

ANA CAROLINA ALVES MIRANDA

**GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA
ABORDAGEM SOBRE METODOLOGIAS DE CONTROLE DE TENSÃO E
FREQUÊNCIA EM GERADORES DISTRIBUÍDOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, no Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Fernando Buzzulini Prioste.

JOINVILLE/SC

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC

Alves Miranda, Ana Carolina
Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos
Urbanos: uma Abordagem Sobre Metodologias de
Controle de Tensão e Frequência em Geradores
Distribuídos / Ana Carolina Alves Miranda. -
Joinville , 2017.
191 p.

Orientador: Fernando Buzzulini Prioste
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Joinville, 2017.

1. Geração Distribuída. 2. Motogeradores. 3.
Biomassa Residual. 4. Microrredes. 5. Controle de
Velocidade. I. Buzzulini Prioste, Fernando . II.
Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação. III. Título.

**Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem
Sobre Metodologias de Controle de Tensão e Frequência em Geradores
Distribuídos**

por

Ana Carolina Alves Miranda

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Área de concentração em "Sistemas Eletroeletrônicos"
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Fernando Buzzulini Prioste
CCT/UEDESC (Orientador/Presidente)


Prof. Dr. Miguel Moreto
UFSC


Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira
UTFPR

Joinville, SC, 28 de setembro de 2017.

Aos meus pais, por todo o investimento e dedicação à minha formação técnica e moral. A meu esposo, por ter me incentivado a ingressar no Mestrado e por ter tido paciência para enfrentar os diversos períodos difíceis até a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho pudesse ser concluído, aos que me apoiaram e que compreenderam meus momentos de ausência ou de cansaço.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, por proporcionar estrutura e professores de qualidade.

A meus pais Vaildis e Milton, que compreenderam minha ausência durante os períodos de estudo e sempre incentivaram muito e investiram em minha educação.

A meu esposo, que sempre me incentiva, me dá apoio nos momentos difíceis e me cobra quando penso em desistir.

A meu professor orientador Fernando Buzzulini Prioste, por toda a ajuda, dedicação, paciência e orientação.

Aos meus colegas de trabalho, que compreenderam meus momentos de cansaço e distração e me deram muito apoio para concluir etapas importantes no decorrer do curso.

Finalmente, aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UDESC, por todo o conhecimento transmitido.

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma contribuição para o estudo de fontes de geração de energia distribuída, com foco no uso da biomassa residual urbana para a geração de energia elétrica. É apresentada a tecnologia mais utilizada para geração de energia elétrica a partir do biogás obtido pela digestão anaeróbica do lixo, assim como os principais elementos de uma planta de extração e queima do gás. Embora a conexão destas novas fontes de energia elétrica, na maioria das vezes próximas aos centros de consumo, seja de grande importância na diversificação da matriz energética, é muito importante que as técnicas de operação e controle sejam reavaliadas para esta nova distribuição de fontes. Neste sentido, este trabalho também trata sobre o tema de estabilidade e controle de sistemas elétricos, com especial atenção para redes de distribuição e microrredes, que devem ganhar força com a expansão da geração distribuída e a busca pela modernização das redes. Por último, são abordadas algumas técnicas de controle de velocidade e de tensão de geradores síncronos distribuídos. Por meio de simulações no *software Matlab/Simulink* é feita uma comparação de desempenho de geradores com diferentes controladores, baseados em técnicas convencionais e outras mais modernas de controle. As comparações são feitas em uma microrrede conectada à rede de distribuição de uma concessionária, em 13,8 kV, em condições normais de operação (com o disjuntor do ponto de conexão fechado) e na condição de ilhamento, quando a microrrede passa a operar isolada da concessionária.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Motogeradores, Biomassa Residual, Microrredes, Controle de Velocidade, Controle de Tensão

ABSTRACT

This work presents a contribution to the study of distributed systems, focusing on the use of urban residual biomass generate energy (as known as waste-to-energy). It presents the most used technology to generate energy from the biogas obtained by the anaerobic digestion of the waste, as well as the main elements of a gas extraction and burning plant. Although the connection of these new energy sources, most of them near the centers of consumption, is of great importance in the diversification of the energy matrix, it is very important that the techniques of operation and control are re-evaluated for this new distribution of sources. In this sense, this work also deals with the subject of stability and control of electrical systems, with special attention to distribution networks and microgrids, which should gain strength with the expansion of distributed generation and the researches on the modernization of networks. Finally, some techniques of speed and voltage control of synchronous distributed generators are discussed. Through simulations in Matlab / Simulink software, a comparison of the performance of generators with different controllers, based on conventional and other more modern control techniques, is made. The comparisons are made in a microgrid connected to the distribution network of an energy company, at 13.8 kV, under normal operating conditions (with the connection point circuit breaker closed) and in islanded condition, when the microgrid starts to operate standalone.

Key-words: Distributed Generation, Genset, Waste-to-energy, Microgrid, Frequency Control, Voltage Control

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Demanda de eletricidade e fontes de atendimento à demanda de energia	29
Figura 2 - Aterro sanitário de Joinville	37
Figura 3 - Fases de formação de gases em um aterro sanitário.	44
Figura 4 - Projeção da geração e do conteúdo energético da fração orgânica (FO) dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil	46
Figura 5 - Sistema de recuperação de biogás de aterro utilizando poços verticais...47	
Figura 6–Exemplo de planta da usina de biogás e de geração de energia	47
Figura 7 - Exemplo de poço vertical para captação de gás.....	48
Figura 8 - Exemplo de poço horizontal para captação de gás	49
Figura 9 – Tubulação de canalização do gás da usina do Aterro Bandeirantes/SP ..	49
Figura 10 - Esquema da planta de tratamento do gás e de geração de energia com motogerador	51
Figura 11 – Tecnologias para de uso do biogás do RSU nos Estados Unidos	55
Figura 12 - Componentes básicos de um motogerador a gás.....	57
Figura 13 - Motogeradores instalados no aterro de Caieiras, em SP.....	57
Figura 14 - Projetos de uso do biogás do RSU nos Estados Unidos	58
Figura 15 - Projetos de uso do biogás do RSU nos Brasil	59
Figura 16 – Tela inicial do programa para estimativa do potencial energético de aterros sanitários	62
Figura 17 – Tela de projeto do programa para estimativa do potencial energético de aterros sanitários	63
Figura 18 – Tela do programa onde se entra com os dados de estimativa de geração de metano no aterro.	64
Figura 19– Histórico do depósito de resíduos no aterro sanitário de Joinville	66
Figura 20– Valores de linha base utilizados	67
Figura 21– Gráfico da vazão de metano por ano	68
Figura 22– Gráfico da potência disponível, em kW/mês	69
Figura 23– Estimativa da potência elétrica gerada no aterro.	70
Figura 24– Emissão evitada de CH ₄	71
Figura 25 - Diagrama esquemático de uma Microrrede com múltiplas fontes de GD75	
Figura 26 - Conceito de Microrrede da CERTS	76
Figura 27 - Fonte conectada a uma barra CA	88
Figura 28 - <i>Droop</i> reverso	90
Figura 29 – Componentes gerais de uma microrrede	93
Figura 30 - Exemplo de estrutura de gerenciamento de uma microrrede	96
Figura 31 – Gráfico do lugar das raízes típico para um regulador isócrono	100

Figura 32 – Exemplo diagrama de blocos de um malha de frequência com controle com <i>droop</i>	101
Figura 33 – Gráfico do lugar das raízes típico para um regulador com <i>droop</i>	102
Figura 34 – Exemplo diagrama de blocos de um malha de frequência com controle com <i>droop</i> e regulação secundária.....	103
Figura 35 – Exemplo diagrama de blocos de um regulador de tensão com excitatriz tipo AC5A da <i>IEEE</i>	105
Figura 36 – Sistema de excitação representado como um simples sistema em malha fechada com compensação	106
Figura 37 – Resposta em frequência desejada para o sistema	107
Figura 38 - Esquema de controle de um MPC.....	109
Figura 39 - Diagrama unifilar do sistema de estudo	115
Figura 40 - Esquema simplificado motogerador a gás.....	117
Figura 41 - Diagrama de blocos da planta de controle de velocidade	118
Figura 42 - Regulador automático de tensão.....	120
Figura 43 – Gráfico do lugar das raízes para uma planta de regulação de velocidade com controlador integral.	122
Figura 44 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de frequência com regulador isócrono com variação do ganho K.....	122
Figura 45 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de frequência com regulador com <i>droop</i> com variação da constante de tempo τ_1	123
Figura 46 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de frequência com regulador <i>washout</i> com variação no ganho K_p	124
Figura 47 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de tensão com AVR do tipo AC5A.....	125
Figura 48 – Diagrama de blocos da planta de controle de velocidade	125
Figura 49 – Desvio de frequência do gerador DG1 com regulador de velocidade isócrono	134
Figura 50 – Potência ativa no gerador DG1 nos cenários 2 a 5	135
Figura 51 – Potência reativa no gerador DG1 nos cenários 2 a 5	136
Figura 52 – Desvio de frequência do gerador DG1 nos cenários 2 a 5	138
Figura 53 – Tensão terminal eficaz no gerador DG1 para os cenários 2 a 5.....	139
Figura 54 – Tensão no Ponto de Conexão Comum – PCC, nos cenários 2 a 5.....	140
Figura 55 - Sensibilidade à tensão	166
Figura 56 - Circuito equivalente de um motor de indução.....	170
Figura 57 - Diferentes categorias de controle no tempo	176
Figura 58 - Esquema de uma máquina síncrona alimentando uma carga isolada .	178
Figura 59 - Função de transferência que relaciona a variação de velocidade com a variação da potência.....	178
Figura 60 - Função de transferência que relaciona a variação de velocidade com a variação da potência, incluindo efeitos do coeficiente de amortecimento da rede .	178
Figura 61 – Esquema simplificado de uma máquina com controle isócrono	179

Figura 62 - Velocidade do gerador com controlador inadequado à conexão em paralelo com a rede.....	180
Figura 63 - Característica ideal de um controlador com <i>droop</i> de velocidade/frequência, em pu.....	181
Figura 64 – Esquema simplificado de uma máquina com controle com <i>droop</i>	181
Figura 65 – Características da potência gerada em função da frequência da rede com o uso do <i>droop</i>	182
Figura 66–Esquema simplificado de uma máquina com controle com <i>droop</i> e ajuste de referência de carga	182
Figura 67–Compartilhamento de carga entre duas máquinas com controle <i>droop</i> de frequência.....	183
Figura 68–Resposta no tempo de uma máquina com regulação de velocidade com <i>droop</i>	184
Figura 69–Esquema simplificado da inclusão da ação de controle secundária (geralmente centralizada) em um sistema de geração de energia.....	185
Figura 70 - Diagrama de blocos do sistema de controle da excitação de um gerador síncrono	188
Figura 71 - Sistema de excitação AC5A simplificado	189
Figura 72 - Característica ideal de um controlador com <i>droop</i> de tensão	190
Figura 73–Compartilhamento de carga entre duas máquinas com controle <i>droop</i> de tensão	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demonstração dos resíduos sólidos coletados em Joinville segundo o tipo (t/mês)	36
Tabela 2 – Característica do Aterro Sanitário Municipal de Joinville.....	37
Tabela 3 – Dados das Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs em funcionamento na cidade de Joinville.....	38
Tabela 4 – Constituição típica do gás de aterro	43
Tabela 5 – Tecnologias de utilização de biogás de RSU e faixas típicas de vazão e potência.....	55
Tabela 6 – Valores sugeridos para k.....	65
Tabela 7 – Variáveis para as matrizes de estado da planta	126
Tabela 8 – Fluxo de potência da microrrede em $t = 0$ s.	131
Tabela 9 – Sequência de eventos utilizada nos testes.....	132
Tabela 10 – Cenários de simulação	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
CA	Corrente alternada
CAG	Controle Automático de Geração
CC	Corrente contínua
CERTS	<i>Consortium for Electric Reliability Technology Solutions</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DMS	<i>Distribution Management System</i>
EM	<i>Electronic meter</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FR	<i>Fuel rate</i>
Fundema	Fundação Municipal do Meio Ambiente de Joinville
GD	Geração (ou gerador) distribuída(o)
IC	Interface de conexão
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPPUJ	Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville
LC	<i>Load control</i>
LED	<i>Light emitting diode</i>
MC	<i>Microsource control</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MGCC	<i>Microgrid central control</i>
MIMO	<i>Multiple inputs – multiple outputs</i>
MPC	<i>Model predictive control</i>
PCC	Ponto de conexão comum

PI	Proporcional-integral
PID	Proporcional-integral derivativo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PSS	<i>Power system stabilizer</i>
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
SISO	<i>Single input – single output</i>
SMA	Sistema multi-agentes
STATCOM	<i>Static synchronous compensator</i>
SVC	<i>Static var compensator</i>
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TSC	<i>Thyristor switched capacitor</i>
UPFC	<i>Unified powerflow controller</i>
UTE	Usina Termelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
D	Coefficiente de amortecimento
δ	Posição angular do rotor
Δf	Varição de frequência
ΔP_c	Varição de carga ativa do sistema
ΔP_{set}	Potência de ajuste do controle
f	Frequência
H	Constante de inércia
J	Momento de inércia total do gerador e máquina motriz
km	Quilômetros
kV	Quilovolt
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
M	Horizonte de controle
MW	Megawatt
N	Horizonte de predição
n	Velocidade do motor
n_{cil}	Número de cilindros
P	Potência ativa
P_c	Potência demandada pela carga
\bar{P}_e	Potência elétrica
p_f	Número de polos
P_L	Parcela de potência não sensível à frequência da rede
\bar{P}_m	Potência mecânica
P_{perdas}	Perdas no processo de conversão
pu	Por unidade
Q	Potência reativa
R	Resistência

R_p	Droop
rpm	Rotações por minuto do rotor do gerador
S	Potência aparente
S_{base}	Potência base
$S_E[E_{FD}]$	Saturação da excitatriz
S_{MVA}	Potência ativa nominal da máquina
T_a	Torque acelerante
T_e	Torque eletromagnético
T_m	Torque mecânico
TWh	Terawatt hora
τ	Constante de tempo
τ_D	Tempo de atraso do motor
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de eixo direto de circuito aberto
V	Tensão
VA	Volt-ampére
ω_m	Velocidade angular do rotor
ω_0	Velocidade angular nominal do rotor
$\bar{\omega}_r$	Velocidade angular do rotor
ω_s	Velocidade síncrona
X	Reatância
Z	Impedância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVO.....	30
1.1.1	Objetivo geral	30
1.1.2	Objetivos específicos.....	31
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	31
1.2.1	PUBLICAÇÃO DECORRENTE DESTE TRABALHO	32
2	POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOMASSA RESIDUAL NA CIDADE DE JOINVILLE/SC.....	35
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS RESIDENCIAIS.....	35
2.2	RESÍDUOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	38
3	TECNOLOGIAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LIXO	41
3.1	INCINERAÇÃO.....	41
3.2	BIOGÁS DO LIXO	42
3.2.1	Infraestrutura para geração de energia com o biogás de aterro.....	46
3.2.1.1	Sistema de coleta	48
3.2.1.2	Tubulação de canalização	49
3.2.1.3	Planta de extração e tratamento do biogás	50
3.2.1.4	Planta para geração de energia elétrica.....	52
3.2.1.4.1	Motogeradores a gás.....	55
3.3	ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS.....	58
4	POTENCIAL ESTIMADO DO ATERRO SANITÁRIO DE JOINVILLE	61
4.1	PROGRAMA BIOGÁS.....	61
4.2	Dados para a estimativa da geração de metano no aterro sanitário	64
5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES	73
5.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	73
5.2	DEFINIÇÃO DE MICRORREDE.....	74
5.3	OPERAÇÃO EM MODO ILHADO	77
6	ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	81
6.1	ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	81
6.2	TIPOS DE CARGA COMUMENTE UTILIZADOS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE.....	83
7	CONTROLE EM MICRORREDES	85
7.1	DESAFIOS DO CONTROLE EM MICRORREDES	85
7.1.1	Característica <i>droop</i> em microrredes	87
7.1.2	Formas de operação para geradores síncronos distribuídos	91
7.1.2.1	Operação como barra PQ	91

7.1.2.2	Operação como barra PV	92
7.1.2.3	Operação como barra swing (slack)	92
7.2	Tipos de elementos em uma microrrede.....	92
7.3	Hierarquia de controle em uma microrrede.....	94
7.3.1	Controle descentralizado	95
7.3.2	Controle centralizado (hierárquico).....	95
7.3.2.1	Controle local ou primário (MC e LC).....	96
7.3.2.1.1	Controle secundário ou central (MGCC).....	97
7.3.2.2	Gerenciamento e controle do sistema de distribuição (DMS) ou controle terciário	98
8	SISTEMAS DE CONTROLE PARA GERADORES SÍNCRONOS.....	99
8.1.1	Reguladores de velocidade.....	99
8.1.1.1	Controle de velocidade integral ou isócrono	100
8.1.1.2	Controle de velocidade com droop	101
8.1.1.3	Controle de velocidade com filtro washout	102
8.1.2	Reguladores de tensão com compensação de realimentação	104
8.1.3	Controle preditivo baseado em modelo no espaço de estados aplicado ao controle de geradores	108
8.1.3.1	Caso MIMO.....	112
8.1.3.2	Restrições	112
8.1.3.3	Sintonia dos parâmetros	114
8.1.3.4	Aplicação do MPC no controle de máquinas	114
9	CARACTERÍSTICAS DA MICRORREDE UTILIZADA NOS ESTUDOS	115
9.1	GERADORES DISTRIBUÍDOS.....	116
9.1.1	Regulação de velocidade.....	117
9.1.1.1	Modelo dinâmico do motor.....	118
9.1.1.2	Atuador da válvula de combustível	119
9.1.2	Gerador síncrono	120
9.1.3	Regulação de tensão	120
9.2	PROJETO DOS CONTROLADORES.....	121
9.2.1	Regulador de velocidade com controle integral ou isócrono.....	121
9.2.2	Regulador de velocidade com <i>droop</i>	123
9.2.3	Regulador de velocidade com controle <i>washout</i>	123
9.2.4	Regulador de tensão.....	124
9.2.5	Regulador de frequência com MPC	125
9.2.6	Regulador de frequência e tensão com MPC	128
10	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EM UMA MICRORREDE COM GERADOR SÍNCRONO DISTRIBUÍDO	131
10.1.1	Cenário 1: operação com controle isócrono.....	133
10.1.2	Cenários 2 a 5: comparação entre as diferentes técnicas de regulação	134
10.1.2.1	Potências de saída dos geradores.....	135

10.1.2.2	Desvio de frequência.....	137
10.1.2.3	Tensão	138
11	CONCLUSÕES	141
11.1	Trabalhos futuros.....	142
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
	APÊNDICE A – USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS DE RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL	153
	APÊNDICE B – ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ...	155
B.1	CONCEITO DE ESTABILIDADE.....	155
B.2	ESTABILIDADE ANGULAR OU SÍNCRONA	157
B.2.1	Equação de Oscilação da Máquina Síncrona	158
B.2	ESTABILIDADE DE TENSÃO	160
B.3	ESTABILIDADE DE FREQUÊNCIA	162
	APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DE CARGAS UTILIZADAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE	165
C.1	CARGAS ESTÁTICAS	165
C.1.1	Modelo Exponencial.....	166
C.1.2	Modelo Polinomial.....	167
C.1.3	Modelo Linear	168
C.1.4	Modelo Compreensivo	169
C.1.5	Modelo Estático de Motor de Indução	169
C.1.6	Cargas com Interface com Elementos de Eletrônica de Potência ...	170
C.2	CARGAS DINÂMICAS	171
	APÊNDICE D – CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	173
D.1	CONTROLE DE FREQUÊNCIA E POTÊNCIA ATIVA	174
D.1.1	Fundamentos da regulação de velocidade em máquinas síncronas	
	177	
<i>D.1.1.1</i>	<i>Controle de velocidade isócrono (controle primário)</i>	<i>179</i>
<i>D.1.1.2</i>	<i>Controle com droop (controle primário)</i>	<i>179</i>
<i>D.1.1.3</i>	<i>Controle secundário</i>	<i>184</i>
D.2	CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA.....	185
D.2.1	Controle automático de tensão	187
D.2.2	Droop de tensão	189
	APÊNDICE E – DADOS TÉCNICOS DO MOTOGERADOR SÍNCRONO	191
E.1.	DADOS GERAIS DO CONJUNTO	191
E.2.	DADOS DO MOTOR	191
E.3.	DADOS DO GERADOR SÍNCRONO	191

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a forma de se entender e utilizar a energia vem mudando consideravelmente, quando comparada ao período de início da industrialização (WEC, 2013).

Embora a evolução econômica continue associada ao aumento da demanda por energia elétrica, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a segurança no fornecimento de energia está fazendo com que políticas sejam criadas com o intuito de melhorar a eficiência energética e incentivar a redução da participação de combustíveis fósseis na matriz (OECD/IEA(1), 2014).

Analisando-se estatísticas de produção e consumo de energia, como as disponíveis no documento *Key World Energy Statistics* (OECD/IEA(2), 2014), da *International Energy Agency - IEA*, (organização internacional, com 29 países membros, autora de diversos estudos no setor de energia), é possível comprovar o óbvio: o consumo de energia (primária e elétrica) está diretamente relacionado com o desenvolvimento econômico. Grandes potências econômicas consomem grande quantidade de energia decorrente de seu nível de produção industrial e do poder de compra/consumo de sua população.

Também de acordo com a IEA, a demanda mundial por energia deve aumentar em aproximadamente 37% até 2040 (OECD/IEA(1), 2014) já considerando que nos próximos anos o crescimento populacional e econômico não será pautado em grandes taxas de aumento de consumo, como aconteceu nas últimas décadas, principalmente devido ao crescimento de China e Índia (BP, 2015).

Para garantir o suprimento desta demanda, apesar de o petróleo ainda continuar participando de forma importante e crescente na matriz energética mundial, haverá um crescimento significativo de outras fontes, tais como o gás natural e as renováveis (OECD/IEA(2), 2014). Neste sentido, observa-se que o setor elétrico irá contribuir de forma significativa nesta transformação, já que estudos indicam que fontes de energia renovável, como biocombustíveis, solar e eólica, vão ultrapassar a energia nuclear e hidroelétrica em representatividade na matriz energética mundial nas próximas décadas (BP, 2015), muito devido à crescente preocupação em diminuir o impacto do setor de energia no aquecimento global.

Quando se analisa especificamente o caso do Brasil, verifica-se que a matriz energética já possui uma grande participação de renováveis, principalmente devido à geração de energia elétrica por centrais hidráulicas e ao grande uso da cana-de-açúcar para a produção de etanol e de energia elétrica (em usinas de cogeração à biomassa).

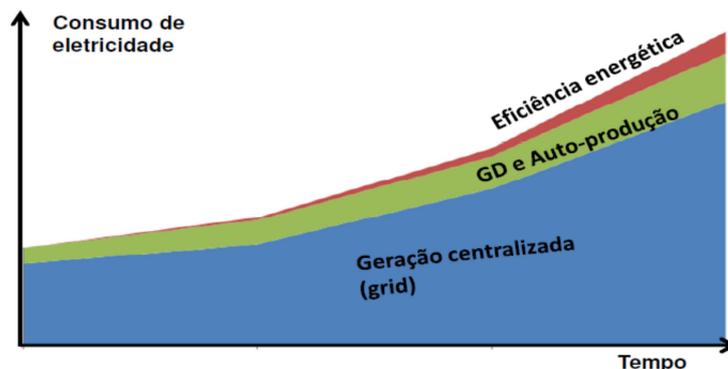
Embora possua uma grande parcela de energia renovável em sua matriz, verifica-se pelos dados do Balanço Energético Nacional - BEN de 2017 que o país é muito dependente da geração de energia por hidroelétricas, responsáveis pelo fornecimento de 68,1% da eletricidade do país (EPE, 2017). Esta condição persiste mesmo depois da crise hídrica de 2014 e da inserção de outras fontes nos últimos anos, como a eólica e biomassa. Esta dependência traz diversos problemas para a segurança do setor elétrico, visto que mais da metade da demanda é garantida por uma fonte que depende de fatores climáticos.

Pode se considerar, desta forma, que a expansão do parque gerador de energia elétrica com base em hidroelétricas é uma alternativa que já não se mostra tão viável. Problemas com falta de chuva, que fizeram baixar os níveis dos reservatórios de muitas usinas, aliados ao impacto socioambiental gerado pelos grandes empreendimentos (como Belo Monte) e à exigência de grandes investimentos em linhas de transmissão, visto que os melhores aproveitamentos energéticos geralmente estão longe dos centros consumidores, estão fazendo com que o Estado e os investidores do setor busquem soluções alternativas às grandes hidroelétricas. Também contribui para este cenário o fato de a maior parte do potencial hidroelétrico Brasileiro já estar inventariado (aproveitamentos disponíveis estudados nos níveis de inventário, viabilidade e projeto básico) ou já aproveitado, não deixando muito espaço para novos investimentos nesta fonte.

As projeções do governo brasileiro para atendimento da demanda futura consideram essencial a participação da oferta descentralizada de energia, principalmente a elétrica em pequena e média escala, tanto devido à crescente perda de capacidade de investimento do estado em grandes empreendimentos de geração e transmissão, quanto pela evolução tecnológica que tornou viável o aproveitamento de muitas fontes de energia elétrica em pequena e média escala (EPE(1), 2014). Em seus estudos de demanda de energia apresentados na nota técnica DEA 13/14, a EPE considera o consumidor final de energia como um agente importante para fechar a equação e atender a demanda de energia, com ações de

eficiência energética e, principalmente, atuando como agente gerador, na geração distribuída (de grande e pequeno porte) e autoprodução, como se pode observar no gráfico da Figura 1.

Figura 1 - Demanda de eletricidade e fontes de atendimento à demanda de energia



Fonte: BRASIL: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica DEA 13/14: Demanda de Energia 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2014

Estudos feitos como suporte para o Plano Nacional de Energia 2050 indicam que cerca de 5,7% da projeção de demanda de eletricidade deve ser atendida por geração distribuída (entendida como aquela localizada próximo ao consumidor final, cuja instalação objetiva o consumo próprio, com ou sem venda de excedente para a distribuidora local) (EPE(2), 2014).

Quando se fala em geração distribuída, principalmente no Brasil, país rico em recursos naturais, é importante considerar o potencial energético dos mais diversos tipos de biomassa (matéria orgânica utilizada como fonte de energia). O potencial energético da biomassa deve passar dos atuais 210 milhões de toneladas equivalentes de petróleo - tep (ano base 2013) para 450 ou 460 milhões de tep em 2050, segundo a EPE, dos quais mais de 50% serão de biomassa residual, ou seja, resíduos agrícolas, da pecuária e resíduos sólidos urbanos (EPE(1), 2014), que até pouco tempo atrás eram considerados somente como um problema para a sociedade.

Dentre as formas de obtenção de energia a partir de biomassa residual, a digestão anaeróbica, que tem como produto o biogás, é uma das que já possui tecnologia internacionalmente dominada e a custos competitivos. Em um aterro sanitário, um tipo de biogás é gerado naturalmente pela decomposição anaeróbica da parcela orgânica do resíduo sólido urbano (RSU). Este gás, cujo principal componente é o metano (21 vezes mais poluente que o dióxido de carbono, quando

se trata de efeito estufa), geralmente é queimado no caso de aterros sanitários controlados, para evitar um maior impacto ambiental (EPE(3), 2014)

Uma tecnologia já utilizada em outros países e que já tem exemplos no Brasil (duas usinas em São Paulo e uma em Santa Catarina) utiliza o gás do lixo como combustível para motores associados a geradores síncronos ou microturbinas para a geração de energia elétrica ou cogeração (eletricidade e calor). No Apêndice A são listados os empreendimentos registrados na ANEEL que geram energia a partir de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Sendo assim, pode-se considerar promissor o uso do gás do lixo no mercado de energia elétrica (EPE(1), 2014), principalmente depois da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, que exige que sejam estabelecidas metas para a reutilização dos resíduos gerados em todos os setores, obrigando os municípios a terem aterro sanitário. Desta forma, é possível viabilizar a construção do aterro com a possibilidade de se comercializar a energia produzida (no mercado livre ou pelo sistema de compensação de energia elétrica com a concessionária, por exemplo) e ainda obter receita com os créditos de carbono decorrentes da operação da usina.

Embora a conexão destas novas fontes de energia elétrica, na maioria das vezes próximas aos centros de consumo, seja de grande importância na diversificação da matriz energética, contribuindo com o suprimento da demanda e diminuindo a dependência do sistema com relação aos fatores climáticos, é muito importante que seja feita uma gestão e operação eficiente do sistema, de forma a evitar que a conexão destas novas fontes traga insegurança ao sistema elétrico.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Através deste trabalho a autora pretende contribuir com um maior entendimento sobre o potencial do uso de resíduos sólidos urbanos para a geração de energia elétrica de forma distribuída. Pretende também apresentar as tecnologias mais utilizadas atualmente para este tipo de geração.

Além disso, pretende-se introduzir o problema de controle de microrredes de energia e apresentar uma análise de algumas técnicas de controle convencionais e outras mais atuais para a regulação de velocidade e tensão de geradores síncronos distribuídos, tanto em paralelo quanto na operação isolada da rede.

1.1.2 Objetivos específicos

Os principais objetivos específicos deste trabalho são apresentados a seguir:

- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre sistemas de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para a geração de energia elétrica, tomando-se como base os dados de geração de resíduos da cidade de Joinville, estado de Santa Catarina;
- Considerando-se que este tipo de fonte de geração geralmente é localizada próxima aos centros de consumo, também será apresentada uma revisão bibliográfica sobre geração distribuída e microrredes, apresentando os desafios técnicos para o melhor aproveitamento deste tipo de geração para aumentar a confiabilidade do sistema, sem prejudicar a estabilidade da rede;
- Analisar algumas técnicas de controle de geradores síncronos existentes na literatura e mostrar como são feitos os ajustes para controladores convencionais (PI), *washout* e com controle preditivo baseado em modelo (MPC);
- Por último, realizar simulações de uma microrrede utilizando a ferramenta *SymPowerSystems* do *Matlab/Simulink* e comparar o desempenho dos geradores síncronos que alimentam esta microrrede com as diferentes técnicas de controle apresentadas.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Os capítulos seguintes desta dissertação estão organizados como segue.

