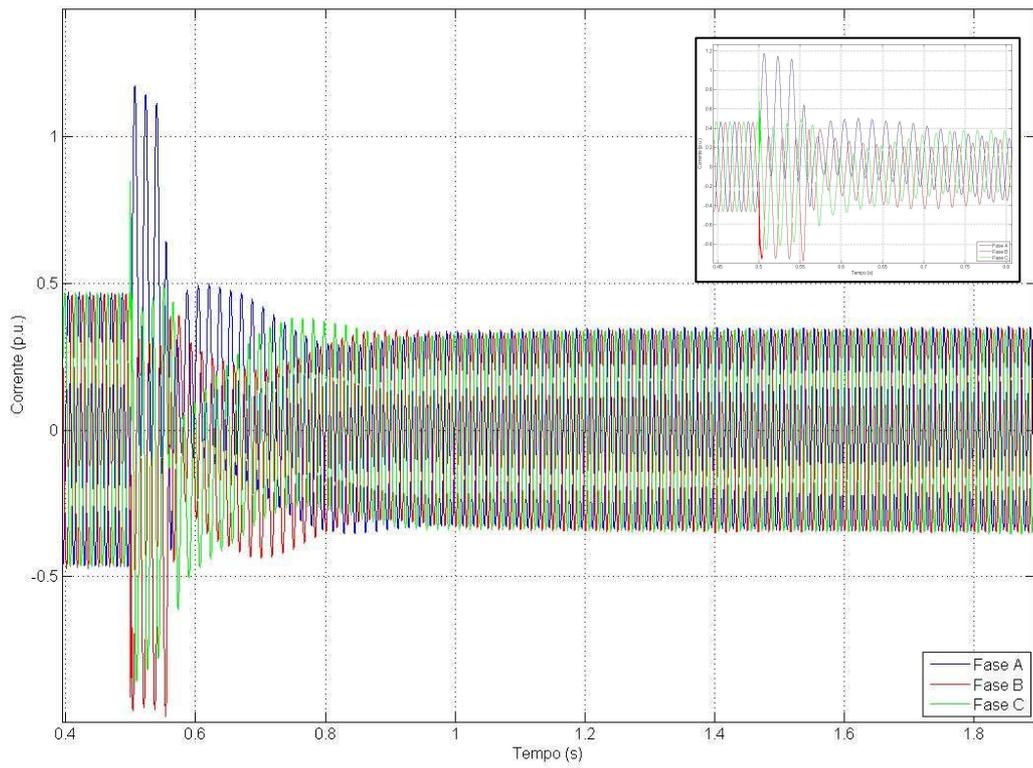


Figura 6.69 – Resposta da Corrente na Barra 1

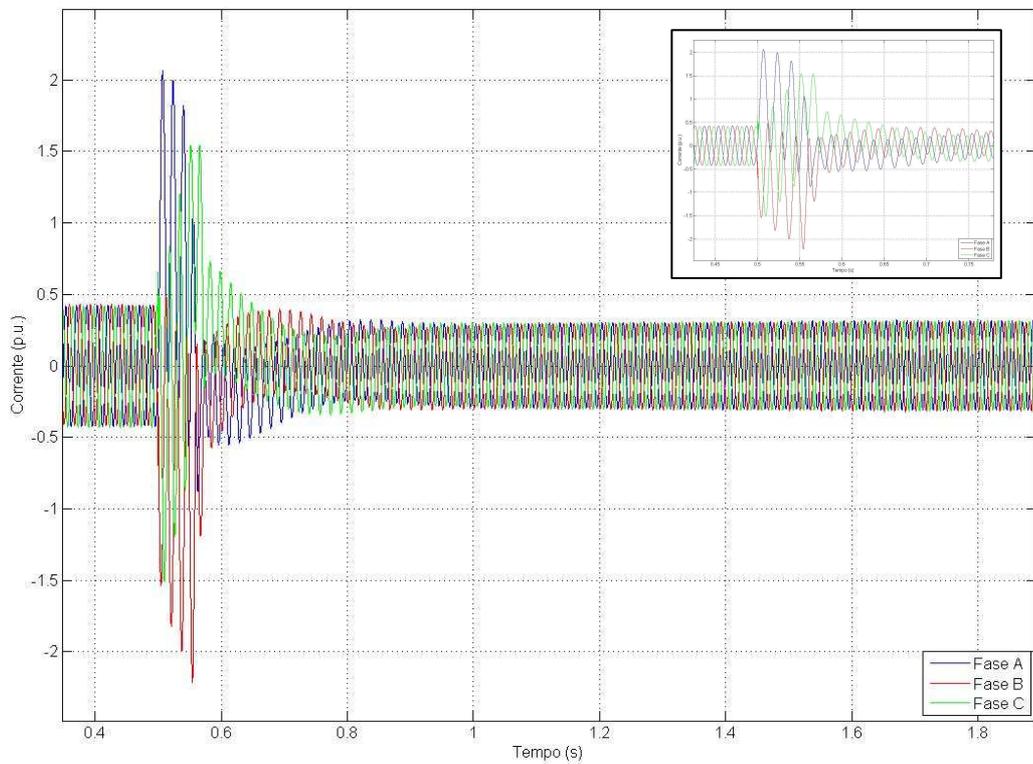


Figura 6.70 – Resposta da Corrente na Barra 2

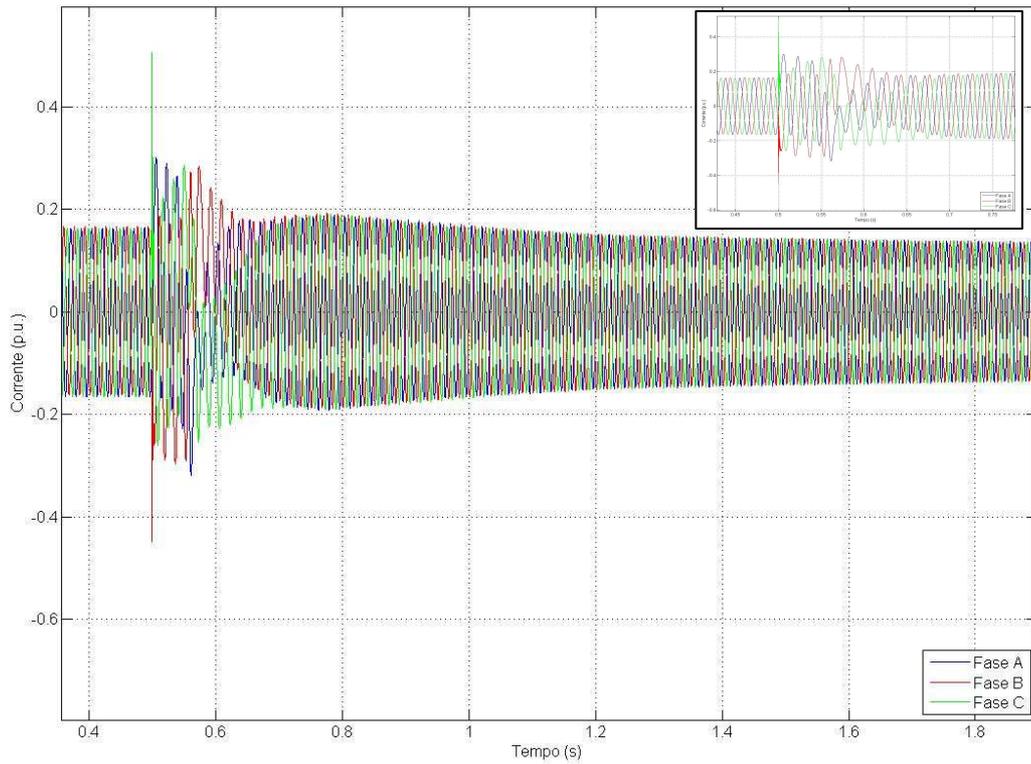


Figura 6.71 – Resposta da Corrente na Barra 3

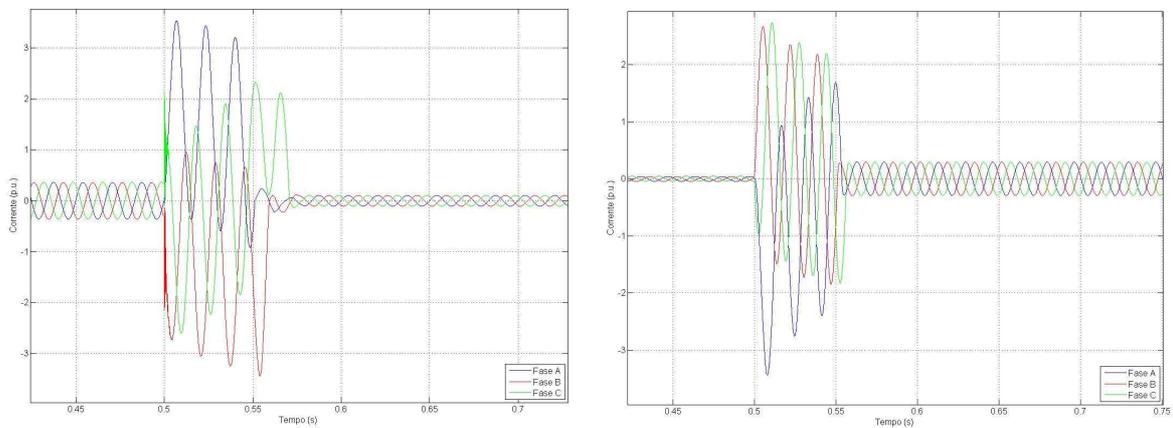


Figura 6.72 – Resposta da Corrente na Barra 4    Figura 6.73 – Resposta da Corrente na Barra 5

Respostas semelhantes a das correntes de curto-monofásico, ocorreram quando simulado o curto trifásico no mesmo sistema da Figura 5.3. Porém, observa-se que o sistema permanece oscilando por mais tempo após a eliminação do curto-circuito, durante o curto trifásico, comparado com o monofásico.