No capítulo 2 é feita uma breve abordagem sobre a produção de resíduos sólidos na cidade de Joinville.

O capítulo 3 trata de tecnologias para a geração de energia a partir do lixo e dos principais elementos de uma usina de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado pelo lixo depositado em aterros sanitários.

No capítulo 4 são apresentados os cálculos para a estimativa do potencial de geração de energia no aterro sanitário de Joinville/SC.

O capítulo 5 traz a definição de microrredes, seus principais elementos e das formas de operação, dando ênfase à operação no modo ilhado, que hoje é proibida pela maioria das concessionárias, devido a questões de insegurança operacional, mas que poderia trazer grandes benefícios à operação e confiabilidade das redes.

O capítulo 6 é dedicado à teoria de estabilidade em sistemas de distribuição e as considerações que devem ser feitas em estudos de estabilidade em geração distribuída.

No capítulo 7 é feita uma abordagem teórica sobre as diferentes técnicas de controle utilizadas em microrredes.

No capítulo 8 é tratado sobre a teoria de projeto de controladores para a regulação de velocidade e tensão de máquinas síncronas.

O capítulo 9 apresenta detalhes da microrrede utilizada nas simulações feitas no *MATLAB/Simulink*, assim como o projeto dos controladores utilizados no sistema motogerador síncrono estudado.

No capítulo 10 são apresentados os resultados das simulações realizadas na microrrede proposta, tais como as curvas de potência, tensão e corrente de cada cenário proposto, permitindo que seja feita uma comparação das soluções apresentadas.

Por último, o capítulo 11 se dedica às conclusões e revisão das contribuições da dissertação, assim como apresenta sugestões para trabalhos futuros.

1.2.1 PUBLICAÇÃO DECORRENTE DESTE TRABALHO

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa foi publicado o seguinte artigo técnico:

- MIRANDA, A. C. A; PRIOSTE, F. B. **Controle Preditivo de Motogerador Síncrono de Médio Porte Utilizado em Sistema de Geração Distribuída.**

In: XVII Encuentro Regional Iberoamericano del Cigré - ERIAC, Ciudad del Este, Paraguai , 2017.

Este artigo foi considerado como o terceiro melhor entre 33 trabalhos de 7 países apresentados no grupo C2 – *Operación y Control del Sistema* do ERIAC.

2 POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOMASSA RESIDUAL NA CIDADE DE JOINVILLE/SC

Neste capítulo pretende-se discorrer sobre as possíveis fontes para geração de energia elétrica utilizando-se como combustível a biomassa residual produzida na cidade de Joinville/SC.

Em uma cidade industrializada como Joinville/SC há várias fontes de biomassa que poderiam ser utilizadas para obtenção de energia elétrica, aliando aumento da oferta de energia e melhora na destinação dos resíduos produzidos pela população e por processos produtivos.

Serão apresentadas algumas fontes de biomassa orgânica que poderiam gerar biogás para a produção de energia elétrica de forma distribuída na cidade. É dado foco ao biogás gerado em locais que são geridos indiretamente pelo poder público municipal, por meio de concessões: aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS RESIDENCIAIS

Segundo o Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville - Ippuj (2016), os serviços de coleta de resíduos domiciliares abrangem 100% da área urbana de Joinville, contando também com oito roteiros de coleta na área rural. Na Tabela 1 é possível verificar os serviços de coleta de resíduos na cidade e sua evolução em um período de seis anos, a partir de 2010.

O manejo dos resíduos sólidos domiciliares do município de Joinville cabe à empresa Ambiental Limpeza Urbana e Saneamento LTDA, detentora de um contrato de concessão com o município. Segundo a Fundação Municipal do Meio Ambiente de Joinville - Fundema (2013), a concessionária é responsável pela coleta regular, carga e descarga dos resíduos sólidos domiciliares, além da operação, tratamento, controle tecnológico, ampliação e encerramento do aterro sanitário da cidade.

O aterro sanitário de Joinville está localizado em um terreno do governo municipal na Zona Industrial Norte, na Rua dos Bororós. Neste aterro são depositados os resíduos da coleta de lixo domiciliar, dos serviços gerais de limpeza

da cidade, de resíduos sólidos especiais (móveis inservíveis e animais mortos) e dos serviços de saúde do município de Joinville. O lixo domiciliar do município de Balneário de Barra do Sul, situado a 40 km de Joinville (FUNDEMA, 2013), também é depositado neste mesmo aterro. Os resíduos oriundos da coleta seletiva são encaminhados a galpões de triagem localizados em diversas partes do município.

Na Figura 2 há uma imagem atualizada do aterro, de 2017, obtida na página *Google Maps*. Nela é possível verificar as células que já foram encerradas e que, segundo o IPPUJ (2016), tinham capacidade para 2.609.226,81 m³ de detritos, e região onde atualmente os rejeitos estão sendo depositados, no canto inferior esquerdo da imagem.

De acordo com a Fundema (2013), o aterro foi aberto em 1982, em um local que funcionava como lixão. Em maio de 2013, em respeito à Lei Municipal 7287/12, o aterro sanitário deixou de receber resíduos de geradores com produção diária maior que 120 litros (IPPUJ, 2016).

Uma das empresas que faz a coleta e destinação de resíduos de indústrias e particulares cuja produção ultrapasse o determinado pela lei é Essencis Soluções Ambientais, do Grupo Solví, que possui uma Unidade de Valorização Sustentável (denominação dada pela própria empresa) na mesma região do aterro sanitário de Joinville. Nesta unidade, concedida em 1999 pelo município de Joinville para o tratamento e destinação final de resíduos industriais, são depositados os resíduos industriais de empresas de Joinville e de outras cidades de Santa Catarina e até de outros estados (FUNDEMA, 2013).

Tabela 1 - Demonstração dos resíduos sólidos coletados em Joinville segundo o tipo (t/mês)

TIPO	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Coleta Domiciliar (t/mês)	9.490	9.727	9.855	10.628	10.543	11.031
Coleta de Resíduos Sólidos Especiais1 (t/mês)	39	74	76	99	111	154
Coleta de Resíduos Sólidos Especiais (solicitações atendidas/mês)	209	451	651	829	1.080	1.418
Coleta de Resíduos dos Serviços Gerais Limpeza 2 (t/mês)	781	663	343	440	889	781
Coleta Seletiva t/mês	567	495	920	991	974	984
Coleta de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde (t/mês)	43	48	59	70	73	80
Coletas Indústrias e particulares3 (t/mês)	1.798	743	1.938	601	-	-
Resíduos de Terceiros4					338	26
TOTAL	12.927	12.201	13.842	13.658	14.008	13.490

Fonte: IPPUJ, 2016

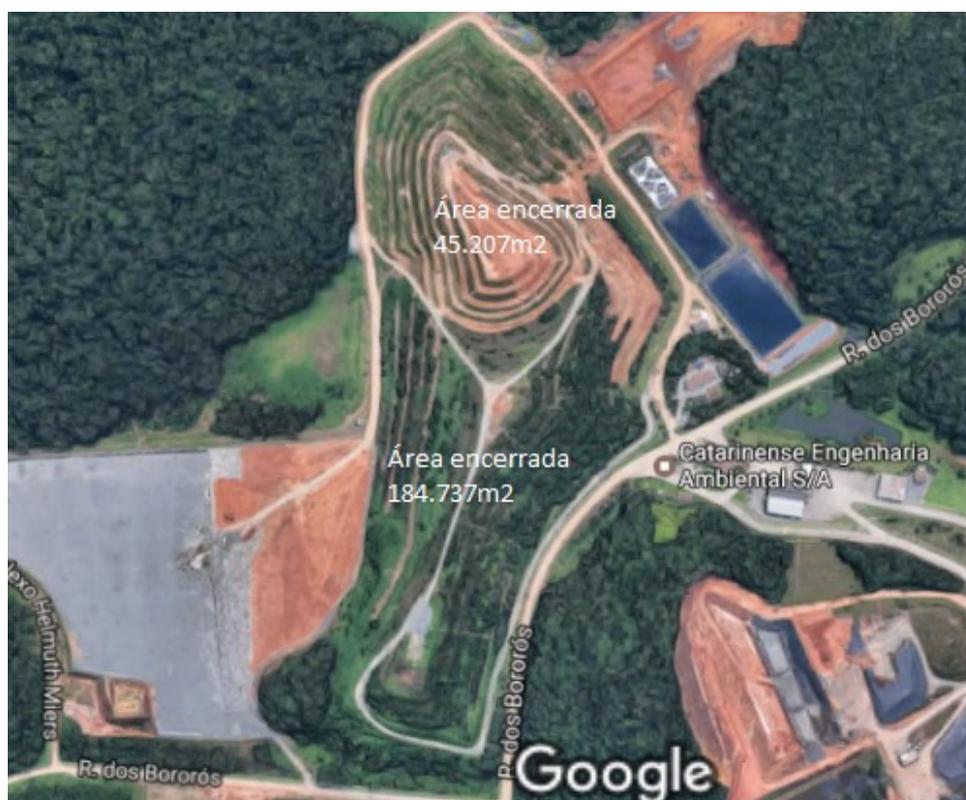
Na Tabela 1 é apresentado um histórico da coleta de lixo na cidade de Joinville no período de 2010 a 2015. A partir deste histórico e da capacidade e tempo de vida útil das diferentes áreas do aterro apresentadas na Tabela 2 já é possível fazer uma estimativa sobre o potencial de geração de energia elétrica no Aterro Sanitário da Cidade de Joinville. No capítulo 4 é apresentada uma estimativa teórica do potencial de geração de energia elétrica do aterro sanitário da cidade de Joinville.

Tabela 2 – Característica do Aterro Sanitário Municipal de Joinville

Descrição	Área (m ²)	Capacidade (m ³)	Tempo de vida útil
Área encerrada	184.737	2.259.497,80	Encerrado
Área emergencial	45.207	349.729,01	Encerrado
Área I	106.553	881.434,35	9 anos
Área II	130.447	1.256.033,47	8 a 10 anos
Área para depósito	237.000	2.137.467,82	18 a 22 anos
Coleta de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde (t/mês)	43	48	59
Coletas Indústrias e particulares (t/mês)	1.798	743	1.938
Resíduos de Terceiros			
TOTAL	12.927	12.201	13.842

Fonte: IPPUJ, 2016

Figura 2 - Aterro sanitário de Joinville



Fonte: Google Maps. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/@-26.2445998,-48.8995538,1053m/data=!3m1!1e3>>. Adaptado pela autora.

2.2 RESÍDUOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Outra fonte de biomassa rica em matéria orgânica e, conseqüentemente, em metano, e que já é bastante utilizada para a geração de energia em outros países é o esgoto doméstico.

Infelizmente em Joinville há uma grande deficiência na cobertura da rede de esgoto, porém para os locais onde não há cobertura, a legislação exige que os municípios adotem medidas de tratamento individual, com a adoção de sistemas de fossa séptica e filtro anaeróbico.

Para que a solução da fossa séptica seja eficiente, periodicamente deve ser feita a limpeza do sistema por meio de empresas especializadas, através de caminhões limpa-fossa. Os resíduos oriundos da limpeza de fossas são destinados à Estação de Tratamento de Esgoto Jarivatuba, da Companhia Águas de Joinville (FUNDEMA, 2013).

Atualmente a cidade de Joinville conta com 4 Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs: Jarivatuba, Profipo, Morro do Amaral e Espinheiros. As características básicas destas ETEs são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Dados das Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs em funcionamento na cidade de Joinville.

ETE	Localização	Vazão média de projeto (l/s)	D.B.O. ¹ médio ² (mg/l)
Jarivatuba	R. Rio Velho - Paranaguamirim	400 (atualmente trabalha na vazão média de 83 l/s)	133
Espinheiros	R. José Silveira Lopes - Espinheiros	21	300
Profipo	R. Corumbá, bairro Santa Catarina	2,3	290
Morro do Amaral	Av. Kurt Meinert, região do Morro do Amaral	1,5	438

Fonte: elaborado pela autora (2017), com base em informações disponíveis no sítio da Agência Municipal de Regulação dos Serviços de Água e Esgoto de Joinville, a AMAE.

1 – Demanda Bioquímica de Oxigênio, DBO, é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. É um indicador da quantidade de matéria orgânica na água (CETESB, 2009).

2 – O valor do DBO, em mg/l, foi obtido pela média dos valores de 12 medições feitas na entrada da ETE (antes do tratamento) entre os períodos de outubro/2016 a março/2017 (QMC, 2017)

Embora os efluentes sanitários de estações de tratamento de esgoto contenham uma carga orgânica que poderia ser convertida em gás, o que já é feito

em algumas partes do mundo, a obtenção de energia a partir destes não será o foco deste estudo. Conforme afirma Tolmasquim (2016), o nível de diluição da matéria orgânica é relativamente elevado e o potencial energético é relativamente inferior ao dos resíduos sólidos urbanos, ainda mais se considerando que o nível de saneamento da cidade de Joinville é baixo (somente cerca de 30% do esgoto da cidade é tratado em estações).

Registra-se, porém, que o uso de biogás em estações de tratamento de esgoto colaboraria com a descentralização da oferta de energia, além de promover economia no processo de tratamento de esgoto, aumentando a viabilidade de implantação de serviços de saneamento básico (ARCADIS TETRPLAN, 2010). As empresas de saneamento poderiam adotar sistemas de ciclo combinado, com a utilização dos gases de exaustão para aquecimento dos digestores e do secador de lodo, o que aumentaria a eficiência do processo ao mesmo tempo em que contribuiria com a redução do custo de operação (CENBIO, 2010 apud ARCADIS TETRPLAN, 2010). A energia elétrica gerada, além de alimentar os processos internos, poderia ser comercializada ou compartilhada, caso houvesse excedente.

3 TECNOLOGIAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LIXO

Neste capítulo abordam-se algumas formas de geração de energia a partir do lixo. São basicamente duas as formas mais utilizadas para se obter energia a partir de resíduos sólidos urbanos – RSU: incineração e digestão anaeróbica em aterros sanitários.

Por ser uma alternativa que já está sendo utilizada no Brasil, será dada ênfase às tecnologias que utilizam o biogás gerado naturalmente no processo de decomposição anaeróbica do lixo para alimentar plantas térmicas para a geração de energia elétrica.

3.1 INCINERAÇÃO

Segundo Pavan (2010), a prática de incineração de resíduos vem desde os primórdios da civilização humana, quando era feita de forma rudimentar. O primeiro incinerador da era moderna foi construído na Inglaterra, em 1854 e aproximadamente meio século depois começaram os primeiros experimentos para se gerar eletricidade a partir da energia disponibilizada pelo processo de incineração (PDH ENGINEER, 2007, apud PAVAN, 2010).

Segundo Tchobanoglous e Kreith (2002) o termo incineração adquiriu uma má conotação devido à forma na qual era realizada antigamente, com incineradores de baixa tecnologia. Hoje o termo “*waste-to-energy combustion*” (combustão de lixo para energia, em tradução livre) começou a ser utilizado no lugar de incineração para se referir aos processos mais modernos de incineração dos resíduos cujo processo de reciclagem não é viável economicamente, para geração de energia.

Atualmente as técnicas de incineração de resíduos estão muito mais modernas e têm incorporado sistemas mais eficientes de recuperação de energia e tratamento dos gases gerados pela combustão, tornando o processo mais viável economicamente e menos agressivos ao meio ambiente. Esta evolução está permitindo que países com pouca área disponível para a construção de aterros, como Japão e Suíça, tenham um grande número de unidades geradoras em operação e estejam investindo cada vez mais nesta fonte (CEWEP, 2007, apud

PAVAN, 2010), já que após passar pelo processo de incineração, o volume de lixo é reduzido em mais de dez vezes (TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002).

Assim como ocorre na produção de biogás para geração de energia elétrica, a composição dos resíduos tem grande influência sobre o poder calorífico e, conseqüentemente, sobre o potencial de geração de energia da incineração dos resíduos. De acordo com Tchobanoglous e Kreith (2002) o potencial calorífico do lixo bruto pode variar de 40 a 60% do potencial do carvão.

Em resumo, um dos maiores benefícios da incineração do lixo para a geração de energia elétrica e térmica é a grande redução do volume de resíduos, o que pode ser bastante significativo em grandes metrópoles com pouco espaço disponível para o depósito de lixo em aterros. Por outro lado, uma das maiores limitações de uso deste tipo de recurso está no seu alto custo, muito associado ao nível de sofisticação exigido para uma operação segura da planta, de forma a não oferecer nenhum risco à saúde das pessoas e ao meio ambiente (TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002).

De acordo com Tolmasquim (2016), a fração orgânica bruta dos resíduos sólidos urbanos no Brasil é de cerca de 60% do volume. Considerando-se o alto teor de umidade da fração orgânica, dos resíduos sólidos urbanos (cerca de 50%), a incineração se torna pouco eficiente.

3.2 BIOGÁS DO LIXO

Outra fonte de energia derivada do lixo e que já está começando a ser bastante utilizando em outros países é o biogás gerado por processos naturais (físicos, químicos e microbiológicos) que ocorrem com o lixo, devido a sua natureza orgânica. Os resíduos aterrados inevitavelmente geram gases em decorrência de sua composição anaeróbica, e o principal composto deste gás é o metano, que pode ser coletado para a produção de energia elétrica e térmica.

Tchobanoglous e Kreith (2002) conceituam aterros sanitários como grandes reatores bioquímicos, com o lixo e a água como as principais entradas do sistema e com o biogás de lixo e percolato como principais saídas. Sistemas de controle de gás, que devem ser utilizados em aterros independentemente do aproveitamento do

gás para geração de energia, servem para prevenir a liberação destes gases altamente poluentes à atmosfera.

Apesar de o gás gerado pelo lixo ter cerca de metade do potencial calorífico do gás natural encanado, não se pode ignorar seu potencial para gerar energia, visto que diariamente a população gera toneladas de lixo que podem ser transformados em gás combustível a uma taxa de 0,05 a 0,40 m³ por quilograma de lixo depositado em um aterro sanitário (HAM, 1989, apud WORLD BANK, 2003).

Como os processos que geram o biogás são sensíveis às condições ambientes, existe uma série de fatores naturais e forçados pelo homem que podem refletir na taxa de produção do gás (HAM, 1989, apud WORLD BANK, 2003). Fatores que influenciam na composição e taxa de produção de gás são: teor de umidade, de nutrientes e de bactérias, nível de pH, temperatura, tipo (composição), densidade e idade do lixo, além do projeto e plano de operação específico do aterro (ENVIRONMENT AGENCY, 2004).

Conforme Tabela 4, o biogás de aterro é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

Tabela 4 – Constituição típica do gás de aterro

Componente	Percentual (base seca)
Metano (CH ₄)	45-60
Dióxido de Carbono (CO ₂)	40-60
Nitrogênio (N ₂)	2-5
Oxigênio (O ₂)	0,1-1,0
Amônia (NH ₃)	0,1-1,0
Sulfetos, dissulfetos, mercaptanos	0-1,0
Hidrogênio	0-0,2
Monóxido de Carbono (CO)	0-0,2
Demais componentes	0,01-0,6

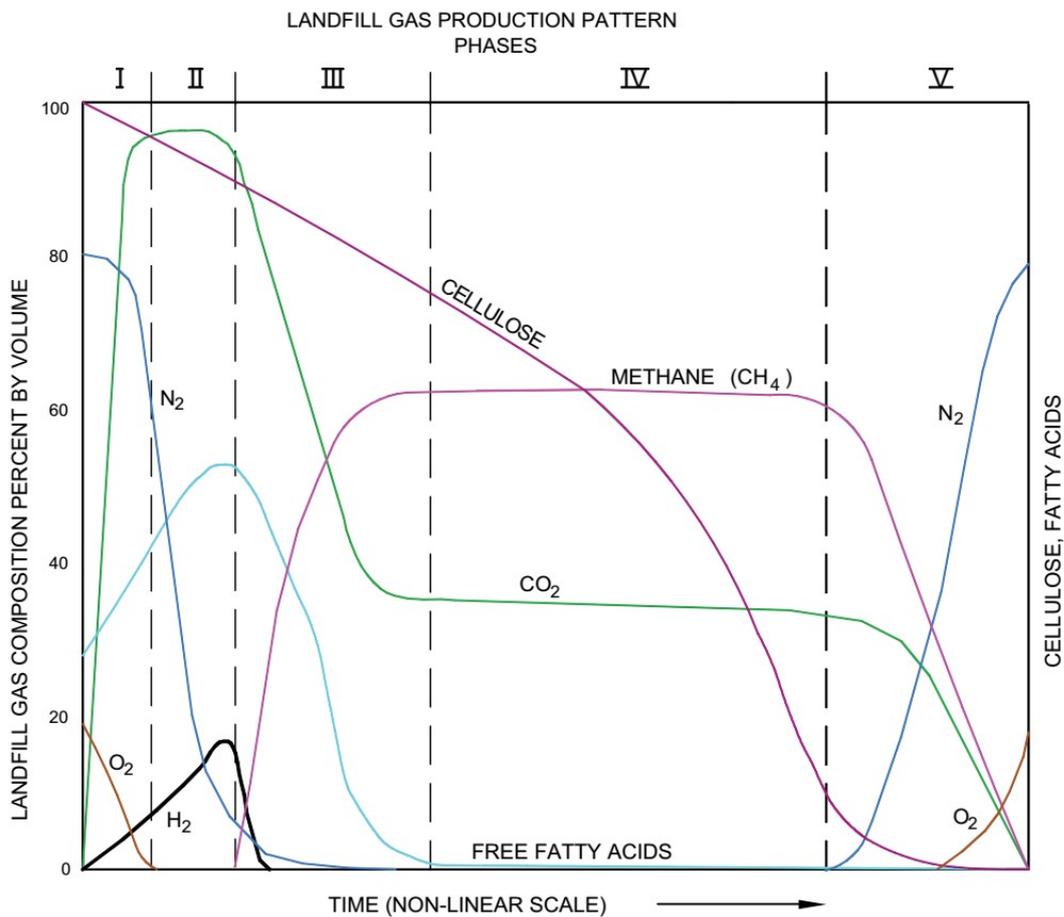
Fonte: elaborado pela autora (2017), com em tabela disponível em Tchobanoglous e Kreith (2002)

A geração dos gases no aterro é dividida em basicamente cinco fases, conforme Figura 3. Estas fases podem durar muitos anos, inclusive após o fechamento do aterro (fim da deposição de lixo). Durante a fase IV é gerado metano a uma razão de 40 a 60% do volume do gás (MC BEAN, 1995, apud WORLD BANK, 2003).

Na referência Tchobanoglous e Kreith (2002) constam mais detalhes técnicos dos processos bioquímicos que ocorrem em cada uma das fases de produção de biogás do lixo.

O metano liberado por aterros sanitários já foi um dos grandes responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa no mundo, representando cerca de 20% das emissões de metano causadas pelo homem no mundo (IPCC, 1999, apud WORLD BANK, 2003). Estas emissões podem ser reduzidas capturando-se o gás produzido e queimando-o em *flares*, em alta temperatura, convertendo o metano em dióxido de carbono (cerca de vinte vezes menos poluente que o metano) e vapor d'água (WORLD BANK, 2003). Esta alternativa de se queimar o metano já vem sendo utilizada em muitos aterros sanitários no Brasil, para diminuir seu impacto negativo no meio ambiente.

Figura 3 - Fases de formação de gases em um aterro sanitário.



PHASES	CONDITION	TIME FRAME - TYPICAL
I	AEROBIC	HOURS TO 1 WEEK
II	ANOXIC	1 TO 6 MONTHS
III	ANAEROBIC, METHANOGENIC, UNSTEADY	3 MONTHS TO 3 YEARS
IV	ANAEROBIC, METHANOGENIC, STEADY	8 TO 40 YEARS
V	ANAEROBIC, METHANOGENIC, DECLINING	1 TO 40+ YEARS
TOTAL		10 TO 80+ YEARS

Fonte: FARQUAR AND ROVERS, 1973, apud WORLD BANK, 2003

Com o uso de tecnologias adequadas e um cuidadoso programa de manutenção é possível transformar o gás gerado em aterros sanitário de um passivo ambiental a um ativo para geração de riquezas, que vão desde a produção de energia elétrica e térmica à comercialização de créditos de carbono.

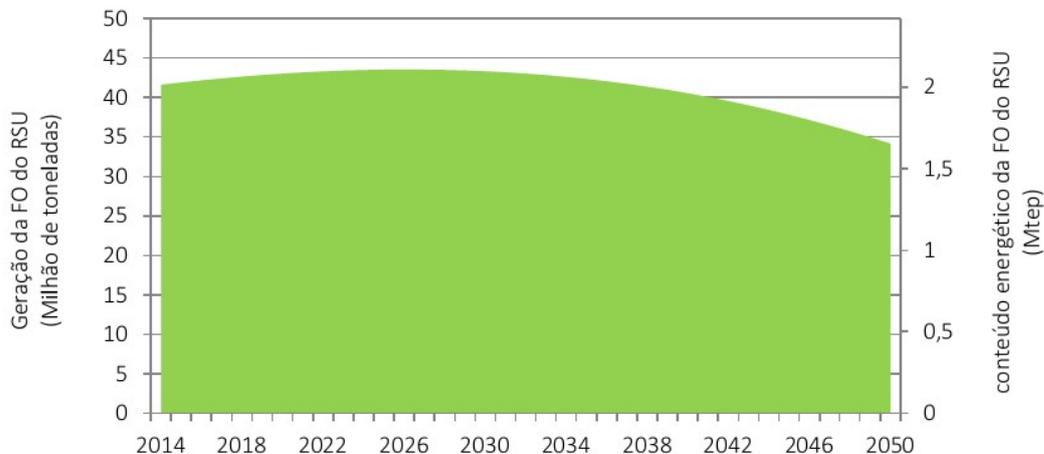
Uma característica interessante é que à medida que se aumenta coleta seletiva e a triagem de materiais recicláveis, considerados inertes, do lixo urbano que é depositado nos aterros sanitários, altera-se a gravimetria dos depósitos a favor do material orgânico e, conseqüentemente, aumenta-se o potencial de geração de biogás (ARCADIS TETRPLAN, 2010). Pode-se concluir, portanto, que a redução do volume do lixo pela separação de materiais recicláveis não prejudica a produção de biogás, ao contrário, acaba aumentando a eficiência de toda cadeia de reuso dos resíduos sólidos urbanos, visto que a reciclagem é reconhecidamente um método de grande eficiência energética (a energia gasta para reciclar é menor que a que se gasta para produzir o material do zero).

Por se tratar de uma tecnologia já utilizada no Brasil e que permite o uso do biogás já que está sendo gerado naturalmente pelo processo de decomposição do lixo já depositado em aterros sanitários em funcionamento, neste trabalho será dado maior enfoque ao processo de geração de energia a partir do biogás de aterro.

No gráfico da Figura 4 é apresentada uma projeção feita em Tolmasquim (2016), levando em consideração a projeção de crescimento populacional e econômico até 2050 e considerando-se um fator de metanização¹ de 55 Nm³ de metano e um conteúdo energético de 0,0484 tep (toneladas equivalentes de petróleo), para cada tonelada de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.

¹ A unidade utilizada para o fator de metanização pelo autor Tolmasquim (2016) é Nm³ CH₄, que significa “Normal metro cúbico de metano”. Quando se fala em volume de gases, como a temperatura e a pressão têm influencia sobre seu valor, criou-se a expressão Nm³, que indica a condição padrão utilizada de 1 atm de pressão (nível do mar), temperatura de 273K (ou 0°C) e 0% de umidade relativa (Fonte: HIRO, Hideo. **O compressor de gás é medido em volume ou massa?** Disponível em ftp://ftp.mecanica.ufu.br/LIVRE/SCHP/arquivos/compressor_ar_medido_ed57.pdf. Acesso em 12/09/17)

Figura 4 - Projeção da geração e do conteúdo energético da fração orgânica (FO) dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil



Fonte: Tolmasquim (2016)

Considerando-se que 1 tep equivale a 11630 kWh, projeta-se para 2050, quando a curva de energia disponível já está descendente devido à expectativa de redução de produção de lixo *per capita*, a disponibilidade de cerca de 19,2 TWh de energia do biogás produzido pela digestão anaeróbica dos resíduos sólidos produzidos pelo brasileiro.

Embora seja totalmente utópico se pensar em efetivamente aproveitar toda esta quantidade de energia proveniente do lixo, é inegável que se trata de um grande potencial a ser aproveitado.

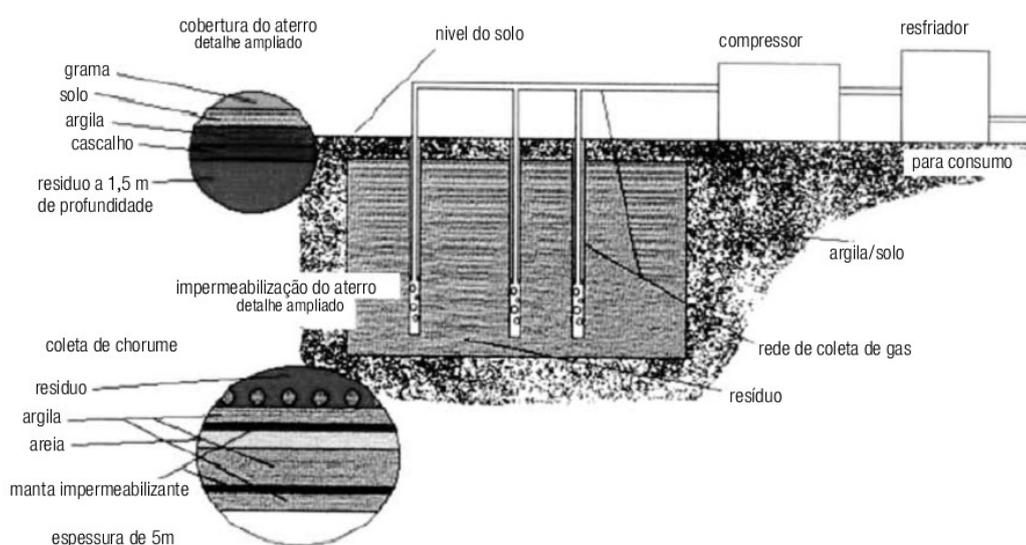
3.2.1 Infraestrutura para geração de energia com o biogás de aterro

O gás gerado nos aterros sanitários pode ser convertido em energia elétrica através do uso de turbinas ou microturbinas a gás, motores de combustão interna ou ainda na forma de biogás para queima direta (encanado) ou ainda como combustível veicular. A infraestrutura básica para um sistema que permita o uso do gás para geração de energia compreende (PAVAN, 2010):

- Sistema de coleta;
- Tubulação de canalização;
- Planta de extração e tratamento do biogás (combustível);
- Planta para geração e/ou utilização da energia.