Da mesma forma que concluído na análise do curto monofásico, a corrente da barra 3, onde está ligado o modelo *MTG-ASSIN*, cai ao longo do tempo enquanto a corrente das barras 1 e 2 crescem lentamente até atingirem o regime. Isso acontece em função de não haver um controle que realize a distribuição de cargas. Instantaneamente, a *MTG-ASSIN* fornece mais corrente às cargas e no decorrer do tempo as demais fontes assumem uma parcela fixa de corrente, colocando o sistema em sincronismo após 3 segundos de operação. Novamente os maiores níveis de curto-circuito são apresentados pelo modelo *MTG-SINPER*.

Avaliando-se a barra 4, verifica-se que o nível de curto circuito trifásico é maior que o da barra 5. A corrente de curto da barra 5 está relacionada com a capacidade de curto da rede de distribuição e, sendo menor que a corrente da barra 4, conclui-se que a utilização das três fontes de GD aumenta os níveis de curto-circuito do sistema, pois a barra 4 representa a soma das correntes de curto de cada fonte operando em paralelo.

A Tabela 6.4 apresenta os valores das correntes antes do curto ( $T_0$ ), o pico do primeiro ciclo após a ocorrência do curto ( $T_0'$ ), o último pico antes da eliminação do curto ( $T_0^+$ ) e a corrente após a eliminação do curto ( $T_1$ ). Os valores apresentados na Tabela 6.1, são valores medidos na fase A do sistema da Figura 5.3.

$1\Phi$		<i>Barra 1</i>	<i>Barra 2</i>	<i>Barra 3</i>	<i>Barra 4</i>	<i>Barra 5</i>
	<i>Antes (<math>T_0</math>)</i>	0,465 p.u. (706,5A)	0,42 p.u. (638,1A)	0,163 p.u. (247,6A)	0,36 p.u. (15,0A)	0,043 p.u. (2,3A)
<i>Durante (<math>T_0'</math>)</i>	0,96 p.u. (1458,6A)	1,54 p.u. (2339,7A)	0,238 p.u. (361,6A)	2,7 p.u. (112,9A)	3,345 p.u. (139,3A)	
<i>Durante (<math>T_0^+</math>)</i>	0,77 p.u. (1169,9A)	1,575 p.u. (2392,9A)	0,176 p.u. (267,4A)	2,49 p.u. (104,1A)	2,25 p.u. (75,3A)	
<i>Depois (<math>T_1</math>)</i>	0,345 p.u. (524,2A)	0,31 p.u. (470,9A)	0,137 p.u. (208,1A)	0,104 p.u. (4,35A)	0,293 p.u. (12,3A)	
$3\Phi$	<i>Antes (<math>T_0</math>)</i>	0,465 p.u. (706,5A)	0,42 p.u. (638,1A)	0,163 p.u. (247,6A)	0,36 p.u. (15,0A)	0,043 p.u. (2,3A)
	<i>Durante (<math>T_0'</math>)</i>	1,174 p.u. (1783,7A)	2,06 p.u. (3129,8A)	0,301 p.u. (457,3A)	3,54 p.u. (148,0A)	3,44 p.u. (143,5A)
	<i>Durante (<math>T_0^+</math>)</i>	1,114 p.u. (1692,5A)	1,82 p.u. (2765,2A)	0,264 p.u. (401,1A)	3,2 p.u. (133,8A)	2,4 p.u. (70,69A)
	<i>Depois (<math>T_1</math>)</i>	0,345 p.u. (524,2A)	0,31 p.u. (470,9A)	0,137 p.u. (208,1A)	0,104 p.u. (4,35A)	0,293 p.u. (12,3A)

Tabela 6.4 – Valores das Correntes de Curto do Sistema *SOFC*, *MTG-SINPER* e *MTG-ASSIN*

Na análise das três fontes operando juntas com a rede de distribuição, verifica-se através da comparação entre as Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 com a 6.4 que, na análise individual, os níveis de curto da *SOFC* (Tabela 6.1) são iguais, ambos com pico de 0,96 p.u. para o curto monofásico, porém, na análise com as três fontes juntas o curto é mais amortecido que na análise individual (Tabela 6.1) da *SOFC*. No curto trifásico, as correntes de curto, para o caso com as três fontes

operando juntas (Tabela 6.4), são um pouco maiores que as correntes da análise individual (Tabela 6.1) e ambas são sustentadas da mesma forma. No caso da *MTG-SINPER*, os níveis de curto são maiores na análise individual (Tabela 6.2) do que os níveis encontrados na barra 2 da Tabela 6.4, para curtos monofásicos. No curto trifásico as correntes apresentam aproximadamente os mesmos valores de curto e são sustentadas da mesma forma. Na *MTG-ASSIN* os níveis de curto, tanto os da análise individual (Tabela 6.3), quanto na análise das três fontes operando juntas, são muito parecidos e apresentam comportamento semelhante, devido aos valores muito próximos encontrados na Tabela 6.3, comparados com os valores da barra 3 da Tabela 6.4. Assim, conclui-se que quando as três fontes operam juntas, em paralelo, ocorrem pequenas mudanças no comportamento de cada fonte, comparado com as análises individuais, perante aos distúrbios causados, porém, em todas as análises, o comportamento das fontes é adequado.