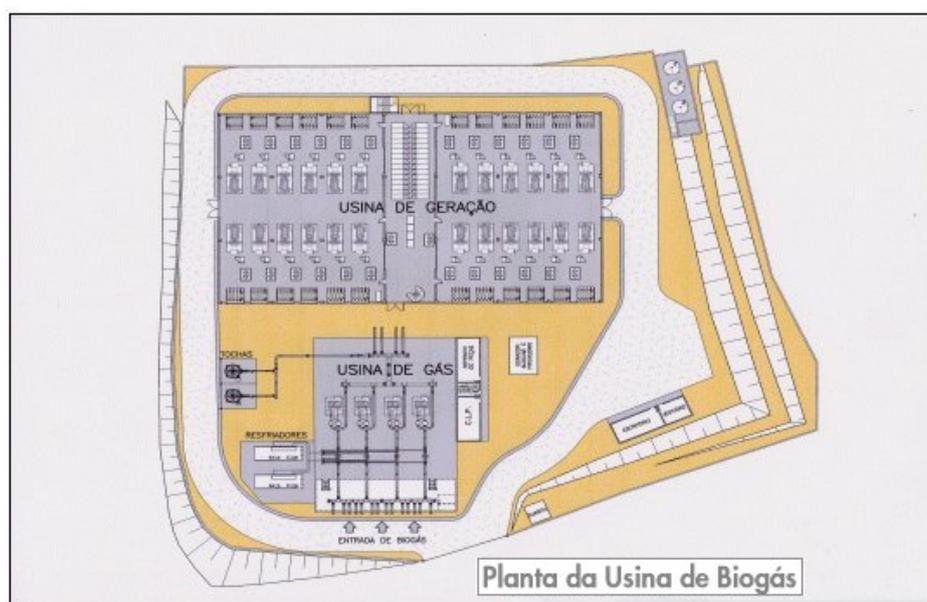
Na Figura 5 está representado um esquema básico de coleta do gás de aterro para a geração de energia elétrica. Na Figura 6 é apresentado um esquemático de uma planta para tratamento do gás para posterior utilização para geração de energia elétrica, tomando-se como base o *layout* da usina do Aterro Sanitário de Bandeirantes, em São Paulo, gerido pela empresa Biogás Ambiental S/A.

Figura 5 - Sistema de recuperação de biogás de aterro utilizando poços verticais



Fonte: ALVES, João Wagner Silva. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos.** Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, 2010.

Figura 6–Exemplo de planta da usina de biogás e de geração de energia



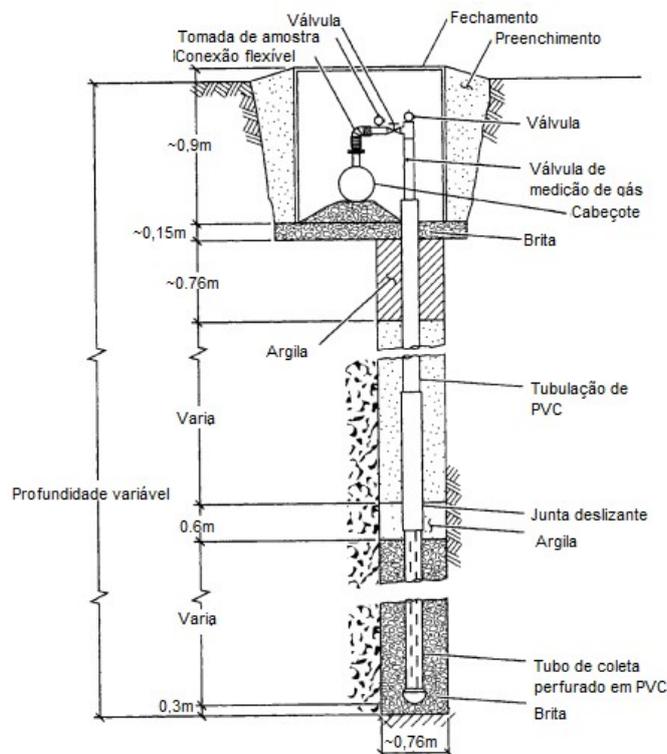
Fonte: Fotos da UTE-Bandeirantes da empresa Biogás Energia Ambiental S/A. Disponível em: <http://www.biogas-ambiental.com.br/planta.htm>. Acesso em: 02 mai. 2017.

3.2.1.1 Sistema de coleta

Para a coleta do gás no aterro geralmente é utilizada uma rede de poços de extração verticais (como o representado na Figura 5 e detalhado na Figura 7) e/ou trincheiras horizontais (Figura 8) (WORLD BANK, 2003). Os poços verticais geralmente são instalados após o fechamento de uma célula do aterro, como indicam Tchobanoglous e Kreith (2002), e servem tanto para captar o gás para geração de energia quanto para controlar o movimento do gás para propriedades adjacentes.

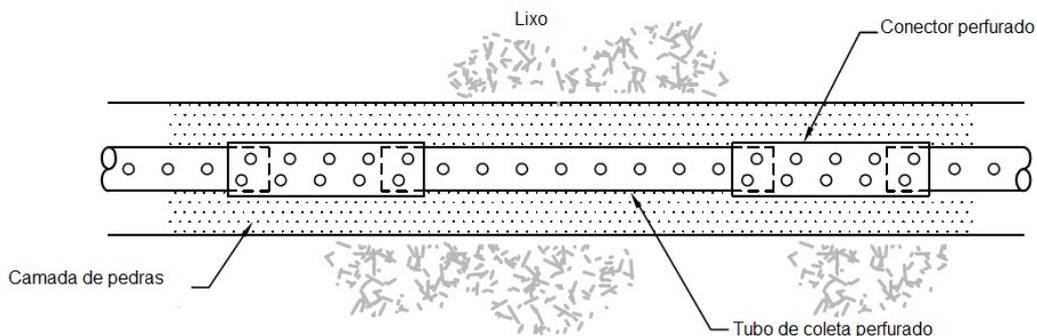
Também de acordo com Tchobanoglous e Kreith (2002), a coleta do biogás pode ser feita de forma ativa ou passiva. Nos sistemas ativos são utilizados equipamentos (como compressores) para induzir vácuo na rede de coleta e, desta forma, controlar o fluxo de gás. Nos sistemas passivos a própria pressão do gás é utilizada para direcionar o fluxo gás até a planta. Na bibliografia citada é possível conhecer maiores detalhes de ambos os sistemas e suas aplicações.

Figura 7 - Exemplo de poço vertical para captação de gás



Fonte: adaptado de Tchobanoglous e Kreith (2002)

Figura 8 - Exemplo de poço horizontal para captação de gás



Fonte: adaptado de World Bank (2003)

3.2.1.2 Tubulação de canalização

Uma rede de tubos, geralmente de polietileno, é utilizada para conectar os poços/tubos de drenagem à planta de extração e utilização do biogás combustível, como os apresentados na Figura 9, da usina do Aterro Bandeirantes, em São Paulo.

Figura 9 – Tubulação de canalização do gás da usina do Aterro Bandeirantes/SP



Fonte: Pavan (2010)

3.2.1.3 Planta de extração e tratamento do biogás

De acordo com o documento elaborado por Conestoga-Rovers & Associates (2010)², a configuração ideal para uma planta de tratamento do gás de aterro é que ela esteja o mais centralizada possível e no ponto de menor elevação na região que circunda as células do aterro, de modo a facilitar a operação hidráulica e a drenagem de condensados.

Outra sugestão do documento é que a planta seja localizada dentro de um edifício, de forma a diminuir ruídos e evitar danos aos equipamentos devido à ação do tempo. Neste caso, devido à presença de gás em um ambiente confinado, atenção à especificação dos equipamentos utilizados, para que se sejam à prova de explosão.

Um ponto muito importante a salientar, antes de tratar dos componentes básicos de uma planta de tratamento de gás, é que quando se fala em aterros sanitários controlados, mesmo que não se utilize o biogás produzido para gerar energia, é necessário que se tenha um sistema de captação, canalização, e queima dos gases em *flares*, visto que o metano, que compõe cerca de 50% do biogás gerado, é um extremamente poluente.

Desta forma é fácil compreender que, mesmo em um local onde se utiliza o biogás para gerar energia, é necessário que se tenha um sistema de *flares* de *backup* para operar nos períodos de manutenção dos geradores, por exemplo, ou mesmo nos casos em que a vazão disponível é superior à necessária para gerar a energia elétrica demandada, seja por redução da demanda ou mesmo por picos de produção de biogás. A queima do biogás em altas temperaturas nos *flares* resulta de composição do metano existente em dióxido de carbono e água, além de destruir outros componentes poluentes do biogás (WORD BANK, 2003).

Na Figura 10 está representada de forma esquemática e simplificada uma planta típica para tratamento do biogás e geração de energia com o uso de motogerador (motor a combustão acoplado a um gerador síncrono).

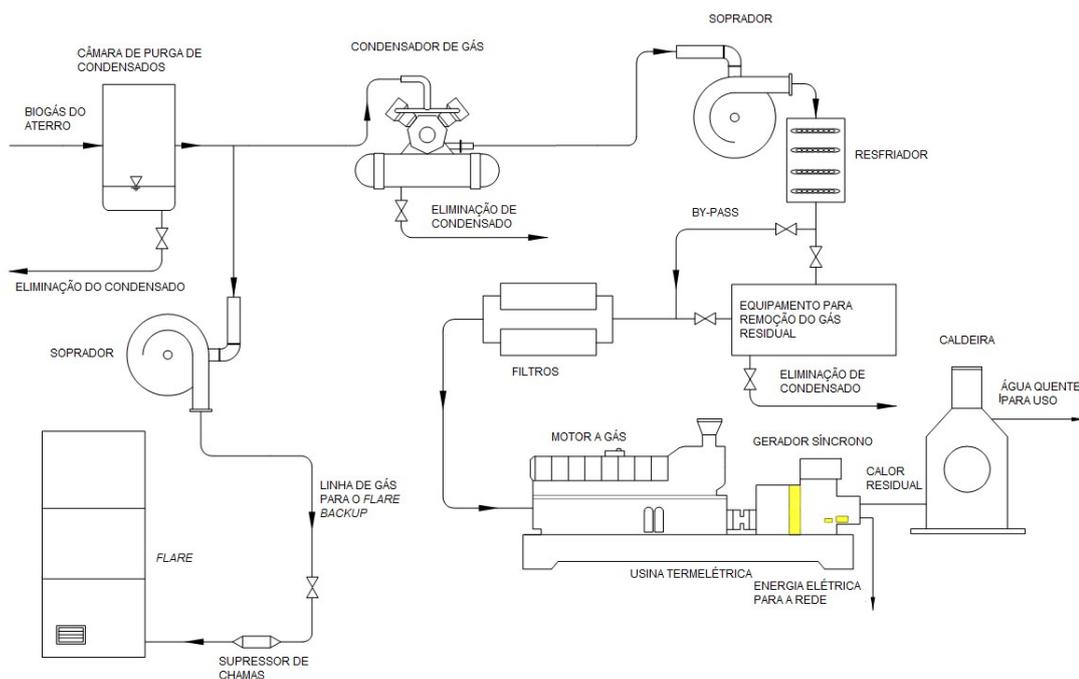
² O guia *Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines* foi elaborado por Conestoga-Rovers & Associates (2010) em nome de *British Columbia Ministry of Environment* (Ministério do Meio Ambiente da província de *British Columbia*, no Canadá) para embasar o Ministério na implantação de seu regulamento relativo à gestão do gás de aterros sanitários.

Um dos grandes problemas no manejo do biogás de aterro é a existência de condensados. Como o gás que vem do aterro é bastante úmido é importante que existam vários pontos de purga de condensado na tubulação que leva o gás à planta e, além disto, também exista um primeiro estágio na planta para purga destes condensados que acompanham o gás. Este estágio é importante para reduzir partículas de condensado que possam potencializar o efeito corrosivo do gás sobre os equipamentos que compõem o sistema (WORLD BANK, 2003).

No esquema da Figura 10 é possível notar que mesmo o gás que vai direto para queima nos *flares*, por motivos já mencionados nesta seção, passa antes pelo estágio de purga de condensados e também por um soprador, utilizado para aplicar vácuo para coletar o gás e enviá-lo ao *flare* com o fluxo desejado.

Para a linha que alimenta o motogerador, existem estágios adicionais de secagem, filtragem e aumento de pressão do gás que serve como combustível para o motor que, acoplado mecanicamente a um gerador síncrono, gera energia elétrica. Na referência Conestoga-Rovers & Associates (2010) são oferecidos vários detalhes sobre o processo de filtragem, além de outros detalhes da planta não abordados neste trabalho.

Figura 10 - Esquema da planta de tratamento do gás e de geração de energia com motogerador



Fonte: adaptado pela autora de Macviro, 1991 apud Conestoga-Rovers & Associates, 2010.

Dependendo da tecnologia utilizada também é possível utilizar um estágio de recuperação do calor residual para esquentar uma caldeira que poderia fornecer água quente para uso, aumentando o rendimento do sistema.

Embora não representados no esquema da Figura 10, é imprescindível que se tenha um ponto de medição do gás na planta. Medições contínuas de grandezas tais como fluxo do biogás (em m³/h, por exemplo), conteúdo de metano e de oxigênio (em percentual do volume), e temperatura do *flare* são importantes tanto do ponto de vista operacional, quanto para relatórios (CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES, 2010).

Além disto, são necessários sistemas de controle automático para assegurar a segurança e correta operação da planta, tais como controle da temperatura dos *flares*, desligamento em alta temperatura, válvulas para isolar a tubulação da usina em caso de falta de energia e intertravamento entre equipamentos que devem operar de forma simultânea, como o *flare* e o soprador, entre outros citados na referência Conestoga-Rovers & Associates (2010).

Tanto para as plantas de extração quanto para a de geração com motogeradores existe a possibilidade de se usar sistemas modulares. A natureza modular destes sistemas traz bastante flexibilidade no sentido de permitir uma expansão incremental no sistema por questões estratégicas e econômicas e até mesmo em caso de aumento da área do aterro.

3.2.1.4 Planta para geração de energia elétrica

De acordo com o guia *Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines* (CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES, 2010), a utilização do biogás de aterro depende basicamente dos seguintes fatores:

- Qualidade do biogás relativamente aos contaminantes;
- Grau de tratamento requerido para atender os limites de contaminantes;
- Quantidade de biogás produzido, também relacionado à escala do projeto;
- Viabilidade econômica e condições para venda da energia, distância para o centro de consumo, etc.

Em geral a literatura classifica o biogás de aterro em três categorias (WORLD BANK, 2003):

- **Gás de baixo teor combustível:** geralmente requerem um mínimo processamento, mais relacionado à retirada de umidade. Pode ser utilizado como combustível em fornos e caldeiras, além de poder ser utilizado para alimentar microturbinas a vapor (neste caso o gás seria utilizado para aquecer uma caldeira que geraria o vapor);
- **Gás de médio teor combustível:** quando comparado ao gás de baixo teor combustível, são utilizados estágios adicionais de tratamento para retirar mais umidade e contaminantes. Devido a esta redução de contaminantes geralmente corrosivos, aumenta-se a gama de uso do gás. Nesta condição, o gás pode ser usado em *boilers* industriais, fornos, turbinas, motogeradores e sistemas de ciclo combinado (energia elétrica e térmica);
- **Gás de alto teor combustível:** exige pré-tratamento mais extensivo, de forma a separar o dióxido de carbono e outros componentes do metano e remover a maior parte das impurezas presentes no gás. Como resultado, tem-se um gás de alta qualidade, comparável ao gás natural encanado, e podendo ser usado em sua substituição. Outros usos são a venda do metano para produção de produtos químicos, e a alimentação de células combustíveis e veículos automotores.

Para a geração de energia elétrica geralmente se utiliza gás de médio teor combustível que, apesar de ter aproximadamente o mesmo poder calorífico do gás de baixo teor combustível (CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES, 2010), possui menos contaminantes agressivos aos equipamentos.

Os estágios adicionais de tratamento, que retiram uma quantidade maior de contaminantes, ampliam o uso do combustível em outras aplicações nas quais os equipamentos seriam mais sensíveis à ação dos elementos corrosivos presentes no biogás de lixo na sua forma mais bruta.

Embora se tenha um custo maior com o tratamento do gás, este valor é compensado pela redução na manutenção dos equipamentos e aumento de sua vida útil, devido à menor presença de elementos corrosivos (WORLD BANK, 2003).

Na geração de energia elétrica o gás de médio teor combustível pode ser utilizado para alimentar turbinas a gás ou a vapor, motores alternativos a combustão, acoplados a geradores síncronos, conhecidos como motogeradores ou sistemas de ciclo combinado.

No gráfico da Figura 14, onde está representada a contribuição de cada tecnologia de geração de energia elétrica com RSU nos Estados Unidos, um dos países com maior quantidade de projetos do gênero (mais de 600 plantas atualmente em operação, conforme dados da EPA - *United States Environmental Protection Agency*).

Como se pode notar, os motogeradores são responsáveis por mais de 60% da energia gerada com biogás de RSU. A preferência pelo uso de motogeradores se dá pelo baixo custo de capital por kW quando comparado com outras tecnologias, além de proporcionar uma maior eficiência na conversão energética e permitir maior flexibilidade da instalação pelo fato de serem modulares (muitas vezes instalados em containers). Em contrapartida, os motogeradores geralmente requerem mais manutenção que as turbinas, além de consumirem bastante óleo lubrificante e, principalmente, têm mais problemas que as turbinas quando se trata de gases de exaustão, que podem conter traços de contaminantes resultantes da combustão incompleta do biogás (WORLD BANK, 2003). Geralmente os motogeradores são utilizados em unidades de 0,5 a 3 MW (potência por máquina).

As turbinas a gás também podem ser adquiridas em sistemas modulares, porém somente se mostram viáveis em locais com maior produção de biogás e de fluxo mais estável, o que não corresponde à maioria dos aterros sanitários. Geralmente são fornecidas em máquinas de 1 a 8 MW (WORLD BANK, 2003).

Na Tabela 5 é apresentado um comparativo entre as várias tecnologias utilizadas, considerando-se as faixas de vazão típicas e o tamanho potencial da usina.

Segundo o manual do World Bank (2003), os motogeradores são a tecnologia mais utilizada, já que a faixa de potencial de geração de 0,5 a 12 MW, para a qual é mais adequado o uso de conjuntos motogeradores, corresponde ao tamanho da maioria dos projetos. Segundo o autor, os motogeradores são menores em tamanho, e permitem adicionar menores incrementos de potência a um menor custo, acompanhando (como um espelho) o progresso da produção de gás da planta.

Na Figura 11 é possível comprovar a preferência pelo uso de motogeradores, analisando-se a participação de cada tecnologia na geração de energia com biogás de RSU nos Estados Unidos.

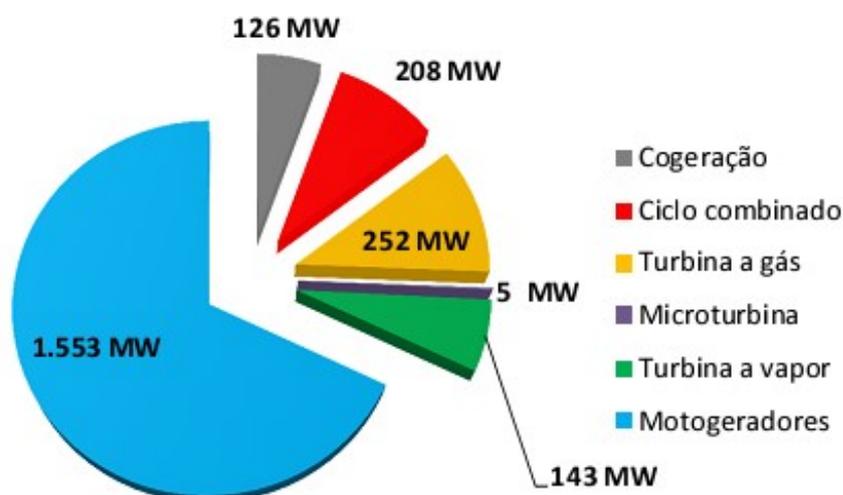
Tabela 5 – Tecnologias de utilização de biogás de RSU e faixas típicas de vazão e potência

Tecnologia	Faixa de vazão típica	Tamanho da usina	Eficiência elétrica da conversão (líquido para a rede, sem recuperação de calor)
Microturbinas	<100 cfm ($\cong 170 \text{ m}^3/\text{h}$)	<100 kW	25-30%
Motogeradores	>150 ($\cong 255 \text{ m}^3/\text{h}$) a 5.000 cfm (8.500 m^3/h)	0,5 a 12 MW	32-40%
Turbinas a gás	>4.000 ($\cong 6.800 \text{ m}^3/\text{h}$) a 20.000 cfm (34.000 m^3/h)	3 a 18 MW	26-32%
Turbinas a vapor	>6.000 a ($\cong 10.200 \text{ m}^3/\text{h}$) >25.000 cfm (42.500 m^3/h)	10 a 50 MW	24-29%
Sistemas a ciclo combinado	>5.000 ($\cong 8.500 \text{ m}^3/\text{h}$) a >25.000 cfm (42.500 m^3/h)	>10 MW	38-45%

Fonte: própria autora, com base em dados do World Bank (*Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean*. World Bank. Oct. 2003. 236p.)

Figura 11 – Tecnologias para de uso do biogás do RSU nos Estados Unidos

Participação de cada Tecnologia na geração de energia elétrica com biogás de RSU (em operação)



Fonte: própria autora, 2017 com dados da EPA - United States Environmental Protection Agency. Disponível em <<https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-data-and-landfill-technical-data>>. Acesso em 07 mai. 2017

3.2.1.4.1 Motogeradores a gás

Por se tratar de uma das tecnologias mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás do RSU, este trabalho dará um enfoque maior ao uso de

motogeradores a gás (motor alternativo acoplado a gerador síncrono) para este tipo de sistema para geração de energia elétrica (não se tratará do aproveitamento térmico que também pode ser utilizado com sistemas de recuperação de calor).

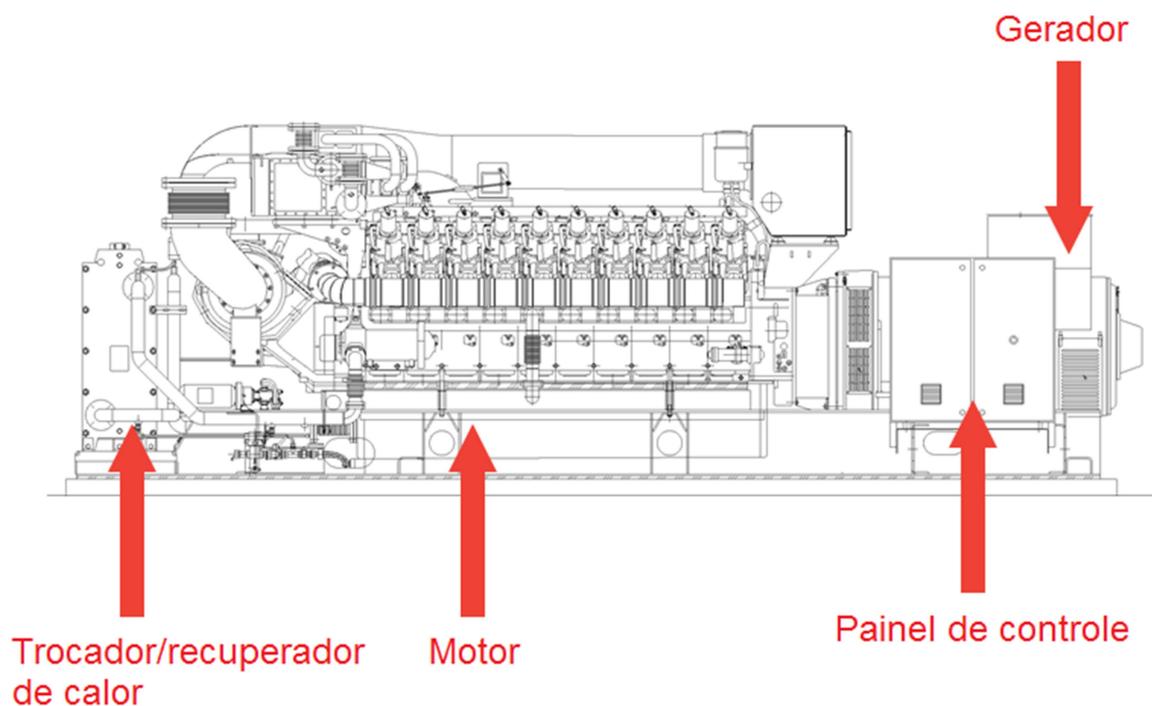
Os conjuntos motogeradores mais utilizados nesta aplicação utilizam motores de baixo Btu (desenhados para operar com gás “diluído”) com ignição por centelha (Ciclo Otto ou Miller, por exemplo). De acordo com o fabricante da referência Caterpillar (1997) o sistema de combustível de um motor de baixo Btu é projetado de forma a trabalhar com um maior volume de fluxo de gás, quando comparado com um sistema projetado para gás natural. Este incremento de fluxo serve para compensar o menor poder calorífico do biogás (baixo Btu) e fornecer o mesmo fluxo de um motor equivalente alimentado com gás natural.

Os componentes básicos do sistema, em nível macro, estão representados na Figura 12. Basicamente o gás é queimado nos cilindros do motor alternativo, que fazem girar o virabrequim que, por sua vez, é acoplado ao eixo de um gerador síncrono. Acoplado ao motor há um recuperador ou trocador de calor. O primeiro é utilizado nos casos em que o calor produzido pela queima do biogás é reaproveitado para outros processos, caso contrário se utiliza um radiador (trocador de calor) para dissipar o calor.

As referências *Environment Agency* (2004) e *Caterpillar* (1997) oferecem mais detalhes sobre os principais componentes mecânicos de um motogerador utilizado com biogás como combustível.

Para o correto funcionamento de sistema, são necessários diversos dispositivos auxiliares, sensores, atuadores e sistema de controle eletrônico. O motogerador e estes equipamentos auxiliares geralmente são alojados em edifícios ou contêineres, que ajudam a garantir a acústica, reduzindo o ruído externo, conforme Figura 13, que mostra os motogeradores de GE Jenbacher instalados no aterro sanitário de Caieiras, em São Paulo, atualmente a maior usina movida a biogás de lixo do Brasil, conforme o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL.

Figura 12 - Componentes básicos de um motogerador a gás.



Fonte: adaptado pela autora, 2017 de GE's Jenbacher Gas Engines. **Gas Engine Basics**. Disponível em: <https://www.clarke-energy.com/gas-engines/>. Acesso em: 11 mai. 2017.

Figura 13 - Motogeradores instalados no aterro de Caieiras, em SP.



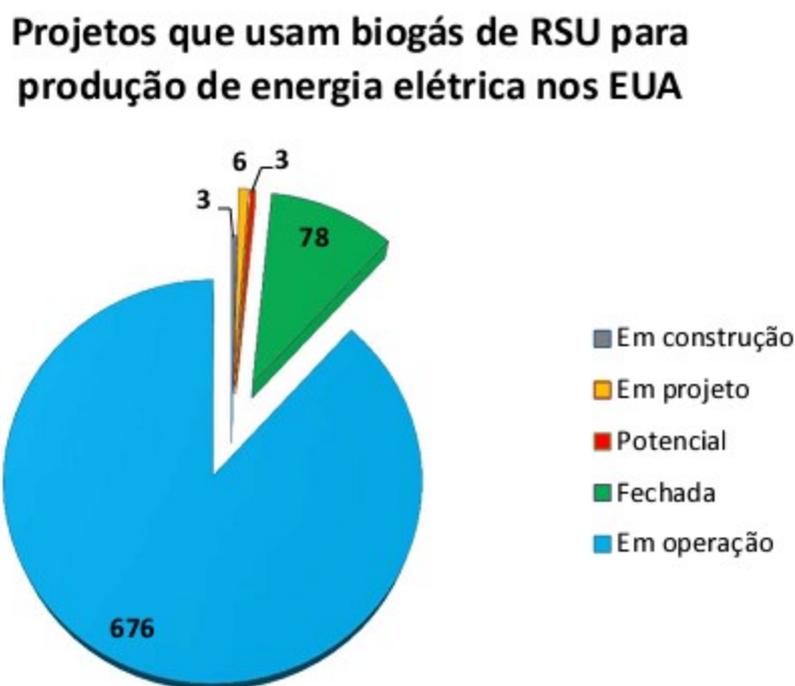
Fonte: <http://www.solvi.com/termoverde-caieiras-movida-a-biogas/>. Acesso em: 12 mai. 2017.

3.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS

De acordo com dados da EPA - *United States Environmental Protection Agency* atualmente os Estados Unidos têm 676 projetos de geração de energia elétrica com o gás de RSU em operação, com uma capacidade instalada de cerca de 2290 MW, conforme se pode observar nos gráficos da Figura 14. Enquanto isto, no Brasil há somente 16 projetos semelhantes em operação (ver Figura 15), com capacidade instalada total de 120 MW, de acordo com dados do Banco de Informações de Geração da ANEEL (dados coletados em 6 de maio de 2017).

Existem diversas ferramentas disponíveis para auxiliar nos estudos preliminares para análise de viabilidade de projetos que fazem o uso energético do biogás gerado pela degradação da matéria orgânica gerada pelo ser humano em sua vida doméstica e em seus processos produtivos.