### 6.3.5 Avaliação dos Resultados da Análise Transitória

Através das análises transitórias realizadas utilizando as três fontes de GD conclui-se que, durante um curto monofásico a tensão da fase que sofreu o curto diminuiu e a sua corrente aumentou. Observou-se também, neste caso, que as correntes das demais fases também aumentaram e se defasaram. Isto ocorre porque a soma fasorial das correntes das três fases deve ser igual a zero. Assim, o sistema comprova ter um comportamento aceitável. O mesmo vale para o curto trifásico, onde as três fases de tensão caíram a zero e as correntes das três fases aumentaram e se defasaram.

Um fator importante a ser complementado refere-se ao nível das correntes de curto-circuito, a corrente da barra 4, que representa a soma das correntes de curto de cada fonte de GD do sistema da Figura 5.3, apresenta um nível de curto-circuito trifásico maior que o nível de corrente da barra 5, que representa a capacidade de curto da rede de distribuição. Assim, conclui-se que as fontes de GD, ligadas ao sistema elétrico, aumentam o nível de curto-circuito.

As correntes de curto-circuito das barras 1 e 2 do sistema da Figura 5.3 são muito maiores que as da barra 3. De fato, isso comprova que a máquina assíncrona amortece mais as correntes de curto circuito. Segundo [Freitas, 2005], a corrente de curto de uma máquina assíncrona decai rapidamente porque a máquina não tem capacidade de fornecer corrente de curto sustentada. Esta característica pode ser importante caso deseje-se instalar esses geradores

em redes de distribuição com restrições da capacidade de corrente de curto-circuito. Teoricamente, a inexistência da corrente sustentada pode ser um problema para o sistema de proteção para o gerador detectar a falta. Do contrário, os modelos *SOFC* e *MTG-SINPER* fornecem corrente sustentada durante a ocorrência dos curtos.

Conclui-se também que, um sistema de controle de despacho de potência ou de distribuição das cargas se faz necessário para que seja possível controlar quanto cada fonte deve despachar de potência, após a ocorrência de distúrbios, para que o sistema não opere de forma descontrolada.

## 7. Conclusões

A motivação fundamental para a realização deste trabalho foi a modelagem e implementação computacional de três tipos de fontes de geração distribuída e de uma plataforma de simulação que permitisse analisar o comportamento dinâmico e transitório destas fontes operando de forma isolada e em conjunto com uma rede de distribuição. Desta forma, a principal contribuição deste trabalho foi verificar o impacto causado por estes três tipos de fontes, quando operando de forma isolada, como também, juntas com a rede de distribuição.

Neste trabalho, um modelo dinâmico de célula combustível e dois modelos dinâmicos de microturbinas a gás foram desenvolvidos. Nos modelos de microturbinas, um utiliza máquina assíncrona como gerador e o outro uma máquina síncrona a imãs permanentes. Além disto, são desenvolvidos modelos de inversores e conversores necessários para efetuar o trabalho de interface com a rede de distribuição e criar uma plataforma de simulação, ou uma microrrede como referenciado na literatura. Ao escolher os modelos, foi tido em conta o grau de complexidade e de precisão requerido para as simulações que se desejava executar.

A implementação computacional dos modelos foi realizada em ambiente de *Matlab/Simulink* utilizando os blocos da caixa de ferramentas do *SimPowerSystem*. Na fase de implementação foi tomado o cuidado de manter a coerência entre as interfaces de introdução de dados dos modelos individuais de cada fonte, conversores e blocos do *SimPowerSystem*.

Através da análise do perfil da tensão, conclui-se que as três fontes de GD podem operar dentro dos limites aceitáveis de tensão para carregamentos de, no mínimo, 100% da potência nominal de cada fonte.

Quanto a análise dinâmica, conclui-se que as fontes apresentam uma resposta lenta ao degrau de carga quando operando de forma isolada e, quando ligadas aos seus conversores, através da plataforma de simulação com um incremento de carga, as respostas passam a ser bem mais rápidas, devido a presença dos conversores. Nesta análise, com as três fontes juntas, também verificou-se que somente o grupo *SOFC* e o *MTG-SINPER* responderam ao distúrbio, fornecendo maior energia ao sistema, em função da carga imposta. O modelo *MTG-ASSIN* não

mudou a amplitude da potência e corrente e continuou fornecendo os mesmos valores de correntes que fornecia antes do incremento. Isto ocorreu devido a baixa capacidade de geração desta fonte e a característica de amortecimento deste tipo de máquina na ocorrência de distúrbios. Do contrário da *MTG-ASSIN*, a *SOFC* apresenta uma pequena flutuação de tensão, após o incremento de carga, então, para o melhor desempenho desta fonte, um sistema de controle que evite as flutuações de tensão deverá ser adicionado. Após sofrer o incremento, as curvas de potência e corrente de cada fonte oscilam por alguns ciclos e voltam a operar de forma estável e segura. Assim, é assegurado o sistema apresentar respostas satisfatórias a esta análise.

A análise transitória apresentou um comportamento satisfatório por todas as fontes. Quando as três fontes operam juntas, a soma das correntes de curto-circuito trifásico, de cada fonte, apresenta nível de corrente maior que o nível das correntes de curto da rede de distribuição. Assim, conclui-se que a microrede, composta pelas três fontes de GD, eleva os níveis de curto do sistema. Das três fontes analisadas, a que apresentou maior nível de curto-circuito foi a *MTG-SINPER*, seguido da *SOFC*. O modelo *MTG-ASSIN* foi o que apresentou os menores níveis de curto-circuito. As correntes de curto do modelo *MTG-ASSIN* não permaneceram sustentadas durante a ocorrência dos curtos, foram amortecidas ao longo dos ciclos e, neste caso, podem não serem detectadas como curto-circuito, prejudicando o sistema de proteção. A utilização de relés de sub/sobre-tensão se fazem necessários em fontes com máquina assíncrona. No entanto, as fontes *MTG-SINPER* e *SOFC*, fornecem corrente de curto sustentada durante os três ciclos e, neste caso, são detectadas como curto-circuito pelo sistema de proteção. Nas análises das três fontes operando juntas, concluiu-se, também, que é necessário a utilização de um sistema de controle do despacho de potência de cada fonte, pois após a ocorrência dos curtos, não existia um sistema que realizasse a distribuição de carga por cada fonte. Então, inicialmente, a *MTG-ASSIN* assumiu mais corrente que foi suprida pelas demais fontes no decorrer do tempo até que as três fontes entrassem em sincronismo com o novo carregamento do sistema.

De acordo com todos os testes desenvolvidos, conclui-se que as fontes com células combustíveis e microturbinas a gás podem operar de forma segura quando conectadas a redes de distribuição operando tanto de forma isolada como em conjunto com a rede de distribuição, na ocorrência de contingências no sistema ou desligamentos programados. Deste modo, tendo em vista os resultados obtidos, constata-se que a metodologia apresentada nesta dissertação mostrou-

se como uma útil contribuição para estudos de estabilidade transitória e dinâmica em sistemas elétricos que utilizam geração distribuída.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Em qualquer trabalho deste teor, torna-se muito difícil atingir uma situação em que se considere o trabalho concluído. Independente do grau de especificidade inicial dos objetivos a atingir, surgem sempre novas idéias no decorrer do seu desenvolvimento que tendem a fazer expandir, por vezes de forma descontrolada, o seu tamanho, âmbito e duração. A necessidade, compreensível, de limitar estas três variáveis conduz a inevitáveis escolhas, havendo assuntos que, apesar de relevantes, não tiveram a oportunidade de ser abordados. No entanto, estes assuntos não ficaram esquecidos, apresentando-se nos parágrafos seguintes aqueles que se espera que venham a ser alvo de futuros desenvolvimentos.

Cita-se, como principal deles, o desenvolvimento de uma central de controle, ligada as três fontes, para que as três fontes operem juntas, com despacho de potência e frequência controlado, fornecendo uma operação estável e segura quando ligadas ao sistema elétrico.

O desenvolvimento de um sistema híbrido de ciclo combinado aproveitando o calor liberado pela *SOFC* para alimentar a microturbina poderá ser desenvolvido e a mesma análise dinâmica e transitória poderá novamente ser realizada. A vantagem deste sistema é a de promover uma maior eficiência do sistema, já que a eficiência das microturbinas é baixa, além de reduzir os custos de operação. Além disto, a colocação de dispositivos de armazenamento de energia em paralelo com a célula combustível, também poderá trazer uma melhora no desempenho do sistema na ocorrência de variações de carga, flutuação da tensão e mesmo curto-circuito.

O desenvolvimento dos modelos para operarem com maiores potências e permitirem sua interface com redes de transmissão de energia, de forma a aumentar a participação da geração distribuída e de novas fontes de energia no sistema elétrico também é uma linha de investigação promissora. Além disto, o desenvolvimento de novos modelos de inversores e conversores para a GD é de fato o tema de maior importância no momento atual, pois são eles que passam a determinar e controlar o desempenho das fontes. Estratégias de controle utilizando lógica fuzzy, redes neurais e compensadores de reativos são idéias promissoras a serem implantadas no controle dos dispositivos de eletrônica de potência de forma que estes forneçam uma resposta

dinâmica rápida e estável, além da eliminação dos transitórios rápidos, no caso das máquinas síncrona e assíncrona, através da utilização de filtros.