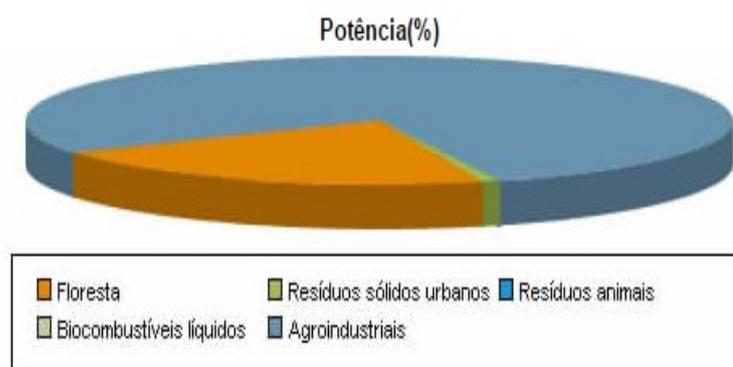
Figura 14 - Projetos de uso do biogás do RSU nos Estados Unidos



Fonte: própria autora, 2017 com dados da EPA - United States Environmental Protection Agency. Disponível em <<https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-data-and-landfill-technical-data>>. Acesso em 07 mai. 2017

Figura 15 - Projetos de uso do biogás do RSU nos Brasil

Fontes utilizadas no Brasil - Fase: Operação				
Fonte Nível 1	Quantidade	Potência Outorgada(kW)	Potência Fiscalizada(kW)	%
Floresta	87	3.075.612	2.830.248	21,27
Resíduos sólidos urbanos	16	120.460	117.380	0,83
Resíduos animais	11	2.099	2.099	0,01
Biocombustíveis líquidos	3	4.670	4.670	0,03
Agroindustriais	413	11.257.790	10.994.275	77,85
Total	530	14.460.632	13.948.673	100



Fonte: ANEEL – Banco de Informações de Geração – BIG. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse_fn1.cfm>. Acesso em 06 mai. 2017.

Como a intenção deste trabalho é focar em sistemas de energia elétrica e geração distribuída, será feita uma análise bastante simplificada do potencial energético do Aterro Sanitário Municipal de Joinville com o uso um programa de computador de uso livre.

Este programa de computador é fruto de um convênio entre a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental de São Paulo, a CETESB, a Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo – SEMA-SP e o Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. O objetivo do projeto era a elaboração de manuais para a orientação do uso energético de biogás e fomento da formação de centros para o desenvolvimento desta atividade no Brasil.

4 POTENCIAL ESTIMADO DO ATERRO SANITÁRIO DE JOINVILLE

Existem diversas ferramentas gratuitas disponíveis na internet para auxiliar nos primeiros estudos de levantamento de potencial energético de aterros sanitários e também de estações de tratamento de efluentes (esgoto).

Neste trabalho optou-se por utilizar o programa de computador Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0, que foi desenvolvido no Brasil com recursos federais por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia, e com recursos do estado de São Paulo, por meio de sua Secretaria de Estado de Meio Ambiente e da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental – CETESB.

Com o auxílio de informações de referência contidas no manual técnico do *software*, e utilizando-se os dados do Aterro Sanitário de Joinville e da coleta de resíduos na cidade, disponibilizados pela prefeitura nos documentos Joinville – Cidade em Dados 2016 (PREFEITURA MUNICIPAL, 2016) e Plano Municipal de Resíduos Sólidos (PREFEITURA MUNICIPAL, 2013), foi feito o cálculo da estimativa de potencial de geração de energia elétrica no aterro.

4.1 PROGRAMA BIOGÁS

Na Figura 16 é apresentada a tela inicial do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros. Clicando-se na opção Novo Projeto, abre-se a janela da Figura 17, onde, de forma sequencial, são informadas as características do aterro.

Conforme indicado em seu manual, o programa Biogás utiliza um modelo matemático muito utilizado pela *United States Environmental Protection Agency – USEPA* para estimar a geração de metano em aterros sanitários nos Estados Unidos.

Figura 16 – Tela inicial do programa para estimativa do potencial energético de aterros sanitários



Fonte: Programa de Computador Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

O modelo matemático utilizado pela USEPA resulta na equação (1).

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)} \quad (1)$$

onde,

Q_x : vazão de metano gerado no ano x pelo resíduo sólido depositado no ano T
[$m^3_{CH_4}/ano$]

k : constante de decaimento [1/ano]

R_x : fluxo de resíduos no ano x [kg_{RSD}]

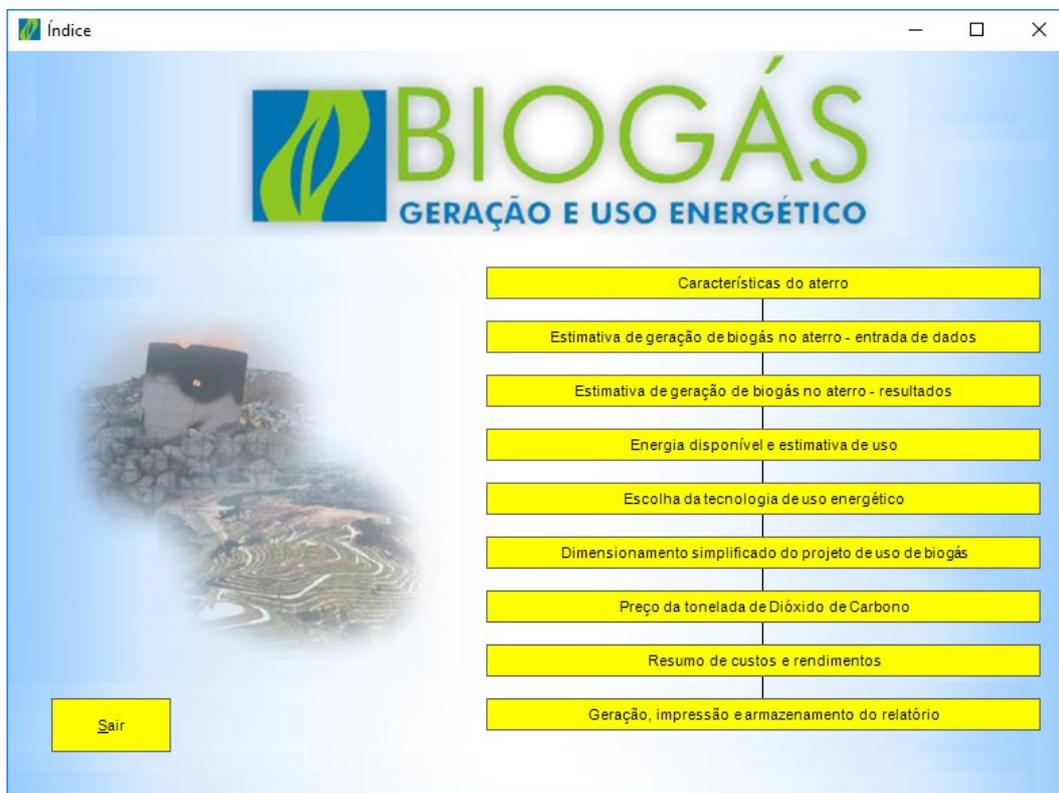
L_0 : potencial de geração de metano [$m^3_{CH_4}/kg_{RSD}$]

T : ano de deposição do resíduo no aterro [ano]

x : ano atual [ano]

RSD: Resíduo sólido domiciliar

Figura 17 – Tela de projeto do programa para estimativa do potencial energético de aterros sanitários



Fonte: Programa de Computador Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

A variação de R_x é um dos dados mais importantes desta estimativa e, para o caso em questão, pode ser obtida nos documentos Joinville – Cidade em Dados (Ippuj, 2016) e Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos do Município de Joinville (Fundema, 2013). No primeiro ano ocorre o maior nível de geração, que decai com o passar dos anos, variando também em função da composição do resíduo (conteúdo de matéria orgânica) e umidade do local (CETESB, 2006).

Os valores de k e L_0 : são fornecidos pela literatura internacional para permitir que sejam feitas estimativas nas vazões de gás mesmo quando não se tem conhecimento mais detalhado do aterro estudado.

A soma das vazões de metano ($\sum Q_x$) correspondentes às quantidades de resíduo depositadas no aterro ano a ano é dada pela equação (2).

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum (R_x \cdot e^{-k(x-T)}) \quad (2)$$

4.2 DADOS PARA A ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE METANO NO ATERRO SANITÁRIO

Após preencher as informações de características do aterro, que na verdade não influenciam nos cálculos, segue-se à carga de dados do local. Na Figura 18 constam os dados a serem informados para a estimativa de produção do gás.

Figura 18 – Tela do programa onde se entra com os dados de estimativa de geração de metano no aterro.

Fonte: Programa de Computador Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

O primeiro dado solicitado é a constante de decaimento k . O valor desta constante é função de vários fatores, tais como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e umidade (Mendes; Sobrinho, 2005). São esperados valores de k elevados em locais de clima quente e úmido (CETESB, 2006), como é o caso da cidade de Joinville.

Tabela 6 – Valores sugeridos para k

Precipitação anual	Valores de k [ano ⁻¹]		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
<250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 a <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 a <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: próprio autor, com base em dados do *World Bank (Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean. World Bank. Oct. 2003. 236p.)*

Considerando-se que a cidade de Joinville é bastante quente e que a média de precipitação pluviométrica para 2015, por exemplo, foi de 231,23 mm mensais, ou mais de 2000 mm anuais, segundo o documento Joinville – Cidade em dados 2016 (Ippuj, 2016), foi utilizado $k = 0,09 \text{ ano}^{-1}$ no cálculo.

O potencial de geração de metano L_0^3 em m^3_{CH} por cada kg_{RSD} depende da composição do lixo, principalmente da fração de matéria orgânica presente. Como não se encontrou nenhum estudo específico de caracterização do lixo do aterro sanitário de Joinville, será utilizado o valor de referência indicado no documento *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean* (World Bank, 2003), de $170 m^3_{CH_4}/ton_{RSD}$ ou $0,170 m^3_{CH_4}/kg_{RSD}$.

Para a informação sobre fluxo de resíduos R_x o programa permite três formas de fazer a estimativa (Cetesb, 2006):

- Dados de população: quando não se conhece os dados do aterro, mas se possui a informação da população atendida pela coleta de resíduos. É a forma menos indicada, por oferecer menor precisão;
- Dados históricos do fluxo de resíduos: quando se conhece os dados de deposição do lixo no aterro desde sua abertura;
- Dados atuais do fluxo de resíduos: quando somente se conhece o fluxo atual de resíduos.

Como os documentos Joinville – Cidade em Dados 2016 (Prefeitura Municipal, 2016) e do Plano Municipal de Resíduos Sólidos (Prefeitura Municipal, 2013) trazem informações atuais sobre a coleta de lixo, será utilizada a terceira opção (dados atuais do fluxo de resíduos) para estimar R_x .

3 Na referência (Mendes; Sobrinho, 2005) considera-se L_0 como o potencial de geração de biogás em $m^3_{\text{biogás}}/kg_{RSD}$ e acrescenta-se à equação (1) um fator F (%) que representa a fração de metano no biogás, resultando em $Q_x = F \cdot k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)}$. O resultado deve ser o mesmo da equação (1).

Segundo o que consta do Plano Municipal de Resíduos Sólidos (Prefeitura Municipal, 2013), a área onde atualmente está instalado o aterro de Joinville era utilizada como lixão e a partir de 1982 a prefeitura começou a tratar os resíduos por meio de aterro controlado. Desta feita, será considerado como 1982 o ano de abertura da área principal do aterro.

Utilizando-se as informações da “Tabela 1 - Demonstração dos resíduos sólidos coletados em Joinville segundo o tipo (t/mês)” e excluindo-se os resíduos provenientes da coleta seletiva, que não são destinados ao aterro sanitário, foi calculado o fluxo diário atual (considerando-se os dados do ano de 2015) depositado no aterro, em toneladas por dia e, com base no histórico de coletas de 2001 a 2015 (os dados de 2001 a 2009 foram obtidos no documento Joinville – Cidade em Dados 2010-2011).

Figura 19– Histórico do depósito de resíduos no aterro sanitário de Joinville

The image shows a software interface for 'Características do Aterro Sanitário - Cronologia do Aterro Sanitário'. The main window is blue and contains two sections: 'Cronologia do Aterro Sanitário' with input fields for 'Ano de abertura do aterro: 1982' and 'Ano de fechamento do aterro: 2026', and 'Conhece o Histórico do Aterro ?' with radio buttons for 'Sim' (selected) and 'Não'. A smaller 'Fluxo Diário' dialog box is open in the foreground, showing 'Fluxo diário atual (t/d): 402' and 'Taxa de crescimento (%): -1,016', with 'Ok' and 'Cancelar' buttons. The main window also has 'Ok' and 'Cancelar' buttons at the bottom right.

Fonte: elaborado pela autora, 2017. Tela de carga de dados do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

Importante salientar que impactou na taxa de crescimento (negativa) na deposição de resíduos o fato de o lixo industrial e o transportado por terceiros com volume diário superior a 120 litros não ser mais levado ao aterro sanitário municipal desde 2013. Também com o aumento da consciência ecológica da população na

produção de menos lixo e na separação de materiais recicláveis, que tem outro destino que não o aterro, a tendência é a produção de lixo não aumente na mesma proporção do aumento da população.

A partir destes dados o programa extrapola o fluxo anual desde a abertura (1982) até o fechamento do aterro (2026) considerando-se as áreas que estão em uso, conforme Tabela 2 – Característica do Aterro Sanitário Municipal de Joinville. Vale ressaltar que, devido à falta de informação de fluxos e datas de abertura e encerramento por área do aterro (área encerrada, emergencial, I e II), consideraram-se todas as áreas utilizadas como uma só.

O próximo passo é o cálculo de vazão e potência, a partir dos dados informados na etapa anterior. Antes de se chegar a este valor, é necessário informar a taxa de queima de metano no aterro. Como na bibliografia utilizada não se encontrou maiores informações técnicas sobre o sistema de drenagem atualmente utilizado no aterro para a queima do metano, optou-se por considerar os valores sugeridos pelo programa.

Figura 20– Valores de linha base utilizados

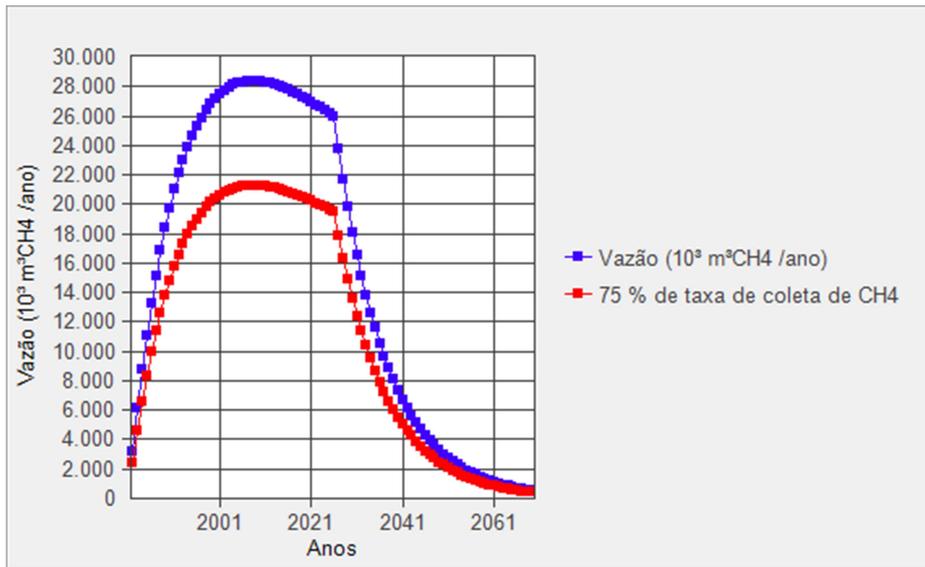
Parâmetro	Valor	Status
Linha de base de queima (%)	20	Valor sugerido
Energia elétrica evitada (tCO2/MWhevit)	0,2782	Valor sugerido
Eficiência de coleta de biogás (%)	75	Valor sugerido
Eficiência da queima de biogás (%)	95	Valor sugerido

Fonte: elaborado pela autora, 2017. Tela de carga de dados do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

A partir destas informações, o programa fornece um gráfico de vazão de metano por ano, apresentado na Figura 21.

Analisando-se os dados, verifica-se que a vazão de gás foi subindo até o ano de 2008, quando começou a decair lentamente. A partir do encerramento da área, considerado como 2026, a queda de vazão passa a ser mais acentuada. Caso sejam abertas novas células para depósito de resíduos no aterro, o que é bastante provável de se acontecer no futuro, a curva de decaimento será modificada.

Figura 21– Gráfico da vazão de metano por ano



Fonte: elaborado pela autora, 2017. Tela de resultados do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

No gráfico da Figura 22 está apresentada a curva de potência disponível em kW/mês, acompanhando o formato da curva de vazão de metano e, conseqüentemente, sem considerar também a abertura de novas células no futuro.

A estimativa da potência é feita com base na equação (3) (CETESB, 2006):

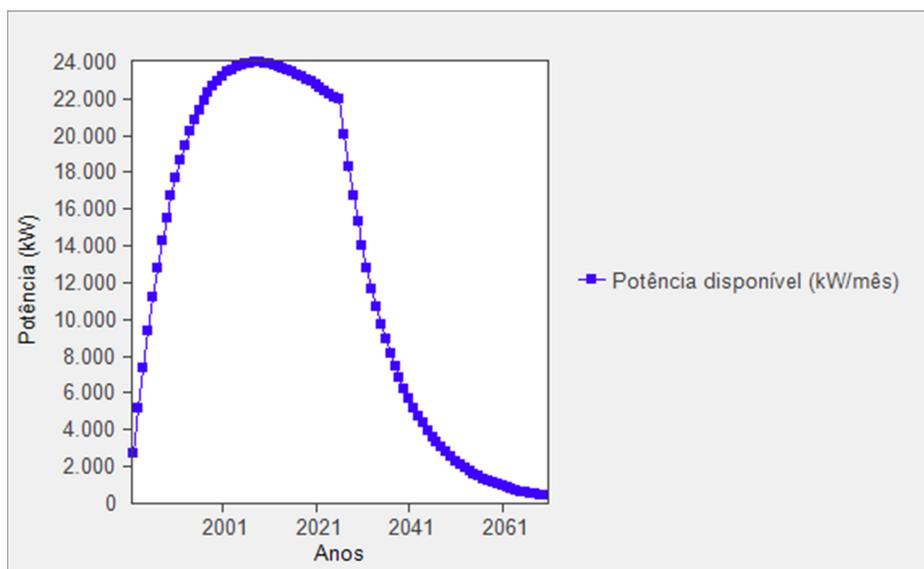
$$P_x = \frac{Q_x \cdot P_{c(CH_4)}}{31.536.000} \cdot E_c \cdot \frac{k}{1000} \quad (3)$$

onde:

- P_x : potência disponível a cada ano x [kW]
 Q_x : vazão de metano gerado no ano x [$m^3_{CH_4}/ano$]
 $P_{c(CH_4)}$: poder calorífico do metano (= 35,53.106) [$J/m^3_{CH_4}$]
 E_c : eficiência na coleta de gases (estimada em 75) [%]
 31.536.000 equivalente a 1 ano em s [s/ano]
 k : constante adimensional considerada como 1000

Vale ressaltar que estas são estimativas, visto que não há dados sobre todo o histórico de deposição de lixo no aterro de Joinville, tampouco sobre a composição orgânica do lixo e sobre a quantidade de metano gerada atualmente. Porém com elas é possível se ter uma aproximação importante sobre o potencial de uso do aterro para gerar energia elétrica, estimulando um maior investimento na pesquisa e avaliação do tema.

Figura 22– Gráfico da potência disponível, em kW/mês



Fonte: elaborado pela autora, 2017. Tela de resultados do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

O passo seguinte é determinar o uso energético da potência disponibilizada pelo gás gerado no aterro. O programa, refletindo o que acontece na realidade dos projetos de reaproveitamento do RSU, fornece duas opções para aproveitamento energético: gás combustível e energia elétrica, ambos para uso interno e revenda.

A estimativa de energia disponível é feita através da equação (4):

$$E_{disponível} = P_x \cdot \frac{1}{365 \times 24} \quad (4)$$

onde:

$E_{disponível}$: energia disponível no ano x em $[m^3_{CH_4}]$ ou $[kWh]$

P_x : potência disponível no ano x $[m^3_{CH_4}/h]$ ou $[kW]$

365: quantidade de dias no ano [dia/ano]

24: quantidade de horas no dia [h/dia]

Como o foco deste trabalho é no uso do biogás para a geração de energia elétrica, será considerado como “zero” o uso de gás em sua forma natural. Desta forma, vai-se diretamente à tela de estimativa da potência elétrica.

Uma informação bastante importante para a determinação da potência elétrica gerada por uma usina alimentada pelo gás do aterro é o rendimento da conversão energética. Segundo Tabela 5⁴, baseada em tabela do *Handbook for the*

4 Importante notar que os dados da tabela corroboram com a tendência a se utilizar motogeradores para este tipo de aproveitamento energético, não só pelas justificativas econômicas e operacionais, mas também pela vazão de gás neste tipo de empreendimento. Como se pode

preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean (World Bank, 2003), que apresenta os tipos de tecnologias utilizados em aproveitamento energético do gás do lixo, o rendimento típico para motogeradores, tecnologia abordada neste trabalho, é entre 32 e 40%.

Tomando-se a folha de dados do equipamento utilizado no trabalho, será considerada a eficiência total do conjunto de aproximadamente 35% para funcionamento a 50% da carga nominal de 1600 kW.

Na Figura 23 é apresentada a tela de estimativa de potência elétrica a ser gerada. Com o uso de quatro máquinas de 1600 kW, perfazendo um total de 6400 kW, é possível ter 12 anos de geração de energia a partir de 2017. Caso fossem utilizadas somente três máquinas, em um total de 4800 kW, seria possível operar a usina por 15 anos. Com 2 máquinas de 1600 kW, como foi utilizado nas simulações do capítulo 9, seria possível operar a usina por 19 anos.

Figura 23– Estimativa da potência elétrica gerada no aterro.

A imagem mostra a interface de usuário de um software intitulado "Estimativa da potência elétrica". O software possui uma interface azul com elementos de formulário em branco. No topo, há uma barra de título com o ícone do programa e o nome "Estimativa da potência elétrica".

O conteúdo principal da janela é dividido em seções:

- Estimativa da potência elétrica possível:** Esta seção contém um campo de entrada para "Rendimento de conversão energético (%)" com o valor "35" e uma opção "Valor sugerido" desativada. Abaixo, há um botão "Estimar potência" e o resultado "8.397 kW".
- Potência útil elétrica desejada (kW):** Um campo de entrada com o valor "3200" e um botão "Calcular".
- Quantidades de anos:** O texto "19 anos" é exibido.
- Ano Inicial:** O texto "2.017" é exibido.
- Ano Final:** O texto "2.035" é exibido.

Na parte inferior direita da janela, há dois botões: "Ok" e "Cancelar".

Fonte: elaborado pela autora, 2017. Tela de carga de dados do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

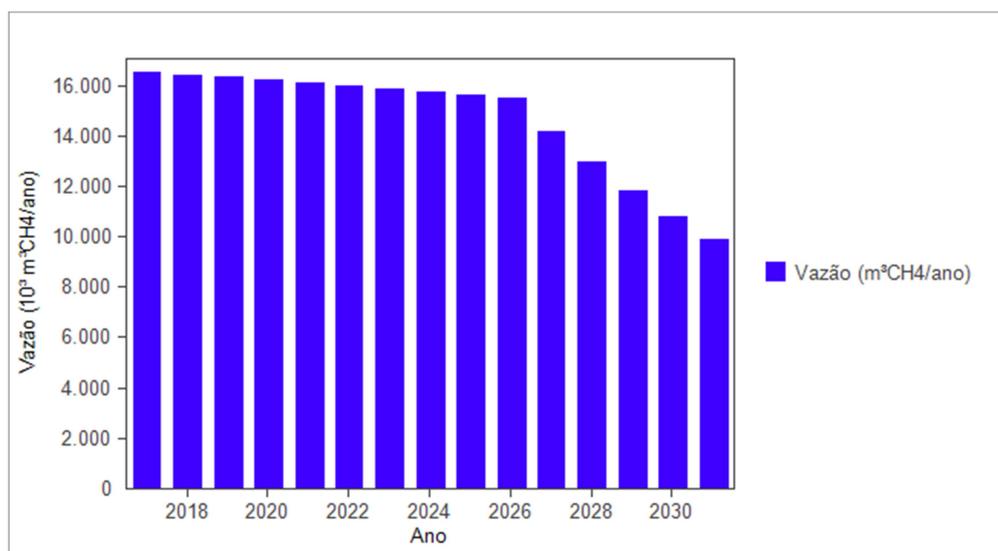
observar na Figura 21– Gráfico da vazão de metano por ano, a vazão por hora (dividindo-se o valor pelas 8760 horas do ano) chega a 3236 m³/h.

Para a decisão de qual configuração escolher, é imprescindível que seja feita uma análise econômico/financeira do tema, considerando-se também a vida útil dos equipamentos, custos de operação e manutenção, etc.

A decisão de se utilizar a configuração com 2 máquinas em um total de 3200 kW foi por conveniência do estudo, pois a folha de dados mais completa encontrada foi de um equipamento de 1600 kW, ofertado pelo fabricante Caterpillar para o projeto de um digestor de matéria orgânica denominado *Harvest Power*. Esta planta de geração de energia a partir de biomassa fica localizada em Orlando, nos Estados Unidos, e sua principal fonte de matéria orgânica são os restos da comida servida do parque da Disney.

No gráfico da Figura 24 se verifica o volume de CH₄ que deixaria de ser jogado na atmosfera⁵ e seria transformado em energia elétrica.

Figura 24– Emissão evitada de CH₄



Fonte: elaborado pela autora, 2017. Tela de resultados do programa Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB

Nas telas seguintes são abordadas questões econômicas do projeto e dimensionamento da estrutura de captação e tratamento do gás. Como este não é o foco deste trabalho, estas telas são ignoradas.

Importante ressaltar que os cálculos apresentados neste documento são somente estimativas que têm como objetivo gerar uma expectativa e uso desta fonte

⁵ Importante ressaltar que, cumprindo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, o gás metano gerado pela decomposição anaeróbica dos resíduos do aterro de Joinville já é queimado em *flares*, de forma a diminuir o impacto da atividade no meio ambiente.

de energia na cidade. Para justificar maiores investimentos em um futuro projeto seria necessário realizar estudos mais aprofundados das características do aterro e da composição real dos resíduos ali depositados, da disposição dos drenos, etc, tudo com o suporte de especialistas na área (engenheiros ambientais, sanitaristas, etc).

5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICRORREDES

Neste capítulo serão abordadas as definições de geração distribuída e microrredes. Serão apresentadas algumas configurações de microrrede e seus modos de operação, dando especial atenção à operação em modo ilhado (isolada da concessionária).

5.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Nas últimas décadas os sistemas de potência em geral foram dimensionados para operar de forma centralizada, com grandes centrais geradoras distantes dos grandes centros consumidores fornecendo potência através de longas linhas de transmissão às distribuidoras de energia que, por sua vez, eram responsáveis por entregar a energia ao consumidor final.

Nos últimos anos, porém, houve um grande avanço em formas alternativas para a produção de energia elétrica. O aumento da preocupação com o meio-ambiente aliado à necessidade de se diversificar a matriz energética, de forma a atender à crescente demanda de forma segura e sustentável, deu um grande impulso à pesquisa e desenvolvimento de fontes renováveis de energia.

Parques eólicos, pequenas centrais hidrelétricas, sistemas fotovoltaicos e usinas térmicas a biomassa são alguns dos empreendimentos de pequeno e médio porte que estão ganhando força como consequência da diminuição das barreiras legais ao surgimento de novos agentes geradores e aos incentivos dos próprios governos na inclusão dos consumidores na equação de expansão do setor energético.

Esta mudança no cenário do setor energético acabou criando um movimento favorável à conexão de unidades geradoras diretamente na rede de distribuição, próximas aos centros de consumo, o que passou a ser conhecida como geração distribuída (GD).

Chagas (2016) cita alguns fatores que fazem da geração distribuída uma ótima alternativa para a expansão do parque gerador nacional. Dentre eles estão o menor custo de investimento por empreendimento, atendimento mais rápido à

demanda reprimida devido ao menor prazo necessário para a construção de novos empreendimentos, redução nos impactos ambientais provocados pelas linhas de transmissão e pelas grandes áreas alagadas pelos reservatórios das usinas hidrelétricas. Além disso, considerando-se o fato de que as unidades geradoras estão mais próximas aos centros de consumo, reduz-se também o problema das perdas na rede e aumenta-se a possibilidade de outros usos da energia gerada, como em sistemas de cogeração (energia e calor, por exemplo) (ZALI, 2012).

Em um sistema de geração distribuída há unidades geradoras conectadas diretamente a indústrias, edifícios, residências e na rede de média e baixa tensão. A eletricidade não utilizada diretamente pelos consumidores conectados à geradora é então injetada na rede da concessionária, para auxiliar no atendimento à demanda de outros consumidores.

Com o crescente aumento da penetração das fontes de geração distribuída, novos desafios técnicos devem ser superados, de forma a garantir que os atuais níveis de confiabilidade do sistema não sejam prejudicados, ao mesmo tempo em que se aproveitam os benefícios que as fontes de GD podem oferecer, como o aumento da disponibilidade da rede. Neste sentido, surge o conceito das microrredes, que aparecem como uma possível solução para integrar de forma confiável as fontes de geração distribuída, incluindo possíveis sistemas de armazenamento de energia e as cargas controláveis.

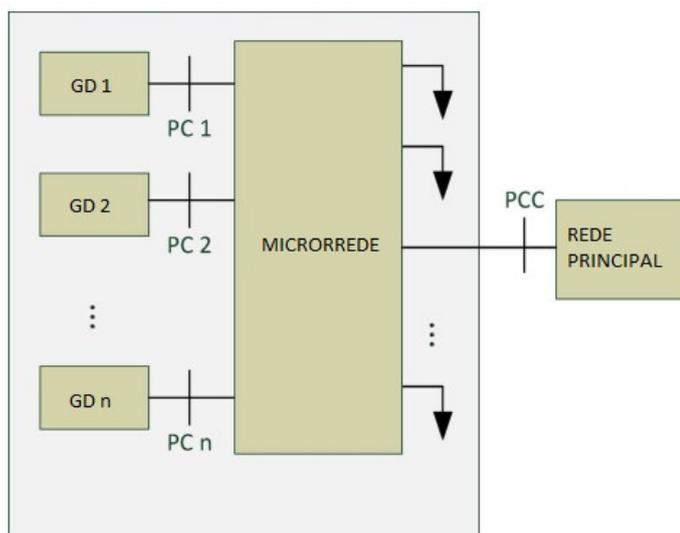
5.2 DEFINIÇÃO DE MICRORREDE

De acordo com Benjamin Kroposki et al. (2008, apud GLOVER, 2012, p.32), microrredes são sistemas com pelo menos uma fonte de geração distribuída e cargas associadas que possam formar ilhas intencionais nos sistemas elétricos de distribuição, ou seja, que possam manter as cargas que façam parte de sua rede mesmo com a desconexão da rede principal da concessionária. Com este conceito de rede, os blocos de cargas controláveis e fontes de geração que façam parte da microrrede poderiam ser desconectados e reconectados à rede da concessionária com um mínimo de interrupção do fornecimento de energia, de forma a garantir um aumento da disponibilidade às cargas, sem prejuízo à confiabilidade do sistema.