Em geral, diversas idéias ficam a dispor e são necessárias para o desenvolvimento da pesquisa e evolução dos trabalhos até que estes tipos de sistemas sejam de domínio geral e possam ser implementados de forma confiável nos sistemas elétricos.

# Referências Bibliográficas

Ackermann T., Goran A., Lennart S., “Distributed Generation – A Definition”. Electric Power Systems Research 57 (2001) 195-004.

AEA Energy & Environment, “Severn Estuary Tidal Energy from Non-Barrage Options” – Sustainable Development Commission – The University of Edinburgh, October, 2007.

Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., - “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components” – IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-20, no. 3 – May/June, 1984.

Al-Hinai A., Feliachi A., “Dynamic Model of a Microturbine used as a Distributed Generator” – IEEE Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on, pp. 209-213, 2002.

ANEEL “Agencia Nacional de Energia Elétrica” – [www.aneel.com.br](http://www.aneel.com.br). Acesso em Maio, 2007.

Azmy A. M., Erlich I., - “Dynamic Simulation of Fuel Cell and Micro-turbines Integrated with a Multi-machine Network” – IEEE Bologna Power Tech Conference – June 2003.

Ballard, “Ballard Power Systems Inc.” - [www.ballard.com/tD.asp?pgid=35&dbid=0](http://www.ballard.com/tD.asp?pgid=35&dbid=0). Acesso em Agosto, 2007.

Cardell J., Tabors R., “Operation and Control in a Competitive Market: Distributed Generation in a Restructured Industry” – Energy Journal Special Issue: Distributed Resources: Toward a New Paradigm of the Electricity Business – The International Association for Energy Economics, Cleveland, Ohio, USA, 1998.

Cavaliere C. K. N., Silva E. P., “Os Sistemas Isolados e o Uso de Fontes Renováveis Alternativas de Energia no Contexto de Regulação do Setor Elétrico Nacional” – Congresso Brasileiro de Regulação de Serviços Públicos Concedidos – Salvador, 2000.

CBO, “Prospects for Distributed Electricity Generation” – Congress of the United States Congressional Budget Office – USA, September/2003.

Chilvers I. M., Milanovic J. V., “Transient Analysis of a Combined Cycle Power Plant (CCGT) Connected Directly to the Distribution Network” – IEE Power System Management and Control, pp. 17-19 – April, 2002.

CIREN, “Dispersed Generation – Preliminary Report of CIREN Working Group – WG04” – June, 1999.

Costamagna P., L. Magistri, A. F. Massardo, “Design and Part-Load Performance of a Hybrid System Based on a Solid Oxide Fuel Cell Reactor and a Micro Gas Turbine” - Journal of Power Sources 96 (2001) 352-368 – Elsevier Science.

EG&G Services, Parsons Inc., and Science Applications International Corporation, “Fuel Cell Handbook” - 5<sup>th</sup> ed: U.S. Department of Energy – Office of Fossil Energy – National Energy Technology Laboratory, 2000.

Ellis M. W., Von Spakovsky M. R., Nelson D. J., “Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21<sup>st</sup> Century” – Proceedings of the IEEE – vol. 89, no. 12 – December, 2001.

EPRI, “Dispersed System Impacts: Survey and Requirements Study” - EPRI TR-103337, Project 3357-01, July, 1994.

Filho G. L. T., Galhardo C. R., Antloga J. G. M., Ferrari J. T., “Um Panorama das Pequenas Centrais no Brasil” – V Simpósio de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas – Florianópolis, 2006.

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.

Gas Research Institute, “Distributed Power Generation: A Strategy for a Competitive Energy Industry” – Gas Research Institute – Chicago, USA, 1998.

Georgakis D., Papathanassiou S., Manias S., “Modeling and Control of a Small Scale Grid Connected PEM Fuel Cell System” – IEEE Power Electronics Specialists Conference, IEEE 36<sup>th</sup> 2005, pp. 1614-1620.

Gil N. J. A. S. C., “Elaboração de Procedimentos e Critérios para Definição de Limites de Elegibilidade de Aceitação de Produção Renovável em Redes Isoladas” - Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto/Portugal, 2003.

Gomes E. B., Rosa M. A., Silva E., “Case Studies of Distributed Generation Projects with Microturbines in Brazil” – Proceedings of International Joint Power Generation Conference, June, 2003.

Hajagos L. M., Bérubé G. R., “Utility Experience with Gas Turbine Testing and Modeling” – Proceedings of the IEEE, pp. 1808-1818 – 2001.

Hannett L. N., A. Khan, “Combustion Turbine Dynamic Model Validation from Tests” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no.1 - February, 1993.

Hannett L. N., Jee G., Fardanesh B., “A Governor/Turbine Model for a Twin-Shaft Combustion Turbine” – IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1 – February 1995, pp. 133-140.

Hartmut W., Linardi M., “Tecnologia de Células a Combustível” – Revista Química Nova (SciELO) – São Paulo, 2000.

Hatziaioniu C. J., Lobo A. A., Pourboghraat F. and Daneshdoost M., “A simplified dynamic model of grid-connected fuel cells generators” – IEEE Transactions Power Delivery, vol. 17, pp. 467-473- April, 2002.

Hatziargyriou N., “DER and Microgrids: Research Topics within EU Framework Programs”. Presentation. CERTS, Berkeley 2005 Symposium on Microgrids. June, 2005. [http://der.lbl.gov/new\\_site/certsMicrogrids/presentation\\_pdfs/](http://der.lbl.gov/new_site/certsMicrogrids/presentation_pdfs/)

He W., “Dynamic Performance of a Reformer for Molten Carbonate Fuel Cell Power Generation Systems” – Fuel Processing Technology 53 (1997), pp. 99-113.

He W., “Dynamic Model for Molten Carbonate Fuel Cell Power Generation Systems” – Journal of Energy Conversion and Management - ELSEVIER, vol. 39 (8) – 1998, pp.775-783.

IEA, “Trends in Photovoltaic Applications – Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2004” – International Energy Agency, report IEA-PVPS T1-14:2005.

IGA, “International Geothermal Association” - <http://iga.igg.cnr.it/index.php> - Acesso em Fevereiro de 2008.

INSEE, “Institut National de la Statistique et des Études Économiques” - <http://www.insee.fr> – Acesso em Fevereiro de 2008.

Jagaduri R. T., Radman G., “Modeling and Control of Distributed Generation Systems Including PEM Fuel Cell and Gas Turbine” – Electric Power Systems Research 77 (2007) 83-92.

Jenkins N., Allan R., Crossley P., Kirschen D., Strbac G., “Embedded Generation” - IEE 2000, 245 pages – June, 2000.

Jung J. W., Keyhani A., “Modeling and Control of Fuel Cell Based Distributed Generation Systems in a Stand-Alone AC Power Supply” – Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – vol. 2 – no. 1, 2005.

Jurado F., Ogayar B., Castro M., Carpio J., “Neural Networks and Fuzzy Logic in Electrical Engineering” – Univesity of Jaén, pp. 975-980, 2000.

Jurado F., Valverde M., “Genetic Fuzzy Control Applied to the Inverter of Solid Oxide Fuel Cell for Power Quality Improvement” – ELSEVIER Electric Power Systems Research 76 (2005) 93-105.

Jurado F., Carpio J., “Improving Distribution System Stability by Predictive Control of Gas Turbines” – ELSEVIER Energy Conversion and Management 47 (2006) 2961-2973.

Kimijlma S., Kasagi N., “Performance Evaluation of Gás Turbine Fuel Cell Hybrid Micro Generation System” – Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, June, 2002.

Lasseter R., Akhil A., Marnay C., Stephens J., Dagle J., Guttromson R., Meliopoulos A. S., Yinger R., Eto J., “The CERTS Microgrid Concept”. Prepared for Transmission Reliability Program Office of Power Technologies Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy – April, 2002.

Le T., “Fuel Cells: The Epidemic of the Future” – IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference, 23-25 sept. 2003, pp. 505-510.

Lee K. Y., “The Effect of DG Using Fuel Cell under Deregulated Electricity Energy Markets” – IEEE Power Engineering Society General Meeting – June, 2006.

Leon F., Ooi B. T., “Damping Power Oscillations by Unidirectional Control of Alternative Power Generation Plants” – IEEE PES Winter Meeting 2001, Columbus - USA.

Marconato J. C., Bidóia E. D., “Potencial de Eletrodo: Uma Medida Arbitrária e Relativa” – Revista Química Nova na Escola, no. 17 – Maio, 2003.

Massardo A. F., McDonald C. F., Korakianitis T., “Microturbine/Fuel Cell Coupling for High Efficiency Electrical – Power Generation” – Transactions of the ASME - January, 2002.

MathWorks, “TransÉnergie Technologies and Hydro-Québec – SimPowerSystems User`s Guide” version 4.5, 2007.

Menges R., Barsantny K., “Die Liberalisierung der Strommärkte in Norwegen und Schweden” – Zeitschrift für Energie Wirtschaft, vol. 21, Germany, 1997.

Nagpal M., Moshref A., Morison G. K., Kundur P., “Experience with Testing and Modeling of Gas Turbines” – IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 652-656, 2001.

Nikkhajoei H., Iravani R., “Electromagnetic Transients of a Microturbine Based Distributed Generation System” – ELSEVIER Electric Power Systems Research 77 (2007) 1475-1482.

Padullés J., G. W. Ault, J. R. McDonald, “An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation” - Centre for Electrical Power Engineering - University of Strathclyde, Scotland/UK, 1999.

Peças Lopes J. A., Moreira C., Seca L., Resende F., Madureira A., “Islanding de Redes AT/MT e BT com Produção Distribuída” – IST Fórum Energia, 2004.