A força tarefa em controle de microrredes, formada por membros do IEEE (2014), considera que as microrredes deveriam ser vistas pela rede principal como um elemento único, respondendo aos sinais de controle por ela enviados. Único também seria o ponto de acoplamento, denominado na literatura como PCC, do inglês *Point of Common Coupling* (ponto de conexão comum). Desta forma se evitaria que, com o aumento da quantidade de empreendimentos de GD e, conseqüentemente, da ramificação das redes de distribuição, sejam necessários sistemas de controle centralizados de extrema complexidade.

Na Figura 25 está representada uma configuração genérica de microrrede, apresentada pela força tarefa do IEEE (IEEE-PES, 2014), com as unidades geradoras e as cargas conectadas à microrrede antes do PCC. Em alguns casos poderiam ser integradas outras fontes de energia à microrrede, como vapor ou água quente produzidas em sistemas de cogeração.

Figura 25 - Diagrama esquemático de uma Microrrede com múltiplas fontes de GD

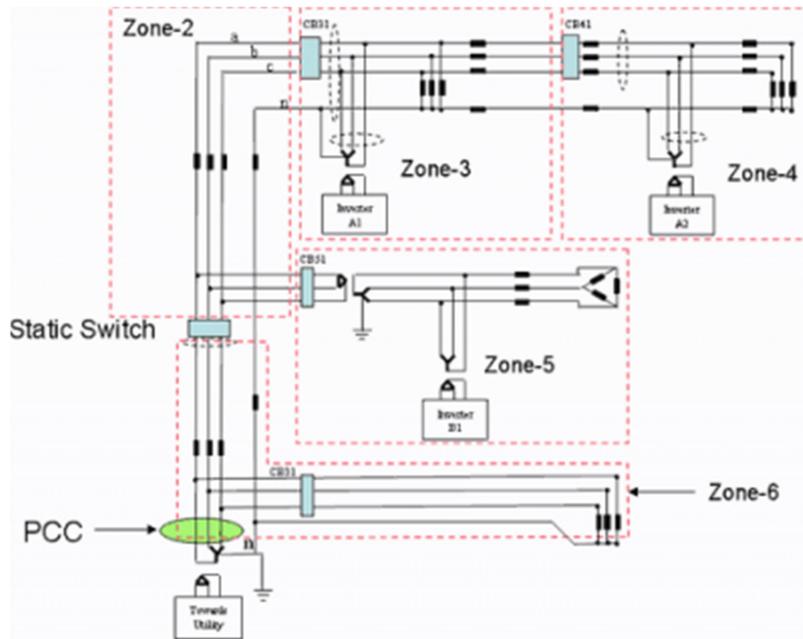


Fonte: adaptado pela autora de Cañizares, et al (2014)

A CERTS (*Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*) entidade criada nos Estados Unidos para pesquisa e desenvolvimento de novos métodos, ferramentas e tecnologias para aumentar a confiabilidade e eficiência do sistema elétrico do país, utiliza outra configuração de microrrede, apresentada na Figura 26. Segundo informações disponíveis na página *web* do consórcio (<https://certs.lbl.gov/initiatives/certs-microgrid-concept>), o conceito de microrrede CERTS utiliza um conceito *peer-to-peer* (igual para igual, em tradução livre), no qual

não se utiliza um controle ou armazenador de energia centralizado para operação. Cada fonte possui um controlador com *droop* de tensão *versus* frequência⁶ de tal forma que, em caso de geração fora dos parâmetros determinados, a frequência cairá para um nível inferior à faixa de operação normal, sinalizando ao sistema de proteção que desconecte cargas não críticas.

Figura 26 - Conceito de Microrrede da CERTS



Fonte: <https://certs.lbl.gov/initiatives/certs-microgrid-concept>. Acesso em 05/06/2017.

Um ponto importante em qualquer configuração de microrrede é que, assim como ocorre em um sistema de potência interligado, quando a microrrede estiver em modo de operação ilhada (desconectada da rede principal da concessionária), as potências ativa e reativa geradas na porção ilhada devem estar em balanço com a potência demandada pelas cargas locais, incluindo a potência trocada com possíveis unidades de armazenamento de energia conectadas à rede. Por outro lado, se a microrrede estiver conectada à rede principal, suas cargas poderão ser alimentadas tanto pelas fontes de geração locais quanto pela concessionária, a depender da condição de operação.

Para que a comutação entre a condição ilhada/isolada para a condição em paralelo com a rede principal, a microrrede necessitará de um sistema que detecte a desconexão ou condições anormais da rede principal para isolar a microrrede de

⁶ O capítulo 7 apresenta informações mais detalhadas sobre as técnicas de controle em microrrede.

modo a preservar o fornecimento de energia às cargas que dela fazem parte, fazendo a transição da forma mais suave possível. Este sistema de detecção também sinalizará ao sistema de controle a nova condição de operação, permitindo que se façam as manobras e mudanças necessárias no esquema de controle.

Quando houver o restabelecimento da rede principal, o sistema de controle e proteção da microrrede deverá detectar esta nova condição, sincronizando a microrrede com a rede principal e reconectá-la.

Em resumo, o conceito de microrrede, independentemente da configuração utilizada, é considerado como uma alternativa para integrar fontes de geração distribuída de forma a superar alguns desafios advindos do aumento de agentes no sistema de potência, tais como (IEEE-PES, 2014):

- Cronograma e despacho de unidades cujo fornecimento e demanda possui alto grau de incerteza;
- Operação confiável e econômica mesmo diante de fontes com geração intermitente, como é o caso da energia solar e da eólica;
- Dimensionamento de esquemas de ajuste da demanda de forma a permitir que os consumidores possam se adaptar e reagir às necessidades da rede (na seleção de cargas prioritárias, por exemplo);
- Reavaliação e redimensionamento dos sistemas de medição e proteção de modo a considerar fluxos de potência bidirecionais;
- Desenvolvimento de novos métodos de controle que levem em consideração o aumento do uso da eletrônica de potência na geração distribuída.

5.3 OPERAÇÃO EM MODO ILHADO

Uma ilha não intencional é formada quando, para eliminar uma falta na linha, por exemplo, o sistema de proteção da concessionária atua, abrindo o disjuntor e interrompendo o fornecimento principal de energia, porém uma parte dos consumidores permanece alimentada por uma fonte de geração distribuída, que não é comandada pelo sistema de proteção da concessionária (VIEIRA JR, 2011).

Esta situação poderia ser bastante interessante, pois permitiria que consumidores continuassem com suprimento de energia, mesmo com alguma falha na rede principal, porém hoje é altamente indesejado pelas concessionárias, por

diversos motivos, tais como:

- Risco aos trabalhadores técnicos da concessionária, que fazem a operação e manutenção da rede e que podem encostar em uma linha que, supostamente, deveria estar desenergizada pela concessionária, mas está sendo alimentada por um GD, sem que eles tenham conhecimento do fato (a norma IEEE 1547 enfatiza também que um GD não pode energizar uma rede interligada)(IEEE, 2009);
- Quando a rede for reenergizada pela concessionária, sem o conhecimento de que uma ilha foi formada por uma GD, podem ocorrer fenômenos transitórios severos, devido à falta de sincronismo do gerador da usina com a rede. Estes transitórios podem acarretar danos para os equipamentos alimentados pela ilha e, principalmente, danos ao gerador (IEEE, 2009);
- Uma ilha é, muitas vezes, um sistema não controlado, ou seja, a garantia de qualidade de energia e os níveis de tensão e frequência podem variar significativamente, se o gerador distribuído não possuir sistemas de proteção que garantam fornecimento de tensão e corrente em níveis que não prejudiquem o funcionamento de equipamentos dos consumidores conectados à ilha (WILSON; MAUCH; MARTEL, 2004).

Por estes motivos, as concessionárias de distribuição costumam exigir que a GD seja desconectada do sistema assim que ocorrer a desenergização da rede do lado da concessionária. A Celesc, concessionária de energia elétrica de Santa Catarina, exige em seu manual de procedimentos para conexão de micro ou minigeração ao sistema de distribuição, que a proteção do acessante tenha a capacidade de detectar a desconexão do sistema da Celesc e desconecte os geradores em até 2 segundos após a desconexão da rede (CELESC, 2014). Este é o mesmo limite dado pela norma IEEE (2009).

Vários são os procedimentos adotados pelas geradoras para evitar o ilhamento, desde técnicas remotas baseadas em esquemas de comunicação a técnicas locais, que se baseiam na medição dos sinais de corrente e tensão (passiva) ou na injeção de distúrbios na rede e medição das respostas (ativa) (WILSON; MAUCH; MARTEL, 2004).

Com o conceito de microrredes, no entanto, a operação em modo ilhado poderia ser tornar uma realidade, promovendo o aumento da disponibilidade da rede para cargas críticas.

Em condições emergenciais, como no caso de problemas graves na rede principal, a microrrede pode ser separada intencionalmente da rede principal através da operação de uma chave estática instalada no ponto de conexão comum com a concessionária. Também é possível manobrar a microrrede para o modo de operação ilhado, através da chave estática, mesmo na ausência de problemas operacionais na rede principal, mas por quaisquer outras questões, como aspectos econômicos, manutenção, etc (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

6 ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Este capítulo tratará de estabilidade em sistemas elétricos distribuição e suas especificidades quando comparada com os conceitos de estabilidade em sistemas de potência.

Alguns conceitos mais genéricos de estabilidade em sistemas de potência são apresentados no Apêndice B.

6.1 ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas de distribuição geralmente começam em uma subestação de distribuição alimentada por uma ou mais linhas de transmissão ou subtransmissão. De acordo com definições da ANEEL (2017), o sistema de distribuição no Brasil pode operar em níveis de alta tensão (igual ou superior a 69 e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV), sendo composto pela rede elétrica e pelo conjunto de equipamentos e instalações.

De cada subestação de distribuição partem um ou mais alimentadores primários, que até pouco tempo atrás, antes do surgimento de fontes distribuídas de energia, eram predominantemente radiais e com fluxo de potência unidirecional, da subestação ao usuário (KERSTING, 2002).

Kersting (2002) destaca em seu livro que uma característica importante dos sistemas de distribuição, que os diferenciam dos sistemas de transmissão é o fato de o carregamento de um alimentador de distribuição geralmente ser desbalanceado, devido ao grande número de cargas monofásicas que são alimentadas.

Nos sistemas de distribuição estão presentes os mais frequentes fenômenos que acarretam em perda de potência mensurável e interrupções de fornecimento (THAKUD, 2016 apud CHAGAS, 2016). Também são nos sistemas de distribuição que estão conectados diretamente cargas potencialmente perturbadoras, que utilizam eletrônica, e fontes de geração de energia distribuída e descentralizada, contribuindo com o aumento da complexidade do sistema.

As redes que antigamente eram predominantemente radiais e com fluxo de potência unidirecional, agora tomam a forma de uma malha mais complexa com a presença de fluxos de potência bidirecionais, com o aumento da penetração da geração distribuída. Desta forma, a estabilidade do sistema que antigamente era preocupação quase que exclusiva dos operadores dos sistemas de alta tensão, com o aumento da complexidade do sistema de distribuição, passa a exigir maior atenção por parte das concessionárias de distribuição e dos próprios agentes que acessam o sistema.

Alguns dos impactos que a penetração de fontes de geração distribuída pode acarretar nos sistemas de distribuição são (HUANG, 2006):

- **Tensão:** a conexão de geradores com capacidade relativamente elevada nas redes de distribuição pode acarretar em elevações de tensão, dificultando a tarefa das concessionárias de distribuição em manter a tensão dentro dos limites exigidos;
- **Estabilidade:** o aumento da participação de fontes distribuídas, geralmente de menor porte, causa uma redução na inércia do sistema, deixando-o muito mais suscetível a oscilações;
- **Qualidade de energia:** geradores distribuídos de maior capacidade ou conectados a um sistema de distribuição fraco (onde a potência gerada na rede de distribuição corresponde a uma importante fração da potência de curto-circuito nessa mesma rede) geralmente contribuem com problemas de qualidade de energia, tais como flutuações de frequência, ruídos de alta frequência, distorções harmônicas além de *spikes*, afundamento e elevações de tensão;
- **Proteção:** a conexão de novas fontes de geração impacta na coordenação da proteção, o que resulta na necessidade de um novo ajuste na proteção, devido a mudanças na magnitude, duração e direção das correntes de falta;
- **Segurança:** o fato de se ter o sistema energizado por outros pontos além da subestação da concessionária dificulta as políticas de segurança de operação no caso de manutenção na rede⁷.

⁷ Geralmente as concessionárias exigem que as geradoras conectadas ao sistema de distribuição tenham um sistema de proteção que detecte a desconexão da rede da concessionária e impeça que a geradora opere isolada, alimentando consumidores conectados à rede. Uma das justificativas para este tipo de exigência é a segurança dos operadores que trabalham na manutenção da rede.

Em análise feita por Salim (2011) também é demonstrado que, apesar de geralmente não se considerar oscilações eletromecânicas em sistemas de distribuição de energia, visto que geralmente os geradores síncronos eram representados somente pelas grandes máquinas térmicas e hidráulicas de grandes centrais geradores, esta realidade deve ser revista com o aumento da penetração da geração distribuída. A conexão de geradores de menor porte às redes de distribuição de energia leva ao aparecimento de oscilações pouco amortecidas.

O mesmo trabalho também demonstra que a regulação do fator de potência de máquinas síncronas conectadas à rede de distribuição pode afetar a estabilidade do sistema frente a pequenas perturbações.

Todas estas diferenças entre a análise de estabilidade em sistemas de transmissão e de distribuição enfatizam a importância de estudos mais detalhados do impacto da geração distribuída na estabilidade de sistemas elétricos, de modo que se possa tirar maior proveito dos benefícios que este tipo de geração pode oferecer ao sistema, principalmente no que se refere ao aumento da confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia, sem colocar em risco a integridade da rede.

6.2 TIPOS DE CARGA COMUMENTE UTILIZADOS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE

A correta modelagem das cargas é um importante passo na análise de sistemas de potência, já que a estabilidade do sistema depende diretamente de sua habilidade em constantemente ajustar a potência gerada pelas unidades de geração à potência exigida pelas cargas (KUNDUR, 1994).

Uma grande dificuldade em se modelar as cargas em um sistema de potência se deve ao fato de que o modelo utilizado deve representar uma grande quantidade de equipamentos conectados à rede, com diferentes características, e com composição alterada constantemente, em função de fatores como horário, dia da semana, condições ambientais, etc. Diante da dificuldade em se representar com precisão a totalidade de cargas conectadas à rede, torna-se evidente que sua representação nos estudos geralmente é feita com uma parcela de simplificação (KUNDUR, 1994).

Para os estudos de sistema de potência, o termo “carga” não considera somente os equipamentos alimentados pela rede, mas também (IEEE, 1993):

- Transformadores abaixadores das subestações e de distribuição;
- Alimentadores dos sistemas de subtransmissão e distribuição primária e secundária;
- Capacitores *shunt*;
- Reguladores de tensão;
- Cabeamento, transformadores e capacitores dos consumidores conectados à rede.

Os elementos incluídos na modelagem de cargas para determinados estudos dependem de quais fenômenos se deseja analisar. A referência IEEE (1993) cita, por exemplo, que em estudos envolvendo sistema de transmissão de grande porte geralmente são omitidos muitos dos dados dos sistemas de distribuição.

Como os sistemas de transmissão e subtransmissão conectam geradores de grande porte aos centros de carga é possível considerar que sua configuração seja esparsa, podendo ser composta por algumas centenas de nós. Já para o caso dos sistemas de distribuição a situação é oposta, já que são muitos os consumidores e equipamentos elétricos conectados à rede e em uma área menor, tornando-os bastante densos, com centenas de milhares de nós (MOCHOSWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008).

Desta forma, quando se analisa sistemas de potência, geralmente se modelam somente os sistemas de transmissão e subtransmissão, substituindo-se os sistemas de distribuição por cargas equivalentes, muitas vezes referenciadas como cargas compostas. Estas cargas passam a representar uma grande parte do sistema de distribuição, tanto em média quanto em baixa tensão, além de equipamentos e as cargas de consumidores propriamente ditas (MOCHOSWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008).

Os modelos de carga podem ser divididos basicamente em duas categorias: estática e dinâmica (LALOR, 2005). No Apêndice C são apresentados maiores detalhes sobre os tipos de cargas utilizados em estudos de estabilidade.

7 CONTROLE EM MICRORREDES

Este capítulo trará alguns aspectos de sistemas de controle para microrredes e algumas peculiaridades que devem ser consideradas nos estudos de controle de redes conectadas a sistemas de distribuição, quando comparada com a abordagem tradicional de controle, encontrada nos livros de sistemas elétricos de potência e mais focada em redes de grande porte.

No apêndice D são apresentados alguns aspectos sobre a abordagem tradicional de controle, com foco na regulação de velocidade e tensão em máquinas síncronas.

7.1 DESAFIOS DO CONTROLE EM MICRORREDES

Antes de tratar especificamente do controle de microrredes, é muito importante ressaltar que uma das razões da existência de microrredes é que elas possam operar em paralelo com a rede da concessionária e de forma ilhada, sendo capazes de fazer a transição entre estes dois modos, sem comprometer a qualidade de energia e garantindo um aumento da eficiência e da confiabilidade da rede como um todo.

Desta realidade decorrem desafios bastante importantes quando se fala em microrrede, considerando-se a teoria tradicional de controle em sistemas elétricos de potência (apêndice D):

- **Referência de frequência e tensão:** enquanto a microrrede estiver conectada em paralelo com a rede da concessionária, a rede da concessionária irá determinar a referência de frequência e de tensão no ponto comum de conexão. Quando ocorrer o ilhamento, o sistema de controle deve ser capaz de mudar sua condição de forma a considerar uma referência de frequência e tensão dentro da microrrede;
- **Reserva de potência:** para que uma microrrede possa operar de forma ilhada por bastante tempo, mantendo-se os níveis de qualidade de energia, é necessário se considerar que toda a reserva de potência necessária às cargas desta microrrede deverá ser suprida por ela própria, através de

unidades de armazenamento de energia ou fontes de geração reserva. Caso isto não ocorra, deve-se considerar que o equilíbrio de oferta-demanda será obtido através gestão das cargas críticas que se manterão conectadas. Esta condição é essencial para se manter os níveis de qualidade de energia, conforme já descrito neste capítulo;

- **Despacho de potência:** o despacho ótimo de potência, que antes era considerado em nível macro, pelo operador do sistema ou concessionária, deve fazer parte do conceito de controle da microrrede, de forma a gerenciar e otimizar da melhor forma possível os recursos da microrrede, atendendo às partes interessadas;

- **Fluxo de potência bidirecional:** a integração da geração distribuída, principalmente em baixa tensão, pode levar a fluxos reversos de potência e, conseqüentemente, a problemas no controle de tensão (IEEE-PES, 2014);

- **Modelagem:** enquanto em análise de sistemas de potência geralmente se considera as fases balanceadas, linhas predominantemente indutivas e cargas mais constantes, o mesmo não é necessariamente válido em microrredes. Em sistemas de baixa e média tensão é muito mais comum que as fases estejam desbalanceadas e as cargas e redes tenham características mais resistivas (IEEE-PES, 2014);

- **Baixa inércia:** diferentemente dos sistemas de potência de grande porte, supridos basicamente por grandes geradores síncronos, as microrredes geralmente são compostas por fontes cuja interface com a rede é feita através de dispositivos de eletrônica de potência. As fontes de geração de energia através de geradores síncronos diretamente acoplados à microrrede geralmente são de potência reduzida e não representam grande percentual da potência produzida. Por este motivo, microrredes podem ter característica de baixa inércia, o que pode levar a grandes desvios de frequência no caso de distúrbios;

- **Estabilidade:** por se tratar de um uma rede sem a robustez da rede da concessionária, dada sua reduzida inércia, pode surgir oscilações locais devido à interação entre os sistemas de controle das unidades de geração distribuída. Além disso, problemas de estabilidade transitória podem surgir na transição os modos de operação conectado à rede principal e ilhado (IEEE-PES, 2014);

- **Predição da curva de geração:** deve-se ao fato de as microrredes serem alimentadas basicamente por fontes renováveis, e muitas delas terem seu desempenho diretamente afetado pelas condições climáticas, como vento e sol (nestes casos não é possível fazer reserva do “combustível” da motriz, como se faz no caso de reservatório das hidrelétricas ou como no estoque de carvão para uma termelétrica). A quantidade reduzida de cargas e fontes de uma microrrede também traz dificuldades quando se considera que há um aumento da taxa de falha de equipamentos e que a falha de somente um equipamento pode acarretar em desvio significativo no equilíbrio carga-demanda da microrrede, diferentemente do que ocorre com redes de grande porte.

Dadas estas considerações, o sistema de controle da microrrede deve ser capaz de assegurar sua operação confiável e econômica, diferentemente do que ocorre em sistemas de controle de redes de distribuição convencionais, que operam basicamente de forma passiva. Como o ambiente de uma microrrede é caracterizado por maior sensibilidade às constantes mudanças de topologia, é essencial que o sistema de controle seja robusto e adaptativo (IEEE-PES, 2014).

As cargas consideradas sensíveis (prioritárias) devem preferencialmente ser alimentadas por uma ou mais fontes de geração distribuída, enquanto as não sensíveis devem ser desligadas em caso de contingência ou problemas no equilíbrio geração-demanda.

7.1.1 Característica *droop* em microrredes

Uma diferença importante entre sistemas de potência de grande porte e de microrredes, e que merece destaque neste capítulo, se refere ao *droop* de tensão e de frequência.

As características *droop* ou de estatismo, comumente tratada na teoria de controle de sistemas elétricos de potência (Apêndice D) se referem basicamente a sistemas de grande porte convencionais, com predominância de geradores síncronos de grande porte e grande inércia e com impedância de rede predominantemente indutiva ($X \gg R$). Nestes casos, na ocasião de um desbalanço de potência decorrente de um distúrbio, a potência é logo equilibrada pela energia

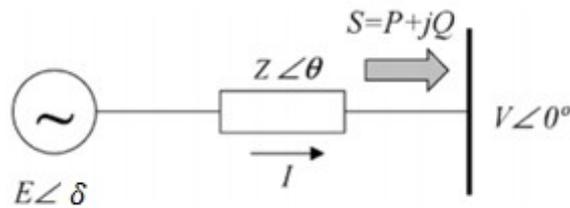
cinética das partes girantes dos geradores síncronos (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014),.

Considerando-se que microrredes possuem grande quantidade de fontes renováveis de energia, geralmente conectadas à rede através de conversores, não há quantidade significativa de inércia para equilibrar desbalanços de potência, assim como ocorre em sistemas de grande porte. Além disso, em redes de distribuição, onde conceitualmente se formariam as microrredes, a relação X/R é bastante baixa, ou seja, a impedância da rede é predominantemente resistiva.

Sabe-se, da teoria de circuitos elétricos, que em redes resistivas a potência ativa P depende principalmente da tensão V enquanto a reativa Q , do ângulo de carga δ , o que sugere uma característica diferente de *droop* para o caso de microrredes (principalmente em baixa tensão), denominado *droop* reverso em muitos artigos científicos (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Neste caso, a magnitude da tensão nas barras se torna altamente dependente da potência ativa injetada na rede (RESE, 2012).

Analisando-se o fluxo de potência do circuito da Figura 27, com uma fonte conectada ao barramento infinito V através de uma impedância Z fica mais evidente a inversão da relação $P - \omega$ e $Q - V$.

Figura 27 - Fonte conectada a uma barra CA



Fonte: GUERRERO, 2005 (adaptado pela autora).

A potência que entra na barra, expressa por $S = P + jQ$, tem suas componentes ativa e reativa dadas, respectivamente, por (GUERRERO; *et al*, 2005):

$$P = \frac{EV}{Z} \cos(\theta - \delta) - \frac{V^2}{Z} \cos \theta \quad (5)$$

$$Q = \frac{EV}{Z} \sin(\theta - \delta) - \frac{V^2}{Z} \sin \theta \quad (6)$$

onde E e V são, respectivamente, as amplitudes da tensão na fonte e na barra, δ o ângulo de potência da fonte e Z a amplitude da impedância de equivalente (fonte e linha).

Considerando-se uma rede predominantemente indutiva, ou seja, $Z = jX$ ($\theta = 90^\circ$), as equações (5) e (6) ficariam reduzidas a:

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (7)$$

$$Q = \frac{EV \cos \delta - V^2}{X} \quad (8)$$

Vale destacar que a equação (7) estabelece a mesma relação da equação (86), dada na 0, que trata da oscilação de máquinas síncronas conectadas a redes predominantemente indutivas.

Considerando-se uma pequena diferença de fase entre a tensão da fonte e da barra, a parte não linear das equações (7) e (8) poderia ser linearizada na forma $\sin \delta \approx \delta$ e $\cos \delta \approx 1$. Desta forma, pode-se observar uma grande dependência entre a potência ativa P e o ângulo de potência δ (lembrando que, da teoria de máquinas síncronas, a velocidade angular, diretamente acoplada à frequência, é dada por $\omega = d\delta/dt$), além de grande influência da diferença de amplitude das tensões E e V na potência reativa Q (GUERRERO; *et al*, 2005). Esta relação é bem representada em esquemas de *droop* $P - \omega$ e $Q - V$.

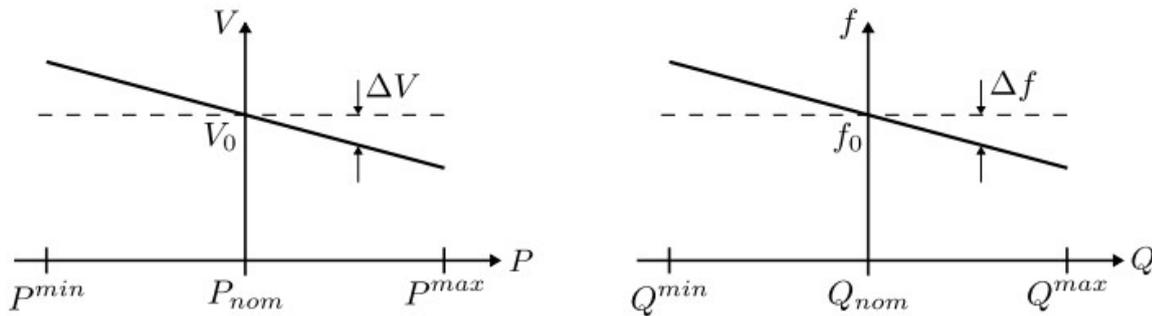
Quando a impedância equivalente da rede for predominantemente resistiva, ou seja,

$Z = R$ ($\theta = 0^\circ$), as potências ativa e reativa dadas pelas equações (7) e (8) se reduzem a:

$$P = \frac{EV \cos \delta - V^2}{R} \quad (9)$$

$$Q = -\frac{EV}{R} \sin \delta \quad (10)$$

Fazendo-se as mesmas considerações com relação ao ângulo de carga, verifica-se que quando a impedância é predominantemente resistiva, a potência ativa P passa a ser altamente dependente da tensão V e a potência reativa, do ângulo δ . Desta forma, um esquema de controle que levasse em consideração as características *droop* deveria estar baseado na relação $P - V$ e $Q - \omega$ (GUERRERO; *et al*, 2005), conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - *Droop* reverso

Fonte: RESE, 2012

Quando se trata de geradores síncronos conectados a redes resistivas, cada máquina continua tendo uma referência de potência reativa para obter o perfil de tensão que corresponda à potência ativa desejada. Como Q é função de δ , que por sua vez é ajustado pela característica $P - V$ do gerador, então segue sendo possível ajustar a tensão dos geradores através da potência reativa (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

Enquanto uma microrrede estiver operando em paralelo com a rede principal, seus controladores operam de forma a manter constante as potências ativa e reativa, sendo a frequência e a tensão reguladas pela rede principal. Quando a microrrede passa para a condição ilhada, as fontes internas à mesma passam a serem as responsáveis por manter a tensão e a frequência dentro dos limites aceitáveis, rastreando as variações na potência das cargas (ZANGENEH, 2014).

Em uma microrrede, a maior parte das fontes de potência é conectada à rede através de conversores e, caso se opte por fazer o controle de divisão de cargas através de *droop*⁸, pode-se considerar a característica reversa quando a rede for resistiva. Quando nesta mesma rede há geradores síncronos diretamente acoplados (geralmente com características de controle $P - \omega$), especial cuidado deve ser tomado com a estratégia de controle utilizada por estes equipamentos, caso o objetivo seja que eles participem da divisão de potência com outras fontes. Para geradores síncronos, as mudanças de frequência são induzidas por mudanças na potência ativa, enquanto em equipamentos conectados através de conversores, as

⁸ O método de controle com *droop* para unidades conectadas através de inversores permite que o controle primário seja feito sem o uso de comunicação, mesmo com compartilhamento de carga o que traz benefícios em termos de confiabilidade (não está sujeito a falhas de comunicação) e modularidade (a entrada de uma nova fonte não afeta o controle primário das outras já em funcionamento) (VANDEVELDE, 2012).

mudanças de frequência são induzidas por mudanças na potência reativa. Este comportamento diferente das unidades leva a uma interferência entre as variações de frequência das unidades. Análise semelhante pode ser feita para variações de tensão (VANDOORN; *et al*, 2012).

Para evitar estas interferências, deve-se ter o cuidado de casar as estratégias de controle dos geradores síncronos e das unidades conectadas à rede através de inversores. Na referência (VANDOORN; *et al*, 2012) são apresentadas estratégias de controle para se fazer compatibilização.