Peças Lopes J. A., Moreira C. L., Madureira A. G., Resende F. O., Wu X., Jayawarna N., Zhang Y., Jenkins N., Kanellos F., Hatziargyriou N., “Control Strategies for Microgrids Emergency Operation” - European Commission (EU) within the framework of EU Project Microgrids, contract No. ENK-CT-2002-00610.

Peças Lopes J. A., Moreira C., Seca L., Resende F., “Microgrids Black-Start and Islanded Operation” – 15<sup>th</sup> Power System Computation Conference – Belgium 2005.

Peraza C., Longatt F. G., Villanueva C., Blanco R., Díaz J. G., “Control de Inversores en Sistemas de Generación Distribuída” – Revista de Ingeniería UC., vol 12, no 3 – Diciembre 2005.

Preston G. T., Rastler D. M., “Distributed Generation: Competitive Threat or Opportunity?” - Public Utilities Fortnightly, 34(15), 13-17, 1996.

NTUA “Projeto Microgrid and MORE Microgrid” – <http://Microgrids.power.ece.ntua.gr>. Acesso em agosto de 2006.

Rendón M. A. M., “Modelagem e Simulação do Sistema de Controle de uma Microturbina a Gás”- Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI – Itajubá, dezembro, 2005.

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

Sakhare A. R., Davari A., Feliachi A., “Control of Solid Oxide Fuel Cell for Stand-Alone and Grid Connection Using Fuzzy Logic Technique” – IEEE System Theory, 2004. Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on, pp. 551-555.

Sauer I. L., Queiroz M. S., Miragaya J. C. G., Mascarenhas R. C., Quintini A. R. J., “Energias Renováveis: Ação e Perspectivas na Petrobrás” – Bahia Análise e Dados, Salvador, vol.16 - no. 1, pp. 9-22, junho, 2006.

Schindele L., Braun M., Spath H., “The Influence of Power Dynamics on PEM Fuel Cell System” – IEEE Power Electronics and Applications, 2005. European Conference on.

Scott W. G., “Micro-Turbine Generators for Distribution Systems” – IEEE Industry Applications Magazine – May/June, 1998, pp.58-62.

Sedghisigarchi K., Feliachi A., “Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cells – Part II: Control and Stability Enhancement” – IEEE Transactions on Energy Conversion – vol. 19, no. 2, June, 2004.

Serra E. T., Furtado J. G. M., Soares G. F. W., Neto A. C., “Células a Combustível: uma alternativa para a geração de energia e sua inserção no mercado” – CEPTEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica) - Rio de Janeiro, 2005.

Slootweg J. G., Kling W. L., “Impacts of Distributed Generation on Power System Transient Stability” – IEEE Transactions on Power Systems - 0-7803-7519-X-2002.

Small Hydropower Barometer, “11644 MW Installés Dans L`Union Européenne” – Small Hydropower Barometer, Systèmes Solaires no. 174, august, 2006. [www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org).

Unicamp “Universidade de Campinas” – Acessória de Comunicação e Imprensa – [www.unicamp.br/unicamp/canal\\_aberto/clipping/outubro2004/clipping041020\\_correioop.html](http://www.unicamp.br/unicamp/canal_aberto/clipping/outubro2004/clipping041020_correioop.html). Acesso em Fevereiro, 2008.

Wang C., Nehrir M. H., “Distributed Generation Applications of Fuel Cells” – IEEE Power Systems Conference: Advanced metering, protection, control, communication and distributed resources, 2006.

Watson J., Wustenhagen R., Dyllick T., St. Gallen “Perspective of Decentralised Energy Systems in a Liberalised Market: The UK Perspective” — Institute for Wirtschaft und Okologie (IWO) – Diskussionsbeiträge Nr. 72: Nachhaltige Marktchancen Dank Dezentraler Energie ? Ein Blick in die Zukunft der Energie Dienstleistung, Switzerland – January, 1999.

Willis H. L., Scott W. G., “Distributed Power Generation – Planning and Evaluation” - Marcel Dekker, 2000.

Wolk R. H., “Fuel Cells for Homes and Hospitals” – IEEE Spectrum, USA, vol. 36, pp. 45-52 - May, 1999.

World's Highest Tides – Town of Parrsboro, Nova Scotia - <http://www.town.parrsboro.ns.ca/hightides.html> - Acesso em Fevereiro, 2008.

Veyo S. E., Shockling L. A., Dederer J. T., Gillett J. E., Lundberg W. L., “Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power Systems: Status” – Journal Of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME – October, 2002.

Yee S. K., Hughes F. M., Milanovic J. V., “Comparative Analysis and Reconciliation of Gas Turbine Models for Stability Studies” – IEEE, Power Engineering Society General Meeting, USA - June, 2007.

Younis M. A. A., Rahim N. A., Mekhilef S., “Fuel Cell Model for Three-Phase Inverter” – IEEE Power and Energy Conference - First International Power and Energy Conference PECon, 2006.

Zhu Y., Tomsovic K., “Development of Models for Analyzing the Load-Following Performance of Microturbines and Fuel Cells” - Electric Power Systems Research (62), 2002.