7.1.2 Formas de operação para geradores síncronos distribuídos

Apesar de os dispositivos com interface eletrônica estarem em maior quantidade, os geradores síncronos que geralmente são conectados a microrredes (normalmente movidos a gás ou diesel) possuem grande capacidade de injeção de potência (VANDOORN; *et al*, 2012), são rápidos, podem assumir cargas entre 10 e 12 segundos após sua partida, além de chegar a sua capacidade nominal em poucos segundos (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Estas características evidenciam um grande potencial que este tipo de equipamento tem no controle de estabilidade de microrredes.

Considerando os diferentes modos de operação de um gerador síncrono em redes isoladas, podem-se tomar três diferentes métodos de operação para estas máquinas, quais sejam: barra PQ, barra PV e como barra *swing* (ZANGENEH, 2014).

7.1.2.1 Operação como barra PQ

Operando como uma barra PQ, a potência ativa e reativa da máquina são especificadas e as tensões e defasamentos angulares são incógnitas (KUNDUR, 1994).

Neste tipo de operação, o gerador síncrono opera seguindo a tensão e a frequência da rede, que é determinada por outra(s) fonte(s). Sendo assim, ele acaba não participando do compartilhamento de potências da microrrede, ou seja, quando

há um desequilíbrio entre carga e geração, sua potência permanece constante, enquanto outras fontes se encarregam de compensar esta diferença de potência, seja por aumento (caso possível) ou por redução na geração.

Considerando-se que os geradores síncronos geralmente são “despacháveis”, ou seja, podem ter sua potência de saída ajustada (dentro dos limites operacionais), conforme a demanda, ao contrário de outras fontes renováveis que formariam parte de uma microrrede, como eólica e solar, a solução de se manter sua potência de saída constante não se mostra como uma solução ótima no sentido de melhorar a flexibilidade e estabilidade da rede (VANDOORN; *et al*, 2012).

7.1.2.2 Operação como barra PV

Nesta condição, o gerador opera como uma fonte de potência ativa e tensão controladas, enquanto que para a potência reativa, geralmente são estabelecidos os limites da máquina. O controle da tensão é feito através de regulador automático de tensão (AVR), enquanto o controle de velocidade é feito da mesma forma que no controle PQ (ZANGENEH, 2014).

7.1.2.3 Operação como barra *swing* (*slack*)

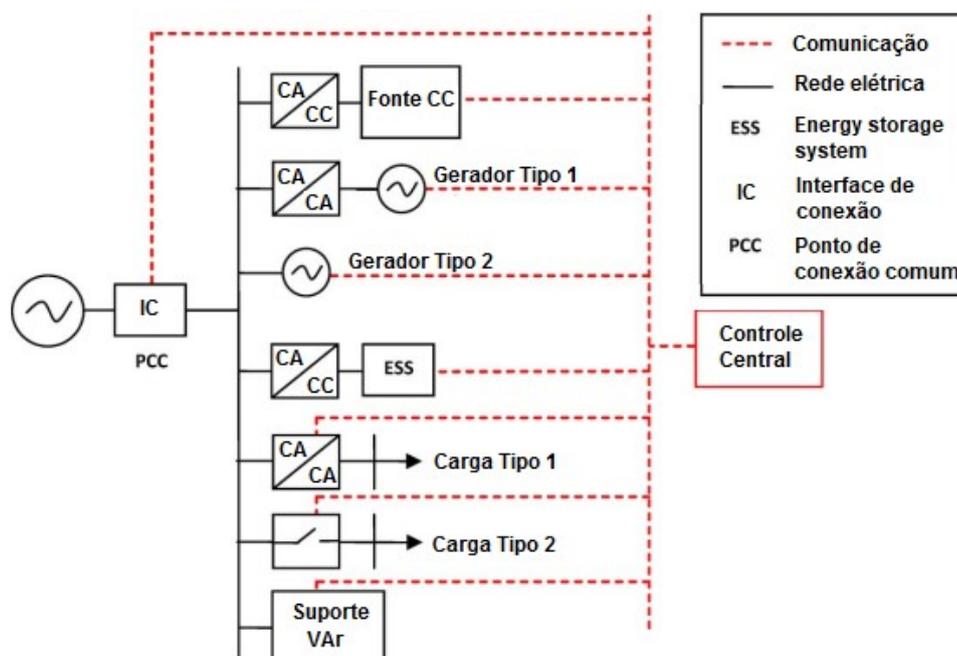
Neste modo de operação, o gerador síncrono é responsável por controlar tanto a tensão quanto a frequência, rastreando as referências de tensão e frequência para a rede. Desta forma, o gerador opera como uma unidade “mestre”, regulando a tensão e a frequência da rede. Este tipo de controle costuma ser considerado como menos confiável, já que deposita a responsabilidade da regulação da rede em uma única unidade (ZANGENEH, 2014).

7.2 TIPOS DE ELEMENTOS EM UMA MICRORREDE

Um ponto importante a ser considerado antes de se tratar as metodologias de controle em microrredes são os tipos de elementos existentes neste tipo de sistema,

já que diferentes elementos podem ter diferentes comportamentos frente a uma variedade de fatores. Em geral, em uma microrrede puramente elétrica (também existem filosofias de microrrede envolvendo energia térmica, por exemplo) podem existir os componentes ilustrados na Figura 29.

Figura 29 – Componentes gerais de uma microrrede



Fonte: IEEE-PES (2014), traduzido pela autora.

A interface de conexão (IC) de uma microrrede no ponto comum de conexão (PCC) pode ser feita através de um disjuntor, chaves de estado sólido ou conversores *back-to-back*. Fontes de geração de energia em CC, como painéis solares e células combustível, e dispositivos de armazenamento de energia (como baterias), são conectados ao barramento através de conversores CA-CC. Geradores convencionais, como os geradores síncronos, podem ser acoplados diretamente à rede ou através de conversores CA-CA. Alguns tipos de geradores, como os de velocidade variável, necessariamente devem ser conectados através de conversores. Cargas podem ser acopladas diretamente através de disjuntores ou através de conversores CA-CA. Assim como em sistemas de potência tradicionais, também é necessário ter dispositivos para compensação reativa, como bancos de capacitores, SVCs ou STATCOMs (IEEE-PES, 2014).

Entre as fontes de geração de energia, algumas são totalmente controláveis (despacháveis), como geradores síncronos, enquanto outras não são, como os

painéis solares, que geralmente são utilizadas de forma a extrair seu máximo de potência, até porque se utilizam de combustível renovável e teoricamente sem custo. Vários estudos, porém, defendem o uso de sistemas de armazenamento de energia para tornar fontes não despacháveis em despacháveis.

7.3 HIERARQUIA DE CONTROLE EM UMA MICRORREDE

Como já comentado, a grande penetração de fontes de geração distribuída aumenta a complexidade do controle, proteção e comunicação dos sistemas de distribuição, que a princípio foram concebidos para operar de forma radial, sem fontes de geração na baixa tensão, ou seja, com fluxo de potência em uma só direção. O grande desafio dos sistemas de gestão e controle de microrredes é, portanto, integrar as inúmeras fontes nas redes de distribuição existentes, coordenando seus sistemas de geração, armazenamento e, dependendo da situação, as cargas, limitando seus potenciais efeitos negativos na operação e controle da rede (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

Existem diversas técnicas para fazer a coordenação entre as diversas unidades de uma microrrede que vão desde o uso de um controle totalmente centralizado, como representado na Figura 29, até o uso de controles totalmente descentralizados. Enquanto um controle totalmente centralizado pode se tornar inviável devido à necessidade de uma grande rede de comunicação e processamento de dados, um controle totalmente descentralizado também pode não ser possível devido ao acoplamento entre as operações das várias unidades da rede exigir um mínimo de coordenação entre elas, o que dificilmente seria obtido somente com o uso de variáveis locais (IEEE-PES, 2014).

A escolha entre controle descentralizado e centralizado depende dos objetivos e das características específicas da microrrede a ser controlada, além, é claro, dos recursos, pessoal e equipamentos disponíveis (DIMEAS, 2014).

7.3.1 Controle descentralizado

Em redes com controle descentralizado, cada fonte é controlada somente com base em medições locais e a responsabilidade principal é dada aos controladores das microfones (RESE, 2012). Os tipos de controle utilizados dependem do tipo de fonte utilizada e geralmente não dependem de *links* de comunicação, resultando em circuitos mais simples e baratos (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

Este tipo de estrutura é viável nos casos em que as diversas fontes de geração de energia são de proprietários diferentes e as decisões são tomadas localmente, considerando-se questões operacionais e de mercado.

Em um controle descentralizado, há um menor tráfego de informações, já que as decisões são tomadas localmente e somente parte da informação é transferida para níveis mais elevados da hierarquia de controle.

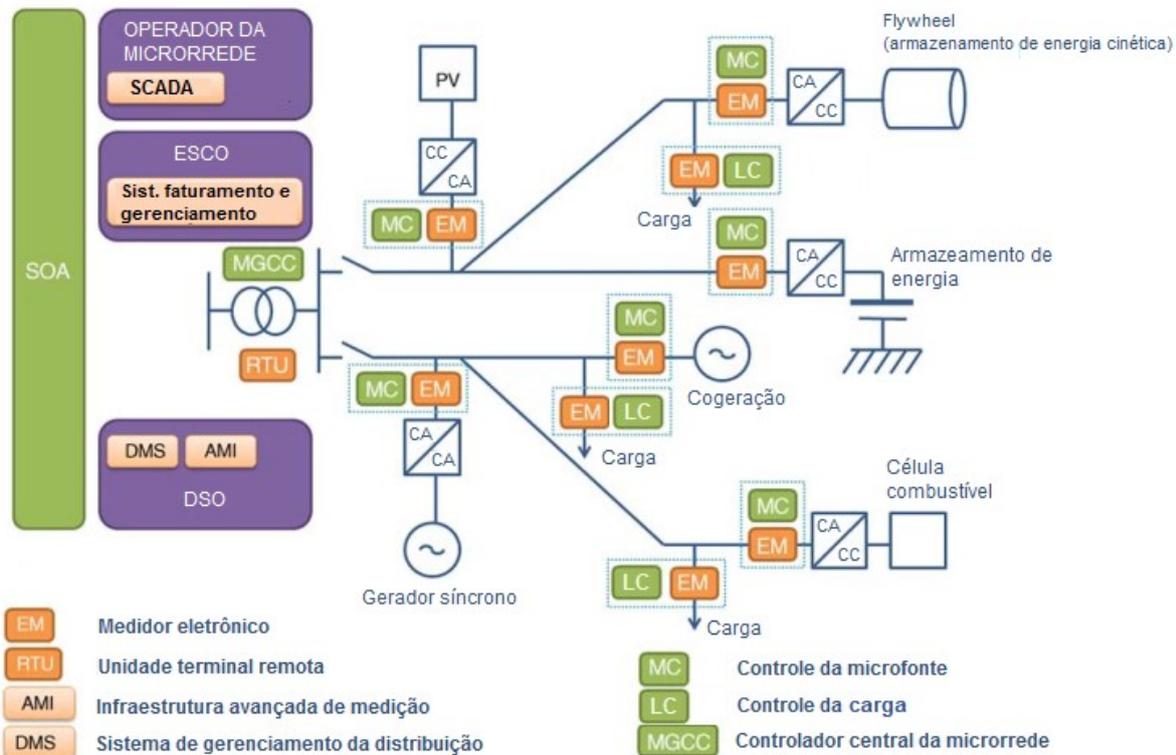
Uma das formas de se implantar um controle descentralizado é baseando-se na teoria de sistema multiagentes (SMA), que descreve algoritmos de coordenação, comunicação entre agentes e a organização de todo o sistema. Na referência (DIMEAS, 2014) é possível encontrar maiores informações sobre a estruturação de uma microrrede com controle descentralizado e as diversas entidades que a compõe.

7.3.2 Controle centralizado (hierárquico)

Não existe padrão para a estrutura de uma microrrede, já que sua configuração depende do tipo de microrrede, da infraestrutura existente e do tamanho do investimento que se deseja fazer (DIMEAS, 2014).

A Figura 30 apresenta uma microrrede com uma estrutura hierárquica mais complexa, onde se observam vários níveis de controle: local ou primário (MC – *microsource control* e LC – *load control*), secundário ou controle central da microrrede (MGCC – *microgrid central controller*) e gerenciamento e controle do sistema de distribuição ou terciário (DMS – *distribution management system*).

Figura 30 - Exemplo de estrutura de gerenciamento de uma microrrede



Fonte: adaptado pela autora (2017) de (DIMEAS; *et al*, 2014,)

Detalhes sobre os diversos operadores representados na Figura 30 podem ser encontrados na referência (DIMEAS; *et al*, 2014).

7.3.2.1 Controle local ou primário (MC e LC)

Em uma estrutura hierárquica, o controle local ou primário é o primeiro nível da estrutura, assim como no controle primário de sistemas de potência (Apêndice D). O controle local é feito com base em medições locais e, por este motivo, não requer comunicação. É o nível com resposta mais rápida em uma estrutura hierárquica de controle e, por este motivo, e também por não precisar de meios de comunicação, nele são incluídas as funções de detecção de ilhamento, controle de potência ativa e compartilhamento de carga (IEEE-PES, 2014).

Assim como ocorre em grandes máquinas síncronas, nos geradores síncronos diretamente acoplados às microrredes o controle de potência de saída e compartilhamento de carga é feito pelos seus reguladores de tensão, reguladores de velocidade e por sua própria inércia (IEEE-PES, 2014).

De acordo com (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014), o controle da potência ativa e reativa geralmente é feito através de controladores com característica *droop*, embora existam diversos artigos científicos propondo diversos outros métodos de controle para microrredes, visto que esta é uma tendência para o setor elétrico nos próximos anos. Como já dito, este tipo de controlador tem a vantagem de não ser baseado em dados recebidos através de redes de comunicação, o que permite maior confiabilidade e reduz a complexidade do sistema.

Algumas referências ainda apresentam como alternativa a adoção de uma fonte *swing* com capacidade suficiente para servir como referência de tensão e frequência da microrrede, permitindo que estas grandezas sejam mantidas dentro dos limites aceitáveis na operação. Este é um método semelhante ao que acontece em sistemas de potência convencionais, onde a rede da concessionária serve como barra *swing* para as demais fontes (IEEE-PES, 2014).

Embora não representado na Figura 30, também é possível se utilizar controladores para fazer o controle local de cargas (LC). Esta é uma forma de se fazer o gerenciamento pelo lado da demanda, aumentando a flexibilidade e confiabilidade da rede.

O controlador da microrrede (MC) pode ser feito tanto com o uso de um *hardware* dedicado a este fim quanto por um *software* instalado no medidor eletrônico (EM), na interface eletrônica com a rede ou qualquer outro dispositivo ligado à fonte que tenha capacidade de processamento para a compilação dos dados de campo e execução da ação de controle (DIMEAS, 2014).

7.3.2.1.1 Controle secundário ou central (MGCC)

O controle secundário ou central é o responsável pela operação confiável, segura e econômica da microrrede, seja no modo conectado à rede principal, ou operando de forma ilhada (IEEE-PES, 2014). O MGCC é responsável pela otimização da operação da microrrede e a maximização do lucro (RESE, 2012), dentro de seus limites físicos e ambientais. Quanto maior a variedade de fontes e a dispersão da rede, mais complexa é a operação em modo isolado.

Este nível de controle tem, intencionalmente, uma malha mais lenta que o controle primário, de forma a desacoplar as duas ações de controle, reduzir a banda de comunicação através do uso de dados amostrados das variáveis da rede e ainda viabilizar a realização de cálculos mais complexos, já que este nível hierárquico lida com uma maior quantidade de informações (IEEE-PES, 2014).

Da mesma forma que em sistemas de potência convencionais, o controle secundário é responsável por prover os serviços ancilares da microrrede, o que compreende a regulação da carga e tensão, fornecimento de reativos, controle de perdas e da reserva de potência girante e não girante (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Além disso, pode fornecer os pontos de ajuste para os controles das microfones ou simplesmente supervisionar sua operação, além de poder ser utilizado para sincronizar as microfones antes da reconexão com a rede principal na transição do modo ilhado para em paralelo com a rede (DIMEAS, 2014).

7.3.2.2 Gerenciamento e controle do sistema de distribuição (DMS) ou controle *terciário*

É o nível hierárquico mais elevado de uma microrrede, geralmente responsável pela coordenação de múltiplas microrredes interagindo uma com a outra e pela comunicação com a rede principal da concessionária, podendo até ser considerado parte desta (IEEE-PES, 2014).

Um dos objetivos mais importantes do DMS é identificar a programação ótima de geração de forma a minimizar os custos de produção ao mesmo tempo em que se mantém o balanço de demanda e geração. Além disso, pode servir como um órgão supervisor das atividades de mercado da microrrede.

8 SISTEMAS DE CONTROLE PARA GERADORES SÍNCRONOS

Existem diversas formas de se fazer o controle de frequência e tensão de máquinas síncronas e com a evolução científica e tecnológica, cada vez mais surgem novas propostas de estratégias para este tipo de controle. Na literatura tradicional de sistemas de potência, como em (KUNDUR, 1994) e (GIBBARD; POURBEIK; VOWLES) geralmente são apresentadas alternativas de regulação de frequência e tensão por meio de controladores PI ou PID, porém em referências bibliográficas mais recentes já são apresentadas novas alternativas de controle, baseados em diferentes algoritmos implantados em dispositivos microprocessados.

Neste capítulo serão apresentadas algumas estratégias de controle que podem ser utilizadas para a regulação de frequência e tensão dos geradores síncronos que serão utilizadas nas simulações do próximo capítulo deste trabalho. Na teoria tradicional de controle de geradores síncronos, as malhas de frequência e tensão geralmente são consideradas como desacopladas, devido à diferença entre as dinâmicas de ambas. Por este motivo, o projeto dos reguladores de velocidade e tensão geralmente são feitos separadamente na maioria dos casos, como apresentados a seguir.

8.1.1 Reguladores de velocidade

Nesta seção serão abordadas diversas técnicas de controle existentes na literatura para a regulação de velocidade, e conseqüentemente da frequência, de máquinas síncronas.

São tratadas desde técnicas convencionais, como o controle integral (isócrona) e o PI com *droop*, tradicionalmente encontradas em livros de sistemas de potência, até técnicas mais modernas, apresentadas em artigos recentes, como o controlador *washout* e as técnicas de controle preditivo baseado em modelo (*MPC – Model Predictive Control*).

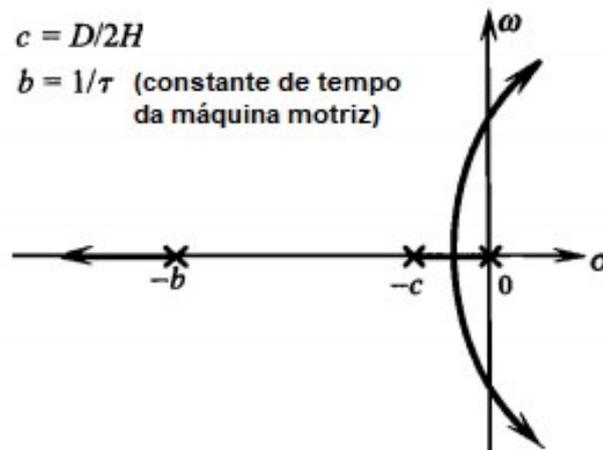
8.1.1.1 Controle de velocidade integral ou isócrono

Como tratado na teoria tradicional de controle, esta é uma das formas mais simples de regulação primária de velocidade, que utiliza um ganho (representado por K na Figura 61 do Apêndice D) e um integrador para levar o erro a zero após a ocorrência de uma perturbação.

Este tipo de regulador não deve ser utilizado em máquinas em paralelo, pois pode levar o sistema a não permitir uma adequada repartição de cargas entre as máquinas (fenômeno conhecido como “*hunting*”).

De acordo com Anderson e Fouad (2003), a resposta transitória de um regulador isócrono pode se avaliada traçando o gráfico do lugar das raízes da função de transferência em malha aberta do sistema no plano complexo, ilustrado na Figura 31⁹. Analisando-se o gráfico, conclui-se que o sistema com regulador isócrono é estável para pequenos valores de ganho K , porém terá uma resposta lenta, já que duas raízes ou polos estão muito próximos à origem. Para valores elevados de ganho o sistema fica instável.

Figura 31 – Gráfico do lugar das raízes típico para um regulador isócrono



Fonte: (ANDERSON; FOUAD, 2003).

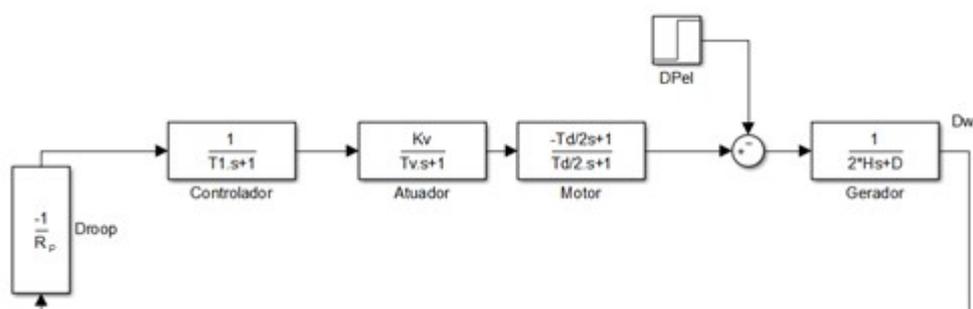
⁹ A análise do lugar das raízes feita na referência (ANDERSON; FOUAD, 2003) para os reguladores isócrono e com *droop* é feita sobre um gerador movido por uma turbina com constante de tempo τ . No modelo utilizado neste trabalho, detalhado no próximo capítulo, o motor (máquina motriz) é representado por um atraso τ_D e é acoplado por um atuador com constante de tempo τ_a . Como $\tau_a > \tau_D$, pode-se utilizar sem prejuízo o gráfico da Figura 31 e da Figura 33.

8.1.1.2 Controle de velocidade com droop

Quando há mais de uma máquina operando em paralelo na rede, é comum que se utilize um controlador com queda ou *droop*, para permitir o compartilhamento de cargas e operação das máquinas em paralelo, sem que o sistema fique instável. Desta forma, o controle local (primário), quando da ocorrência de um distúrbio, leva a frequência a um novo estado de equilíbrio estacionário com um pequeno erro em regime permanente, que posteriormente é levado à zero através da atuação de uma malha de controle complementar centralizado (controle secundário) ou pela presença de uma fonte de potência suficientemente elevada e com reserva de potência que possa fazer com que a frequência do sistema retome seu valor de referência. Em alguns casos esta fonte de potência pode ser considerada um barramento infinito.

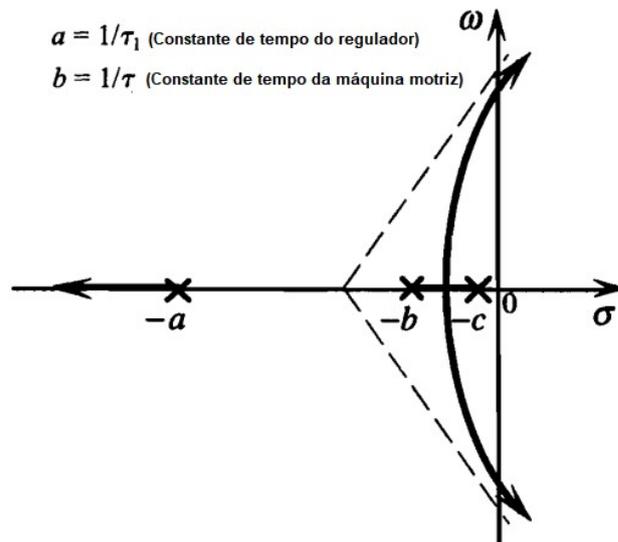
Na Figura 32 é apresentado um exemplo de diagrama de blocos de um controle primário com *droop* para um motogerador síncrono (detalhes desta planta serão dados no capítulo 9).

Figura 32 – Exemplo diagrama de blocos de um malha de frequência com controle com *droop*



Fonte: própria autora (2017).

O ajuste deste regulador também pode ser feito analisando-se o lugar das raízes da função de transferência em malha aberta do sistema. Como a constante de tempo T'_{d0} do motor é muito menor que a constante de tempo do atuador τ_v , neste caso, a função de transferência que representa a dinâmica do motor pode ser desprezada (Figura 33). Segundo Anderson e Fouad (2003), quanto mais afastado o polo a do eixo imaginário, melhor será a resposta transitória do regulador.

Figura 33 – Gráfico do lugar das raízes típico para um regulador com *droop*

Fonte: (ANDERSON; FOUAD, 2003).

8.1.1.3 Controle de velocidade com filtro washout

Embora o controle *droop* resulte em maior velocidade da resposta do sistema e maior margem de estabilidade, ele pede a inclusão de uma malha de controle secundário para zerar o erro em regime permanente. Esta malha geralmente é gerenciada por um controle centralizado.

Considerando-se o que já foi tratado sobre microrredes na seção 7.1, é fácil perceber que o uso de sistemas de controle centralizados nem sempre é desejável, pois acaba exigindo o uso de *links* de comunicação, o que, além de encarecer o sistema, ainda diminui sua confiabilidade, já que insere mais um elemento sujeito a falhas.

Com o objetivo de superar a necessidade de controle secundário convencional, Yazdanian e Mehrizi-Sani (2016) propõem no documento *Washout Filter-Based Power Sharing* uma nova alternativa para implementar o compartilhamento de cargas entre geradores distribuídos em uma microrrede sem o uso de *links* de comunicação e com o uso de filtros *washout*¹⁰.

¹⁰ Um filtro *washout*, de acordo com Yazdanian e Mehrizi-Sani (2016), é um filtro passa alta de primeira ordem que rejeita componentes de corrente contínua e permite a passagem do componente transitório do sinal.

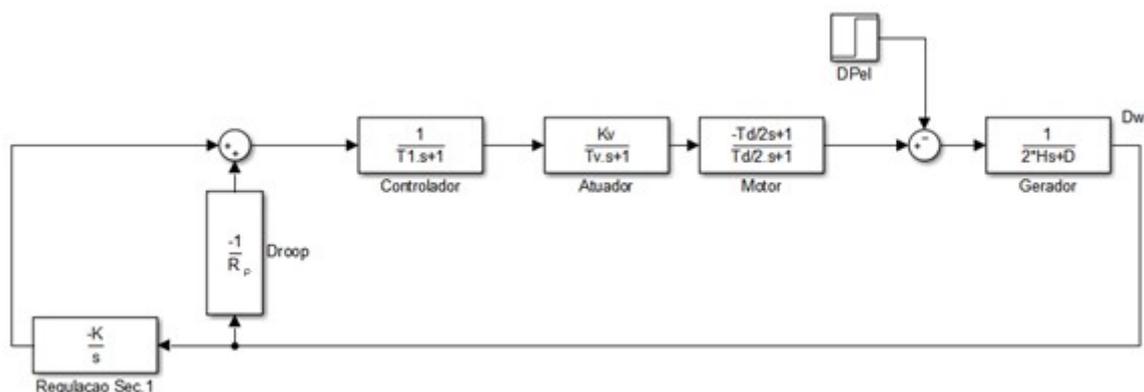
O desenvolvimento do filtro *washout* para compartilhamento de cargas entre geradores distribuídos e que possibilita desvio nulo de frequência é explanado a seguir.

O coeficiente *droop* relaciona a variação da frequência angular de uma máquina e de sua potência, conforme equação(11):

$$R_p = \frac{\omega - \omega_0}{P - P_0} \quad (11)$$

Embora o controle com *droop* seja baseado somente em medições locais, é necessário se utilizar uma malha adicional ao controle primário da máquina, com ação integrativa, de forma a levar o desvio de frequência a zero. Para o sistema com *droop* da Figura 32, o controle secundário seria representando como na Figura 34.

Figura 34 – Exemplo diagrama de blocos de um malha de frequência com controle com *droop* e regulação secundária



Fonte: própria autora (2017).

Na metodologia proposta por Yazdanian e Mehrizi-Sani (2016), é feita a derivada de ambos os lados da equação (11), obtendo-se:

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega + R_p \frac{d}{dt} \Delta P = 0 \quad (12)$$

Os autores afirmam que a equação (12) garante compartilhamento da potência em estado estacionário, porém não garante que a frequência retorne a seu valor nominal e propõem que se acrescente um fator $\Delta\omega$ a esta equação, como segue:

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega + R_p \frac{d}{dt} \Delta P + K_p \Delta\omega = 0 \quad (13)$$

Nesta nova condição, os termos derivativos são iguais a zero em estado estacionário e o termo $\Delta\omega$ acaba sendo forçado a zero também, fazendo com que a frequência convirja para seu valor nominal.

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação (13), e desconsiderando-se as condições iniciais, tem-se:

$$s\Delta\omega(s) + R_p s\Delta P(s) + K_p\Delta\omega(s) = 0 \quad (14)$$

que pode ser reescrita como:

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P(s)} = -\frac{R_p \cdot s}{s + K_p} \quad (15)$$

A equação (15) representa uma realimentação dinâmica baseada em um filtro *washout*, diferente da realimentação do controle com *droop*, que é estática. Quanto menor o valor de R_p , menor é o desvio de frequência durante o transitório e quanto maior o valor de K_p , menor o tempo para a restauração da frequência a seu valor de referência. Por outro lado, quanto menor o valor de R_p , maior o risco de instabilidade do sistema (YAZDANIAN; MEHRIZI-SANI, 2016).

Os autores do artigo *Washout Filter-Based Power Sharing* defendem que a maior vantagem do uso do filtro *washout* no laço de realimentação do controlador de velocidade é a de fazer o ponto de operação desejado mais robusto em relação às incertezas nos parâmetros do sistema.

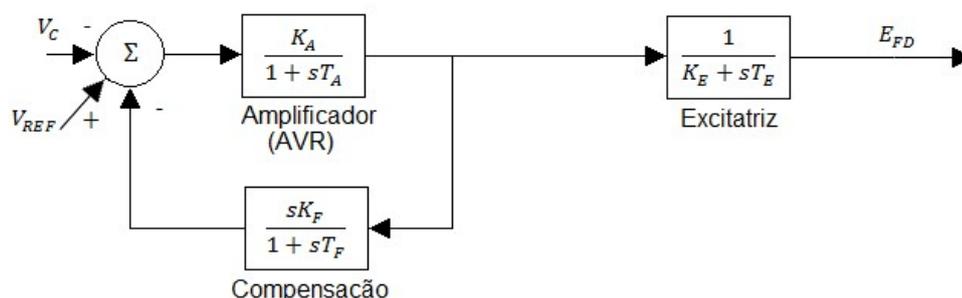
Na prática, analisando-se o diagrama de blocos da Figura 34, com a malha de controle primário com *droop* e secundário com ação integrativa, e rearranjando os blocos “*Droop*” e “Regulação Sec.1”, é possível chegar a uma função de transferência semelhante à apresentada na equação (15), dada por:

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P(s)} = -\frac{R_p \cdot s}{s + K} \quad (16)$$

8.1.2 Reguladores de tensão com compensação de realimentação

A estrutura do regulador automático de tensão (AVR) utilizado na dissertação é apresentada na Figura 35, que representa a mesma estrutura da Figura 71 de um AVR com sistema de excitação AC5A, porém sem considerar a saturação do sistema e a entrada V_s para o PSS.

Figura 35 – Exemplo diagrama de blocos de um regulador de tensão com excitatriz tipo AC5A da *IEEE*



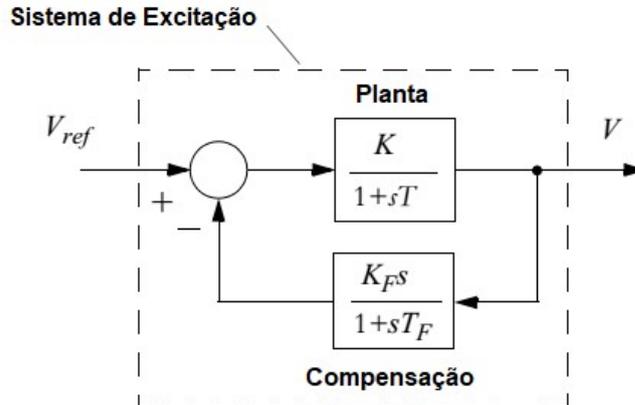
Fonte: própria autora (2017).

De acordo com Gibbard, Pourbeik e Vowles (2015), o objetivo da compensação é de derivar do sistema de excitação uma redução do ganho transitório ao longo da extensão das frequências modais, o que é obtido através escolha apropriada do ganho K_F e constante de tempo T_F .

No sistema de regulação de tensão utilizado, o principal sinal de entrada é V_C , que corresponde ao sinal de tensão nos terminais do gerador síncrono. O sinal da tensão de entrada é subtraído da tensão de referência, resultando em um sinal de erro para o amplificador. O ajuste dos parâmetros do bloco de compensação do sinal permite minimizar os desvios de fase introduzidos por elementos do sistema de excitação, já o bloco do amplificador é responsável pelos ganhos elevados e baixas constantes de tempo.

A análise dos parâmetros para ajuste do regulador é feita principalmente com base nos métodos de resposta em frequência e se concentra basicamente na determinação do ganho K_F e constante de tempo T_F . Para tal, Gibbard, Pourbeik e Vowles (2015) fazem uma simplificação do modelo do sistema de excitação (Figura 36), onde o bloco “Planta” representa o AVR e a excitatriz, para então usar os métodos de resposta em frequência a partir da função de transferência de malha fechada dada pela equação (17).

Figura 36 – Sistema de excitação representado como um simples sistema em malha fechada com compensação



Fonte: traduzido pela autora de (GIBBARD; POURBEIK; VOWLES, 2015)

$$\frac{V}{V_{ref}} = \frac{\frac{K}{T.T_F} (1 + sT_F)}{s^2 + \left(\frac{T+T_F+K.K_F}{T.T_F}\right) s + \frac{1}{T.T_F}} = K \frac{(1 + sT_F)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_1}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_2}\right)} \quad (17)$$

onde,

$$\omega_1 \omega_2 = \frac{1}{T.T_F} \quad (18)$$

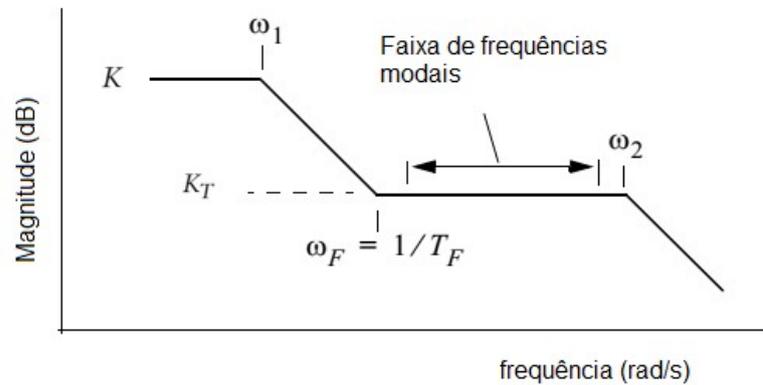
$$\omega_1 + \omega_2 = \frac{(T + T_F + K.K_F)}{T.T_F} \quad (19)$$

A função de transferência em malha fechada tem um zero em $s = -1/T_F = \omega_F$ e dois pólos em ω_1 e ω_2 . Com o objetivo de se obter uma redução aproximadamente constante na faixa de frequências modais¹¹ a resposta em frequência para a magnitude da função de transferência de malha fechada deve ter o formato apresentado na Figura 37 (GIBBARD; POURBEIK; VOWLES, 2015).

¹¹

Frequências naturais de oscilação eletromecânica do rotor

Figura 37 – Resposta em frequência desejada para o sistema



Fonte: traduzido pela autora de (GIBBARD; POURBEIK; VOWLES, 2015)

Sendo assim, a frequência de canto ω_2 deve ser superior a $10\omega_F$ para cobrir a faixa de frequências modais, onde o ganho transitório desejado é K_T . Já a frequência de canto ω_1 deve ser inferior a $\omega_F/10$ para minimizar o efeito da frequência de canto na faixa de frequência modal. Considerando-se que o ganho transitório K_T deve ser aproximadamente inferior à $T'_{d0}/2T_E$, onde T'_{d0} é a constante de tempo transitória de eixo direto do gerador e T_E é a constante de tempo da excitatriz, os autores Gibbard, Pourbeik e Vowles (2015) sugerem as seguintes relações para a obtenção do ganho K_F :

$$\omega_1 = \frac{K_T}{K \cdot T_F} \quad (20)$$

$$\omega_2 = \frac{K}{K_T \cdot T} \quad (21)$$

$$T_F = \frac{K_T}{K} \cdot T + \frac{K \cdot K_T}{K - K_T} \cdot K_F \quad (22)$$

Para a equação (22), deve-se escolher um valor de K_F para se obter o T_F equivalente. Caso a frequência de canto $1/T_F$ seja o valor selecionado, então o ganho K_F pode ser obtido da equação (23).

$$K_F = \frac{1}{K} \left[\left(\frac{K}{K_T} - 1 \right) \cdot T_F - \left(1 - \frac{K_T}{K} \right) \cdot T \right] \quad (23)$$

Maiores detalhes sobre obtenção das equações apresentadas nesta seção podem se obtidos na seção 7.10 da referência (GIBBARD; POURBEIK; VOWLES, 2015).

8.1.3 Controle preditivo baseado em modelo no espaço de estados aplicado ao controle de geradores

Controle preditivo baseado em modelo ou MPC (do inglês *Model Predictive Control*) é uma técnica de controle ótimo que oferece solução atrativa para o controle de sistemas lineares, não lineares e híbridos. As técnicas de Controle Preditivo começaram a ser utilizadas na década de 1970 na indústria petroquímica e hoje já estão bastante difundidas na indústria em geral, graças à evolução e redução dos custos dos microprocessadores (RINKE, 2011).

O termo MPC designa uma ampla gama de métodos de controle que se utiliza de um modelo discreto do processo que se deseja controlar para definir o sinal de controle através da minimização de uma função objetivo (CAMACHO; BORDONS, 1998). O controlador preditivo determina a resposta ótima para um sistema para o passo atual e prevê seu comportamento futuro com base em um modelo deste sistema, aplicando um conjunto de entradas neste modelo, considerando-se as medições dos estados e/ou saídas como condição inicial e levando em consideração as restrições necessárias.

O projeto do algoritmo do MPC é baseado no conhecimento prévio do modelo do sistema que se deseja controlar e, por este motivo, tem seu desempenho diretamente afetado por possíveis discrepâncias entre o modelo e a planta (CAMACHO; BORDONS, 1998).

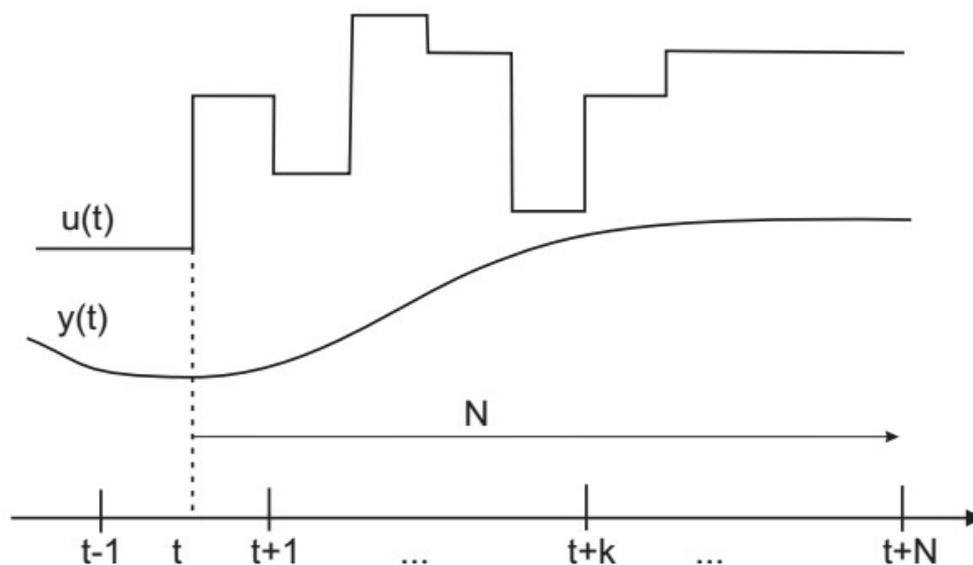
Como ilustrado na Figura 38, a cada passo k , os valores passados e presentes do sistema no instante t são levados em consideração e uma trajetória de Entradas de controle (horizonte de controle) é calculada para o horizonte de predição N . Esta trajetória de controle $u(t)$ é otimizada com o uso de uma função custo que contém pesos para penalizar os estados e entradas de controle.

Para projetar o controlador preditivo baseado em modelo de uma planta, é essencial que se possua o modelo desta, representado, neste caso, por suas equações em espaço de estados. Utilizando o modelo em espaço de estados, a informação necessária para fazer a previsão futura é representada pela variável de estado no tempo atual (WANG, 2009).

A partir das equações obtidas pela representação do sistema em espaço de estados, é possível desenvolver um modelo incremental pela discretização da planta

apresentada. Esse método consiste em converter as equações do sistema contínuo em uma relação equivalente no domínio discreto a partir de um dado período de amostragem.

Figura 38 - Esquema de controle de um MPC



Fonte: Rinke, 2011.

Considerando **A**, **B**, **C** e **D** como as matrizes de estado discretizadas da planta, tem-se as seguintes equações gerais de estado e de saída do sistema, respectivamente:

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (24)$$

$$y(k) = \mathbf{C}x(k) + \mathbf{D}u(k) \quad (25)$$

Onde,

$x(k) \in \mathbb{R}^n$: Estados

n : Número de estados

$u(k) \in \mathbb{R}$: Variável manipulada (ação de controle)

$y(k) \in \mathbb{R}$: Variável controlada (saída do processo)

$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$

$\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: Matrizes de estado

$\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$

Considerando-se o princípio do horizonte retrocedente, onde uma informação corrente da planta é requerida para que seja feita a predição e o controle, pode-se

afirmar que a entrada $u(k)$ não pode afetar a saída $y(k)$ ao mesmo tempo. Desta forma, $D = 0$ (WANG, 2009), e a equação de saída fica:

$$y(k) = Cx(k) \quad (26)$$

Para prever o comportamento da variável controlada N passos a frente, ou seja, em $y(k + N)$, o controlador preditivo se utiliza da seguinte relação, em forma matricial¹²:

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ y(k+3) \\ \vdots \\ y(k+N) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & CA^{N-3}B & \dots & CB \end{bmatrix}}_{\hat{H}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix}}_{U} \quad (27)$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix}}_{\emptyset} x(k)$$

Fu (resposta livre do sistema)

Ou então:

$$Y = HU + Fu \quad (28)$$

Este tipo de formulação não garante que o erro em regime permanente será nulo na presença de perturbações. Quando se está trabalhando com plantas naturalmente instáveis, é necessária a inclusão de uma ação integral no controle preditivo. Isto é feito através da inclusão de um estado adicional no vetor de estados.

Considerando-se que $\Delta x(k) = x(k) - x(k - 1)$, a equação (24) escrita da forma incremental fica:

$$\Delta x(k + 1) = A\Delta x(k) + B\Delta u(k) \quad (29)$$

Desta forma, cria-se um vetor de estados expandido $\xi(k)$, na forma:

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (30)$$

Considerando I como uma matriz identidade de dimensões indicadas, a equação de estados fica como:

¹² A dedução das equações do modelo de predição pode ser encontrada nas referências (CAMACHO; BORDONS, 1998) e (WANG, 2009).

$$\xi(k+1) = \begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & \mathbf{0}_{nx1} \\ CA & I_{nx1} \end{bmatrix}}_{A_\xi} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix}}_{B_\xi} \Delta u(k) \quad (31)$$

$$y(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1xn} & \mathbf{1}_{1x1} \end{bmatrix}}_{C_\xi} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (32)$$

Ou,

$$\xi(k+1) = A_\xi \xi(k) + B_\xi \Delta u(k) \quad (33)$$

$$y(k) = C_\xi \xi(k) \quad (34)$$

Fazendo-se uma analogia com a equação, o modelo de predição com vetor de espaço de estados expandido fica:

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ y(k+3) \\ \vdots \\ y(k+N) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_\xi B_\xi & 0 & 0 & \dots & 0 \\ C_\xi A_\xi B_\xi & C_\xi B_\xi & 0 & \dots & 0 \\ C_\xi A_\xi^2 B_\xi & C_\xi A_\xi B_\xi & C_\xi B_\xi & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_\xi A_\xi^{N-1} B_\xi & C_\xi A_\xi^{N-2} B_\xi & C_\xi A_\xi^{N-3} B_\xi & \dots & C_\xi B_\xi \end{bmatrix}}_{H_\xi} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N-1) \end{bmatrix}}_{\Delta U} \quad (35)$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} C_\xi A_\xi \\ C_\xi A_\xi^2 \\ C_\xi A_\xi^3 \\ \vdots \\ C_\xi A_\xi^N \end{bmatrix}}_{F_\xi} \xi(k)$$

$F_\xi \mathbf{u}$ (resposta livre do sistema)

Ou então:

$$Y = H_\xi \Delta U + F_\xi \mathbf{u} \quad (36)$$

Tendo o modelo de predição, pode-se passar à etapa de otimização do controle, ou seja, de encontrar o melhor parâmetro de controle ΔU tal que o erro entre o *setpoint* $r(k)$ e a saída prevista é minimizada (WANG, 2009). Assumindo-se o vetor que contém a informação de *setpoint*:

$$R^T = \underbrace{[1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]}_N r(k) \quad (37)$$

Definindo-se como J a função custo que reflete o objetivo do controle, tem-se (WANG, 2009):

$$J = (R - Y)^T (R - Y) + \Delta U^T P \Delta U \quad (38)$$

onde, P é uma matriz diagonal utilizada como parâmetro de sintonia para a performance desejada. Caso os elementos da matriz de sintonia sejam iguais a zero,

a função custo é interpretada como a situação na qual não importa o quão elevado pode ser o valor de ΔU , o objetivo passa a ser tão somente reduzir o erro ao mínimo possível (WANG, 2009).

A solução ótima é, portanto, dependente do sinal de referência e da variável de estado, conforme a seguinte equação:

$$\Delta U = (\mathbf{H}_\xi^T \mathbf{H}_\xi - \mathbf{P})^{-1} \mathbf{H}_\xi (\mathbf{R} - \mathbf{F}) \quad (39)$$

8.1.3.1 Caso MIMO

Para o caso multivariável (MIMO – *multiple input, multiple output*), o projeto é análogo ao caso SISO apresentado anteriormente, porém fazendo-se um empilhamento de vetores. Tomando-se novamente as equações de estado (24) e (26), e considerando-se que $x(k) \in \mathbb{R}^n$, $u(k) \in \mathbb{R}^p$ e $y(k) \in \mathbb{R}^q$, tem-se:

$$x(k+1) = \mathbf{A}_{n \times n} x(k) + \mathbf{B}_{n \times p} u(k) \quad (40)$$

$$y(k) = \mathbf{C}_{q \times n} x(k) \quad (41)$$

As matrizes de estado para o caso com integrador (modelo expandido) fica:

$$\xi(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{n \times n} & \mathbf{0}_{n \times q} \\ \mathbf{C}_{q \times n} & \mathbf{I}_{q \times q} \end{bmatrix} \xi(k+1)_{(n+q) \times 1} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{n \times p} \\ \mathbf{C}_{q \times n} & \mathbf{B}_{n \times p} \end{bmatrix} \Delta u(k)_{p \times 1} \quad (42)$$

$$y(k)_{q \times 1} = [\mathbf{0}_{q \times n} \ \mathbf{I}_{q \times q}] \xi(k+1)_{(n+q) \times 1} \quad (43)$$

Já o problema de otimização passa a ser:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{R}_{qN \times 1} - \mathbf{Y}_{qN \times 1})^T \mathbf{P} \mathbf{y}_{qN \times qN} (\mathbf{R}_{qN \times 1} - \mathbf{Y}_{qN \times 1}) + \Delta \mathbf{U}^T_{(pN \times 1)^T} \mathbf{P} \mathbf{a}_{pN \times pN} \Delta \mathbf{U}_{pN \times 1} \quad (44)$$

, onde $\mathbf{P} \mathbf{y}_{qN \times qN}$ e $\mathbf{P} \mathbf{a}_{pN \times pN}$ são os pesos.

8.1.3.2 Restrições

O controlador preditivo permite que se incluam restrições no algoritmo de controle, de forma a representar limitações físicas e operacionais da planta. As restrições podem ser feitas na taxa de variação de controle, na excursão da ação de controle e na excursão na saída do processo.

Para a taxa de variação da ação de controle, tem-se:

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k+i-1) \leq \Delta u_{max} \quad (45)$$

onde Δu_{min} e Δu_{max} são, respectivamente, o valor mínimo e máximo da taxa de variação do sinal de controle e $i = 1, 2, \dots, M$ se refere ao horizonte de controle.

Para um horizonte de controle M , tem-se a seguinte relação em forma matricial, considerando-se $\mathbf{1}_M$ como uma matriz de M linhas de valor 1:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix}_{2M \times M} \Delta U \leq \begin{bmatrix} \mathbf{1}_M \Delta U_{min} \\ -\mathbf{1}_M \Delta U_{max} \end{bmatrix}_{2M \times 1} \quad (46)$$

Para a excursão da ação de controle, tem-se:

$$u_{min} \leq u(k+i-1) \leq u_{max} \quad (47)$$

onde u_{min} e u_{max} são, respectivamente, o valor mínimo e máximo da excursão de controle e $i = 1, 2, \dots, M$ se refere ao horizonte de controle.

Matricialmente, a excursão da ação de controle pode ser representada pela relação dada na equação (48).

$$\begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+M-1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_q \mathbf{0}_q \dots \mathbf{0}_q \\ \mathbf{I}_q \mathbf{I}_q \dots \mathbf{0}_q \\ \vdots \\ \mathbf{I}_q \mathbf{I}_q \mathbf{I}_q \mathbf{I}_q \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_q \\ \mathbf{I}_q \\ \vdots \\ \mathbf{I}_q \end{bmatrix} u(k-1) \quad (48)$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ -\mathbf{T} \end{bmatrix}_{2M \times M} \Delta U \leq \begin{bmatrix} \mathbf{1}_M (u_{max} - u(k-1)) \\ \mathbf{1}_M (u(k-1) - u_{min}) \end{bmatrix}_{2M \times 1} \quad (49)$$

Por último, para as restrições sobre a excursão da saída, tem-se:

$$y_{min} \leq y(k+j) \leq y_{max} \quad (50)$$

onde y_{min} e y_{max} são, respectivamente, o valor mínimo e máximo da saída da planta e $j = 1, 2, \dots, N$ se refere ao horizonte de predição. De forma semelhante aos casos anteriores, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_\xi \\ -\mathbf{H}_\xi \end{bmatrix}_{2N \times M} \Delta U \leq \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N \mathbf{P} y_{max} - \mathbf{F}_\xi \\ \mathbf{F}_\xi - \mathbf{1}_N \mathbf{P} y_{min} \end{bmatrix}_{2M \times 1} \quad (51)$$

Em resumo, as restrições podem ser consideradas como:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} \\ \mathbf{T} \\ -\mathbf{T} \\ \mathbf{H}_\xi \\ -\mathbf{H}_\xi \end{bmatrix}}_s \Delta U \leq \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{1}_M \Delta U_{min} \\ -\mathbf{1}_M \Delta U_{max} \\ \mathbf{1}_M (u_{max} - u(k-1)) \\ \mathbf{1}_M (u(k-1) - u_{min}) \\ \mathbf{1}_N \mathbf{P} y_{max} - \mathbf{F}_\xi \\ \mathbf{F}_\xi - \mathbf{1}_N \mathbf{P} y_{min} \end{bmatrix}}_b \quad (52)$$

Desta forma, o problema de otimização será:

$$J = \Delta U^T (\mathbf{H}_\xi^T \mathbf{H}_\xi - \mathbf{P}) \Delta U + 2(\mathbf{F}_\xi - \mathbf{R})^T \mathbf{H}_\xi \Delta U \quad (53)$$

A solução somente é viável e factível se respeitar a equação (52), ou seja, $S\Delta U \leq b$.

8.1.3.3 Sintonia dos parâmetros

A sintonia de um MPC consiste no ajuste dos parâmetros de peso do controle (representada pela matriz \mathbf{P} na equação (38)), do horizonte de predição N e do horizonte de controle M (número de ações de controle enviadas para a planta em cada passo).

O horizonte de predição é determinado de tal forma que consiga cobrir o tempo de resposta em malha fechada da planta. O horizonte de controle deve ser escolhido de forma que seja menor ou igual ao horizonte de predição

8.1.3.4 Aplicação do MPC no controle de máquinas

Devido ao seu grande potencial, aliado à evolução dos microprocessadores e sua capacidade de lidar com diversas variáveis e restrições, é possível encontrar diversas referências técnicas propondo o uso de controladores MPC em malhas de geradores, principalmente na regulação de frequência (como em Rinke (2011)), mas também na regulação de tensão (em Liu *et al* (2014)), no amortecimento de oscilações (em Hiyama *et al* (2011)), e em controles de frequência e tensão no mesmo controlador (em Vidyasagar e Swarup (2016)).

Neste trabalho será utilizado o controle preditivo para substituir os reguladores PI ou *washout* na malha de frequência. Posteriormente será utilizado um modelo simplificado da planta para implantar a regulação de frequência e tensão no mesmo controlador.

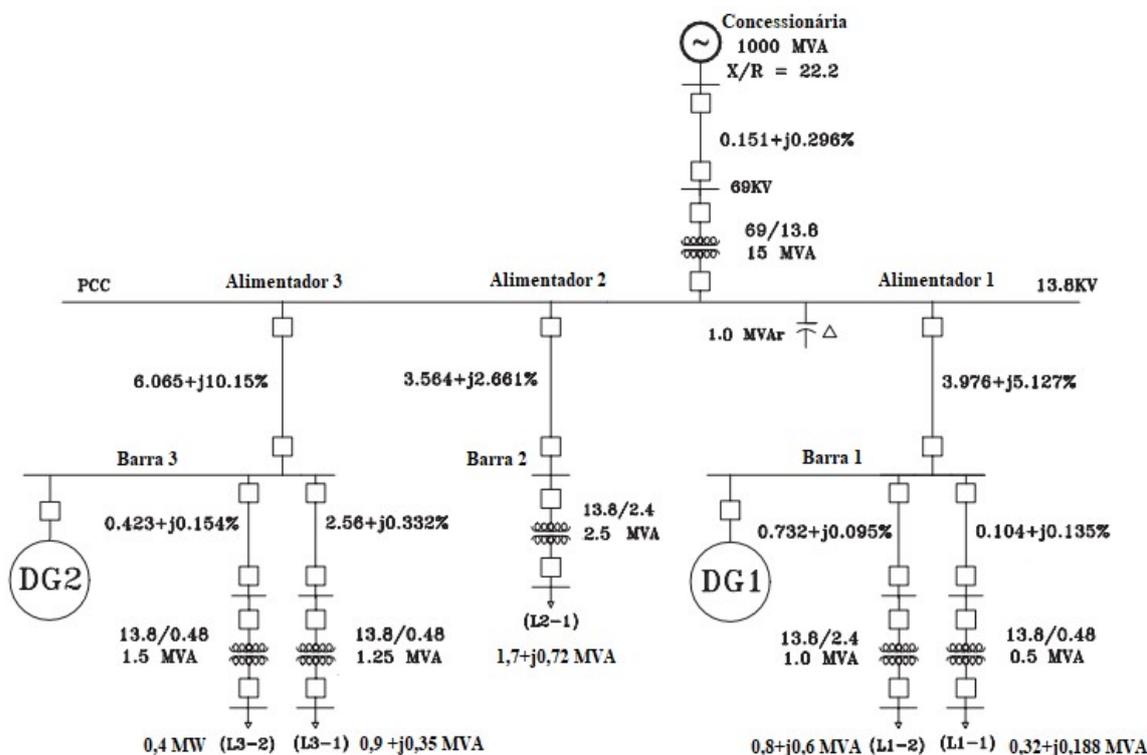
9 CARACTERÍSTICAS DA MICRORREDE UTILIZADA NOS ESTUDOS

Neste capítulo serão apresentadas as características da microrrede utilizada nas simulações cujos resultados são dados no próximo capítulo.

Neste capítulo será feita a análise do comportamento de uma microrrede alimentada por dois motogeradores síncronos diretamente acoplados e conectada à rede de distribuição de uma concessionária.

O sistema utilizado no estudo é representado pelo diagrama unifilar da Figura 39 e consiste de uma microrrede acoplada à rede de 13,8 kV da concessionária no ponto de conexão comum - PCC. A microrrede é composta por três alimentadores, dois deles (alimentadores 1 e 3) conectados a uma fonte de geração distribuída e a dois consumidores prioritários cada um, e um alimentador (2) conectado a uma carga não prioritária.

Figura 39 - Diagrama unifilar do sistema de estudo



Fonte: adaptado pela autora de (KATIRAEI.; IRAVANI; LEHN, 2007)

O gerador DG1 possui potência suficiente para alimentar as cargas conectadas ao alimentador 1, representando um esquema de microrrede

semelhante ao utilizado em estudos da CERTS (Figura 26), que utiliza o conceito de zonas de controle. O mesmo ocorre com o alimentador 3, onde está o DG2.

O alimentador 2 representa uma carga não prioritária, que é desconectada pelo sistema de controle de carga (LC) após a detecção de ilhamento¹³, caso a oferta de potência da microrrede não seja suficiente para alimentá-la sem comprometer o fornecimento às cargas prioritárias.

As cargas conectadas aos alimentadores são utilizadas em modelo exponencial, ou seja, com impedância constante e potências variando com o quadrado da tensão do barramento ao qual estão conectadas.

Como não é o foco deste trabalho tratar das lógicas de proteção e controle, tanto pelo lado da oferta quanto pela demanda, a desconexão do alimentador 2 será feita programando-se seu disjuntor para abrir 0,5 s após a desconexão da rede principal, simulando a resposta de um sistema de detecção de ilhamento.

As duas fontes de geração distribuída são geradores síncronos movidos por motor a gás, com potência de 2 MVA (características técnicas listadas no Apêndice E) representando os motogeradores que podem ser utilizados no reaproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

A potência total dos motogeradores corresponde à potência que, teoricamente, poderia ser gerada em uma usina instalada no aterro sanitário de Joinville (ver Capítulo 4).

Esta microrrede foi adaptada da rede proposta por Katiraei, Iravani e Lehn (2007) e utilizado em diversos estudos em microrredes, como o da CERTS na referência (KRISHNAMURTHY; LASSETER, 2009).

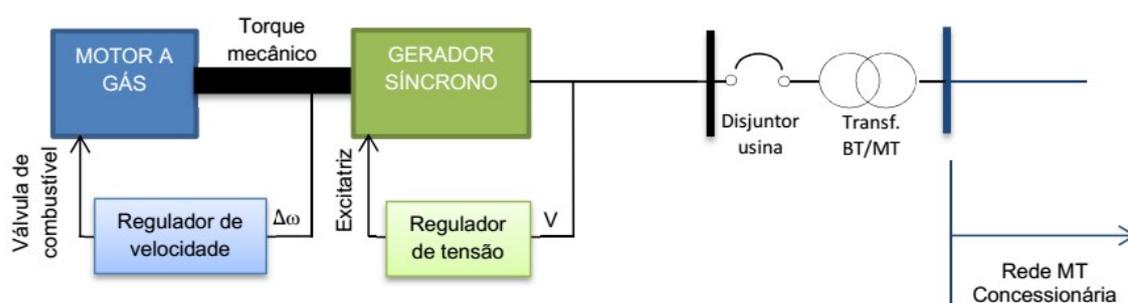
9.1 GERADORES DISTRIBUÍDOS

O sistema de geração utilizado neste trabalho consiste em um motogerador a gás de 2000 kVA, 480V, 60Hz, velocidade de 1200 rpm, com motor de 20 cilindros e 4 tempos e sistema de excitação eletricamente excitado (Apêndice E). De acordo

¹³ Existem relés de detecção de ilhamento no mercado com tempo de partida (*pick-up time*) inferiores a 3 ciclos (50ms). Exemplo é o relé de proteção de alimentador SEL-751 do fabricante *Schweitzer*, que utiliza a função ANSI 78VS (salto vetorial, ou *vector shift*) para detectar o ilhamento, baseado na mudança do ângulo da forma de onda da tensão, e enviar um sinal de disparo para o disjuntor correspondente.

com o fabricante, o conjunto motor mais gerador é equipado com diversos sensores, monitorados por um módulo de controle eletrônico, responsável por atuar relés, solenoides e outros dispositivos. Também possui outros dispositivos para controlar velocidade, tensão, monitorar a geração de reativos e realizar o sincronismo para operação do equipamento em paralelo com a rede da concessionária. Para este trabalho, no entanto, será incluído no modelo somente o motor a combustão diretamente acoplado a um gerador síncrono, associados a seus reguladores de velocidade e tensão, conforme Figura 40. Estes são os elementos com maior influência nos estudos de estabilidade de sistemas com estes tipos de equipamentos conectados.

Figura 40 - Esquema simplificado motogerador a gás



Fonte: própria autora (2017)

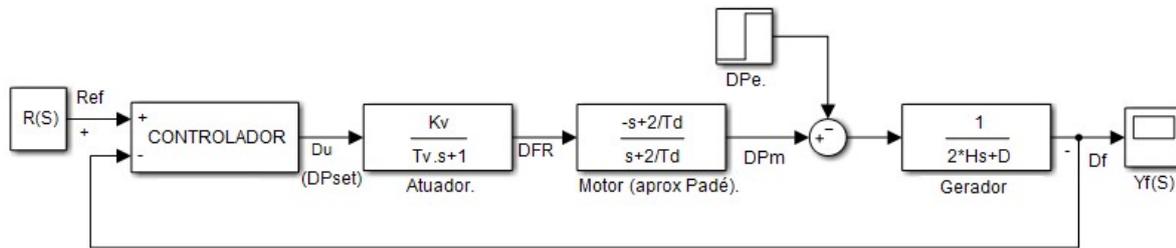
Os dados técnicos do gerador síncrono utilizado, informados em folha de dados do fabricante, são apresentados no Apêndice E.

9.1.1 Regulação de velocidade

Sabe-se que uma das grandezas mais importantes a ser observada quando se trata de estabilidade de uma rede é sua frequência. Como a velocidade de rotação de um gerador síncrono está diretamente acoplada à frequência da rede (pela relação $\omega = 2\pi f$), é altamente desejável que a variação da frequência seja mantida no mínimo possível para, além de não prejudicar o funcionamento das cargas, não provocar danos por vibração nas máquinas síncronas ou provocar a atuação da proteção, que isolaria a máquina.

Na Figura 41 é apresentado um diagrama de blocos com os principais elementos que fazem parte da malha de controle de frequência. Dentre os elementos estão o controlador em si, o atuador de válvula de combustível, o modelo simplificado do motor a gás e o modelo do gerador representado pela equação de oscilação.

Figura 41 - Diagrama de blocos da planta de controle de velocidade



Fonte: própria autora (2017)

9.1.1.1 Modelo dinâmico do motor

A máquina responsável por fornecer a potência mecânica ao eixo do gerador síncrono é um motor de combustão interna, no qual a energia produzida pela combustão do gás é convertida em energia mecânica no eixo.

Um modelo detalhado de um motor de combustão interna leva em consideração os vários processos termodinâmicos que ocorrem em cada um de seus cilindros, assim como as ligações mecânicas que conectam os cilindros ao virabrequim e é apresentado na referência (KRISHNAMURTHY; LASSETER, 2009). Para o estudo da operação de motogeradores em sistemas elétricos, no entanto, não é necessário que se utilize um modelo tão detalhado do motor de combustão interna, já que o foco neste caso é somente a potência mecânica que o motor fornece ao gerador síncrono para que este gere potência elétrica para alimentar as cargas conectadas à rede.

De acordo com (KRISHNAMURTHY; LASSETER, 2009), para o estudo da operação de sistemas elétricos é suficiente utilizar um modelo de motor que quantifique os principais atrasos impostos pela operação do motor e relacionar o comando de entrada de combustível com o torque produzido no eixo do motogerador. Sendo assim, será utilizado o modelo sugerido por Krishnamurthy e

Lasseter (2009), que representa o motor simplesmente como um atraso ($e^{-s\tau_D}$), que representa o tempo transcorrido entre a admissão de combustível e a geração de torque/potência mecânica no eixo. Este atraso será inserido no modelo como uma aproximação de *Padé* de ordem 1, de forma a linearizar a função de transferência que relaciona a variação na taxa de combustível (ΔFR) e a variação na potência mecânica (ΔP_m).

$$G_{motor} = \frac{\Delta P_m}{\Delta FR} = \frac{-s + \frac{2}{\tau_D}}{s + \frac{2}{\tau_D}} \quad (54)$$

Este atraso (τ_D), de acordo com (RENJIT; ILLINDALA; MONDAL, 2015) é dado pela equação (55) para um motor de 4 tempos:

$$\tau_D = \frac{60}{n} \left(1 + \frac{1}{n_{cil}} \right) + \frac{45}{6n} \quad (55)$$

com:

n : velocidade do motor, [rpm]

n_{cil} : número de cilindros

τ_D : tempo de atraso do motor [s]

Considerando-se os dados do motor, informados no início desta seção (1200 rpm e 20 cilindros), o tempo de atraso é $\tau_D = 0,05875s$.

9.1.1.2 Atuador da válvula de combustível

Este dispositivo recebe o sinal do controlador de velocidade (ΔP_{set}) e determina a proporção da mistura ar-combustível que vai ao motor, fazendo com que este forneça mais ou menos potência ao eixo. A função de transferência que representa o atuador é de primeira ordem, com um ganho K_v do atuador e uma constante de tempo τ_v relacionada ao tempo de resposta ao comando de abrir ou fechar.

$$\frac{\Delta FR}{\Delta P_{set}} = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (56)$$

Os valores estipulados para o ganho e a constante de tempo foram, respectivamente, $K_v = 0,12$ e $\tau_v = 0,2s$.

9.1.2 Gerador síncrono

Para simular o comportamento do gerador síncrono, será utilizada a equação de oscilação, bastante utilizada em estudos de estabilidade a pequenos sinais. Esta equação associa o comportamento da frequência de saída do gerador com variações na potência, levando em consideração a dinâmica/amortecimento da carga e as características da máquina.

$$\Delta \dot{f} = -\frac{f_0 D}{2HS_B} \Delta f + \frac{f_0}{2HS_B} (\Delta P_m - \Delta P_{load}) \quad (57)$$

onde,

Δf : Variação da frequência na rede [pu]

f_0 : Frequência nominal da rede [pu]

H : Constante de inércia da máquina [s]

D : Constante de amortecimento da carga

ΔP_m : Variação da potência mecânica da máquina motriz [pu]

ΔP_{load} : Variação da potência elétrica demandada pela carga [pu]

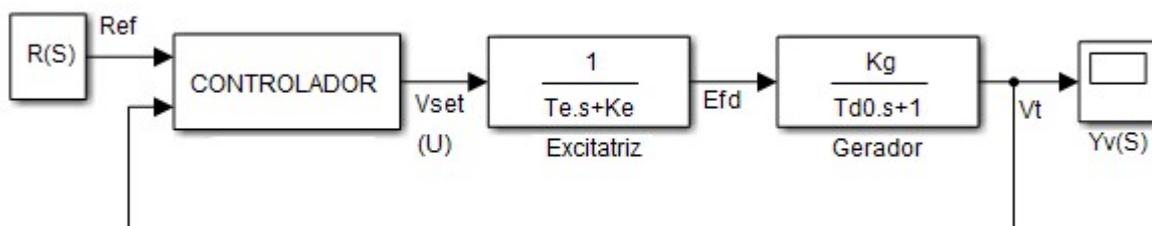
S_B : Potência base do gerador

9.1.3 Regulação de tensão

A função do controlador de tensão ou *AVR (Automatic Voltage Regulator)* é a de manter a tensão terminal da máquina síncrona em um nível pré-determinado.

Um controle de excitação simples compreende a função de regulação de tensão, a excitatriz e o gerador, e é representado de forma simplificada no diagrama de blocos da Figura 42.

Figura 42 - Regulador automático de tensão



As equações utilizadas neste modelo são apresentadas a seguir, sendo que a equação (58) representa a excitatriz da máquina, com seu ganho K_E e constante de tempo τ_E , a equação (59) representa o gerador, com seu ganho K_G e a constante de tempo transitória de circuito aberto T'_{d0} .

$$\frac{E_{FD}(s)}{V_{set}(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (58)$$

$$\frac{V_T(s)}{E_{FD}(s)} = \frac{K_G}{1 + T'_{d0} s} \quad (59)$$

9.2 PROJETO DOS CONTROLADORES

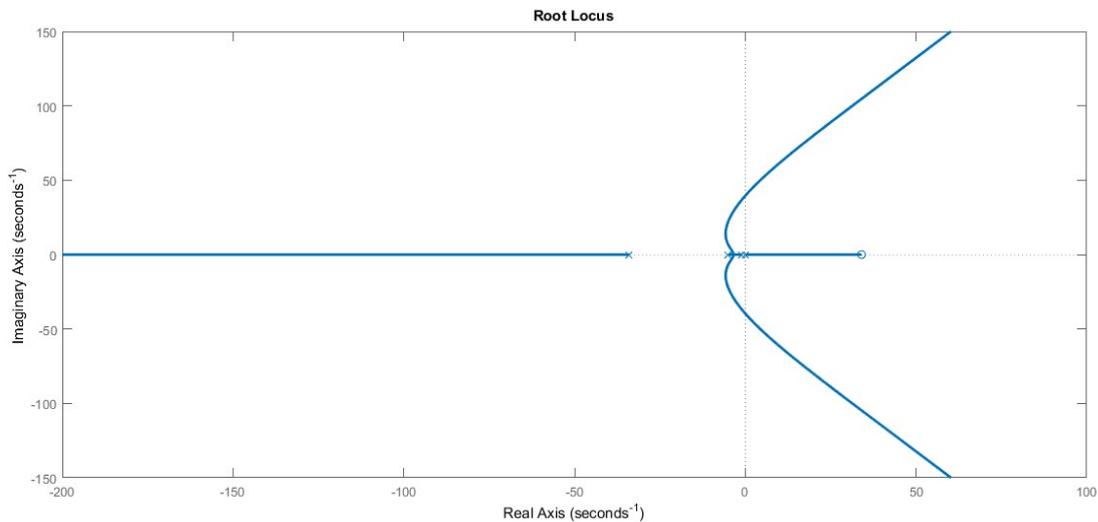
Para fazer a análise da microrrede apresentada na Figura 39, considerando os motogeradores síncronos com seus reguladores de velocidade e tensão, primeiramente foi feito o projeto para cada um dos sistemas de controle apresentados no capítulo 8, tomando-se como base os modelos de planta apresentados na seção 9.1 para regulação de velocidade e tensão.

Como o objetivo é mostrar algumas técnicas de controle que podem ser utilizadas, sem uma análise de desempenho mais criteriosa, não se considerou a interação dinâmica entre as máquinas, tampouco o acoplamento entre as dinâmicas de frequência e tensão, simplificando assim a análise.

9.2.1 Regulador de velocidade com controle integral ou isócrono

A sintonia deste tipo de controle consiste em ajustar o ganho K da malha representada na Figura 61 (Apêndice D), dentro do limite de estabilidade da planta. Considerando-se o gráfico do lugar das raízes da planta da Figura 41, o ganho do integrador deve ser pequeno para o sistema não se tornar instável.

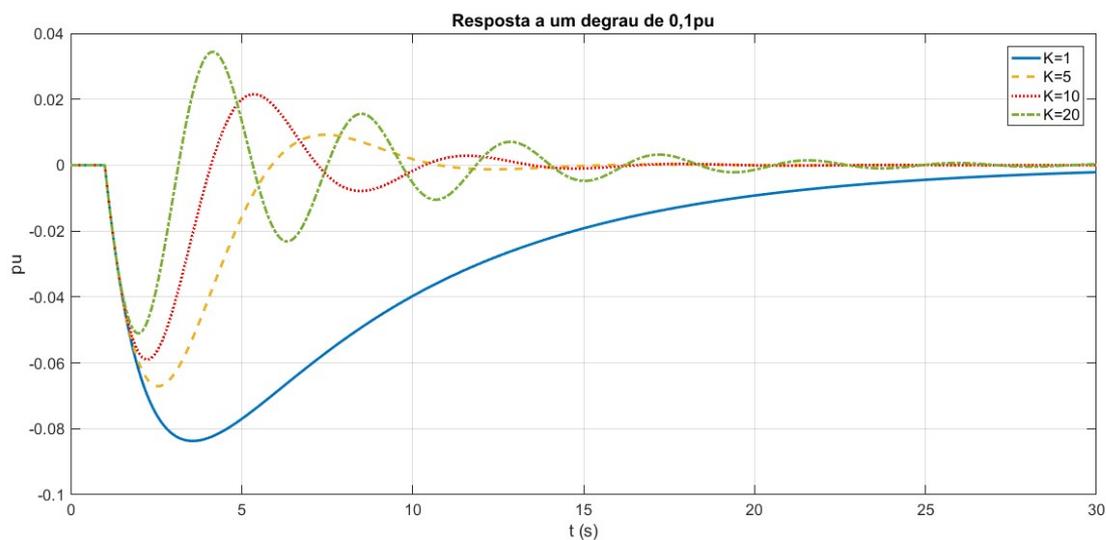
Figura 43 – Gráfico do lugar das raízes para uma planta de regulação de velocidade com controlador integral.



Fonte: própria autora (2017)

Como pode ser observado no gráfico da Figura 44, quanto maior o ganho, mais rápida e oscilatória é a resposta ao degrau do sistema. Para a simulação da rede será utilizado um ganho $K = 10$, que proporcionou a melhor relação tempo de estabilização *versus* sobressinal.

Figura 44 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de frequência com regulador isócrono com variação do ganho K .



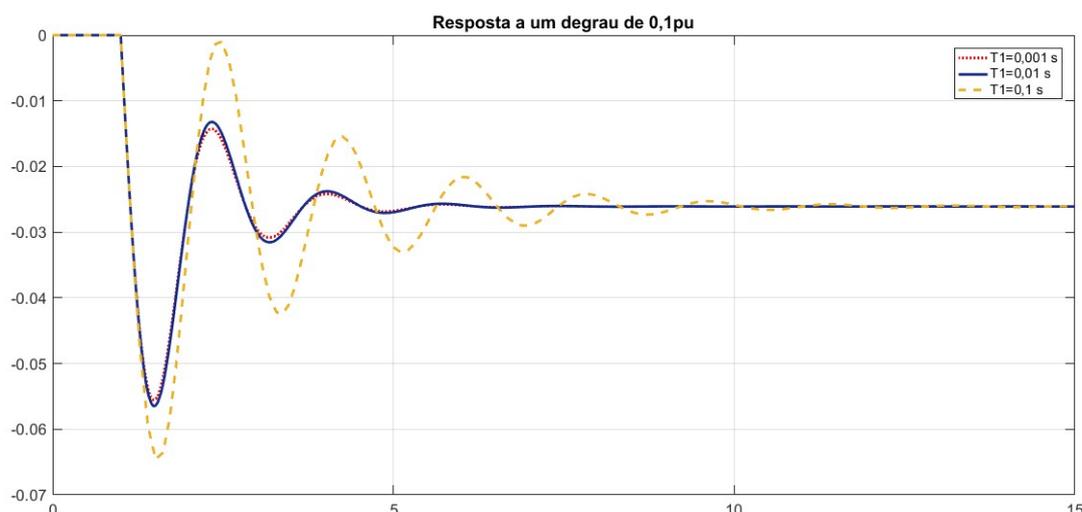
Fonte: própria autora (2017)

9.2.2 Regulador de velocidade com *droop*

A sintonia do regulador com *droop* consiste em ajustar a constante de tempo do controlador (τ_1) (ver Figura 32) de tal forma que fique menor que a constante de tempo (τ) da planta. Na Figura 45 é possível observar a diferença de resposta para diferentes valores de τ_1 . Nas simulações será utilizada a constante de tempo $\tau_1 = 0,01 \text{ s}$.

O valor de *droop* utilizado em todas as simulações será $R_p = 0,03$ (o valor máximo para a máquina, segundo folha de dados do fabricante, é de 0,05, ou 5%, conforme Apêndice E).

Figura 45 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de frequência com regulador com *droop* com variação da constante de tempo τ_1 .



Fonte: própria autora (2017)

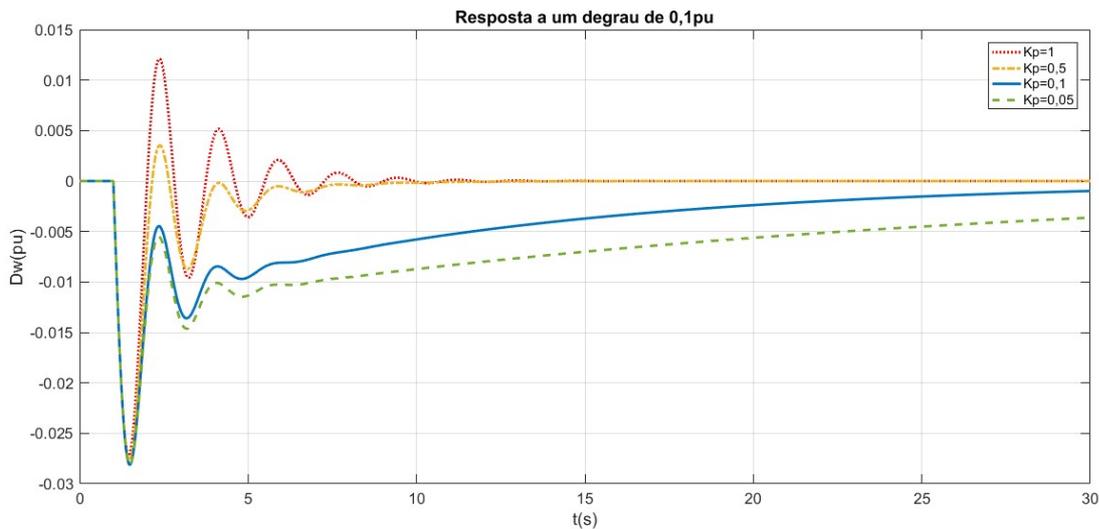
Ratificando o que já foi mencionado no decorrer do trabalho, observa-se que o sinal não retorna ao seu valor anterior ao distúrbio. Desta forma, parte-se para o controle *washout*.

9.2.3 Regulador de velocidade com controle *washout*

Considerando-se a função de transferência do controlador *washout*, dada pela equação (16) e um *droop* $R_p = 0,03$, a sintonia do controlador *washout* consistirá

somente no ajuste do ganho K_p . Para o caso em questão, foi escolhido o ganho $K_p = 0,1$ que, apesar de apresentar uma resposta mais lenta, acarreta em menor oscilação e sobressinal.

Figura 46 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de frequência com regulador *washout* com variação no ganho K_p .



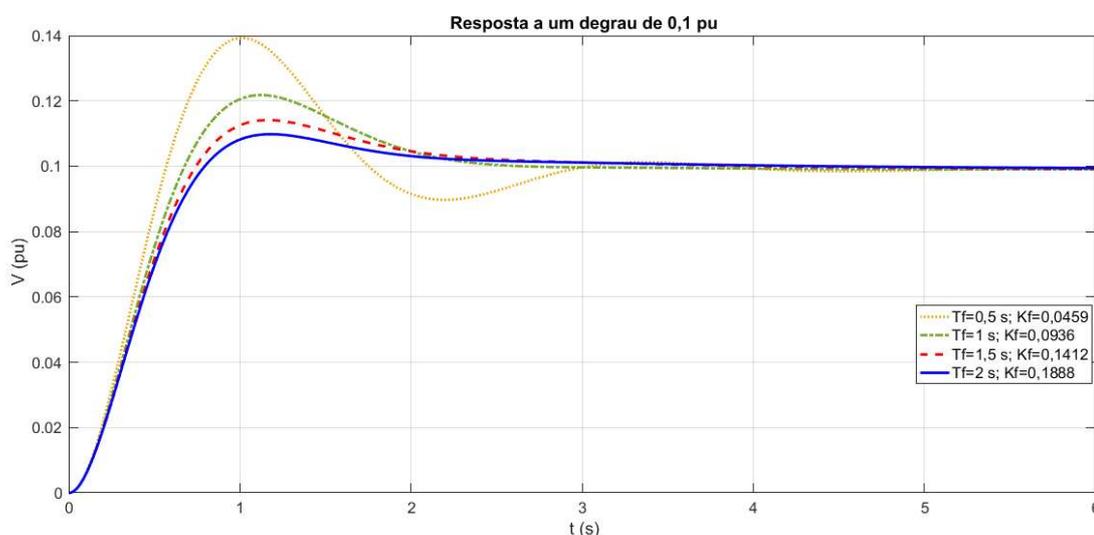
Fonte: própria autora (2017)

9.2.4 Regulador de tensão

Para o ajuste do regulador de tensão utilizou-se a metodologia apresentada na seção 8.1.2. Como ponto de partida, utilizaram-se valores típicos de ganho ($K_a = 100$) e constante de tempo ($T_a = 0,02 s$) para o amplificador. Para a excitatriz foi estipulado um ganho $K_E = 1$ e utilizada a constante de tempo $T_E = 0,1889 s$ informada na folha de dados do fabricante do motogerador utilizado como referência para as simulações (vide Apêndice E). A constante de tempo de circuito aberto dos geradores síncronos também é informada pelo fabricante $T'_{d0} = 3,63 s$.

O ganho transitório K_T (ver seção 8.1.2) foi estipulado como $9 pu$ ($\sim 19 dB$), respeitando a relação $K_T < T'_{d0}/2T_E$ (primeiro valor inteiro que respeita a relação). No gráfico da Figura 47 está representada a resposta a um degrau de $0,1 pu$ para vários valores de T_F . O valor escolhido foi o de $T_F = 2 s$, que produz o menor sobressinal.

Figura 47 – Exemplo de resposta ao degrau de uma malha de tensão com AVR do tipo AC5A.

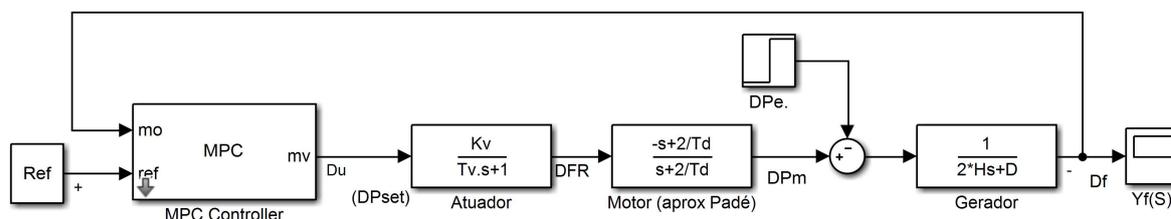


Fonte: própria autora (2017)

9.2.5 Regulador de frequência com MPC

Para se projetar o regulador de frequência com controle preditivo, é essencial se conhecer o modelo da planta, já abordado na seção 9.1.1 e representado na Figura 48, onde o controlador foi substituído pelo bloco *MPC Controller* do *Matlab/Simulink*, que programa o algoritmo de controle, conforme teoria do MPC apresentada na seção anterior, e matrizes de estado, restrições e ajustes inseridos pelo usuário.

Figura 48 – Diagrama de blocos da planta de controle de velocidade



Fonte: própria autora (2017)

Tomando-se as funções de transferência de cada estágio da planta de regulação de frequência, apresentadas nas equações (54), (56) e (57) e incluindo-se

a ação *droop* (R) da máquina, para manter a concepção de compartilhamento de cargas tratado nas estratégias de controle já apresentadas neste capítulo e auxiliar as comparações, a representação da planta da Figura 48 em espaço de estados fica (RINKE, 2011):

$$\dot{x}_f = \mathbf{A} x_f + \mathbf{B} u_f \quad (60)$$

$$y_f = \mathbf{C} x_f \quad (61)$$

$$\dot{x}_f = \begin{bmatrix} \Delta \dot{f} \\ \Delta \dot{P}m \\ \Delta \dot{F}R \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$x_f = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta Pm \\ \Delta FR \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$u_f = \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{set}} \\ \Delta P_{\text{load}} \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$\mathbf{A}_f = \begin{bmatrix} -\frac{f_0 D}{2HS_B} & \frac{f_0}{2HS_B} & 0 \\ 0 & -\frac{2}{\tau_D} & \left(\frac{2}{\tau_D} + \frac{1}{\tau_v}\right) \\ -\frac{K_v}{R\tau_v} & 0 & -\frac{1}{\tau_v} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$\mathbf{B}_f = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{f_0 D}{2HS_B} \\ -\frac{K_v}{\tau_v} & 0 \\ \frac{K_v}{\tau_v} & 0 \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$\mathbf{C}_f = [1 \ 0 \ 0] \quad (67)$$

Os dados das variáveis presentes nas matrizes de estado são dados na Tabela 7 e foram obtidos da folha de dados do fabricante (Apêndice E) ou de valores típicos encontrados na literatura.

Tabela 7 – Variáveis para as matrizes de estado da planta

f_0 :	1 pu	τ_D :	0,0588 s
D :	1	R :	0,03
S_B :	1 pu	K_v :	0,2
H :	0,44 s	τ_v :	0,5 s

Fonte: própria autora (2017)

O tempo de amostragem T do controlador de velocidade está relacionado ao tempo de acomodação da planta em malha aberta, que neste caso é de cerca de 6 s (obtido por simulação), ou seja, a constante de tempo da planta é de cerca de 1,5 s, considerando-se que geralmente um sistema leva cerca de 4 constantes de tempo para acomodar. O tempo de amostragem é tipicamente de 5 a 10 vezes menor que a constante de tempo. Neste caso será arbitrado um período de amostragem $T = 0,2 \text{ s}$.

Considerando-se que o tempo de acomodação da planta em malha aberta da Figura 48 é de cerca de 4 constantes de tempo, verifica-se que com um tempo de amostragem de 0,2 s, leva cerca de 30 constantes de tempo para que o sistema alcance o estado estacionário. Após alguns testes de desempenho, optou-se por utilizar um horizonte de predição $N = 30$, igual ao tempo que a planta leva para acomodar¹⁴. Para o horizonte de controle foi utilizado $M = 10$.

Outro ponto importante no ajuste do controlador é a inclusão das restrições. Para poder comparar o desempenho do controle de velocidade com MPC e com as outras técnicas apresentadas neste capítulo e considerando-se que o fabricante não fornece informações técnicas sobre os limites de operação do atuador da válvula de combustível, onde é entra o sinal de controle, a única restrição imposta no controle foi na saída¹⁵ de tal forma que $-0,05 \text{ pu} < \Delta f < 0,05 \text{ pu}$, com um esquema para suavizar as restrições (*soft constraints*)¹⁶ de forma a evitar grandes excursões no sinal de controle.

Considerou-se estes valores de restrições com o objetivo de se respeitar os limites de desvio de frequência impostos pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist, que estabelecem que, havendo corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do reequilíbrio, a frequência:

- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;

¹⁴ Em seu livro, Wang (2009) justifica o possível uso de um horizonte de predição inferior ao número de amostras que a planta leva para atingir seu estado estacionário em malha aberta ao assumir que a resposta em malha fechada será menor que a resposta em malha aberta.

¹⁵ Importante ressaltar que também que, somente para efeitos de comparação entre as diversas técnicas de controle, a limitação de potência mecânica do gerador foi inserida como uma saturação nas simulações, para todos os cenários.

¹⁶ O esquema de *soft constraints* é explicado em (WANG, 2009) e em (CAMACHO; BORDONS, 1998)

- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 (cinco) segundos.

Outra observação importante é que a potência da carga ΔP_{load} foi inserida no modelo como um distúrbio medido, para que cada controlador tivesse a leitura da potência de carga.

9.2.6 Regulador de frequência e tensão com MPC

Como última alternativa de controle, se propõe a inclusão da regulação de tensão no controlador projetado na seção 9.2.5, formando um controlador com 2 entradas e 2 saídas, ou seja, um controlador MIMO (*multiple inputs - multiple outputs*).

Embora muitas referências utilizem modelos mais complexos chegar às matrizes de estado da planta, utilizando modelos de máquinas síncronas de ordem superior¹⁷ ou então o modelo de *Heffron-Phillips*¹⁸, que permite a obtenção de um sistema de equações que acoplaria a frequência com a tensão. Neste trabalho, porém, optou-se por utilizar um modelo mais simples baseado nas equações (54), (56), (57), (58) e (59) apresentadas no início deste capítulo, em um sistema com frequência e tensão desacopladas. O objetivo é demonstrar a efetividade do uso do controle preditivo quando comparado com outras técnicas, mesmo com o uso de simplificações no modelo da planta a ser controlada.

Incluindo-se os estados referentes à malha de tensão e representados nas equações (58) e (59), as equações de estado da planta ficam:

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \quad (68)$$

$$y = \mathbf{C}x \quad (69)$$

¹⁷ O modelo de sétima ordem de uma máquina síncrona pode ser encontrado no capítulo 9 da referência que pode ser encontrado na referência (ANDERSON; FOUAD, 2003).

¹⁸ O modelo de *Heffron and Phillips* é uma representação linearizada de um sistema composto por um único gerador síncrono conectado a um barramento infinito e foi proposto em 1952. Este modelo é bastante estudado na literatura e está detalhado no capítulo 3 da referência (ANDERSON; FOUAD, 2003).

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{\Delta f} \\ \dot{\Delta Pm} \\ \dot{\Delta FR} \\ \dot{V}_T \\ \dot{E}_{FD} \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$x = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta Pm \\ \Delta FR \\ V_T \\ E_{FD} \end{bmatrix} \quad (71)$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta P_{set} \\ \Delta P_{load} \\ V_{set} \end{bmatrix} \quad (72)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{f_0 D}{2HS_B} & \frac{f_0}{2HS_B} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{\tau_D} & \left(\frac{2}{\tau_D} + \frac{1}{\tau_v}\right) & 0 & 0 \\ -\frac{K_v}{R\tau_v} & 0 & -\frac{1}{\tau_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{d0}} & \frac{K_G}{T'_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_E}{\tau_E} \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{f_0 D}{2HS_B} & 0 \\ -\frac{K_v}{\tau_v} & 0 & 0 \\ \frac{K_v}{\tau_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_E} \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (75)$$

Os dados das variáveis presentes nas matrizes de estado são os mesmos utilizados no item anterior e na seção que trata do AVR com compensação na realimentação.

Considera-se o período de amostragem e horizonte de controle e de predição iguais ao do MPC somente para a regulação de frequência, ou seja, $T = 0,2$, $N = 30$ e $M = 10$, respectivamente.

Com relação às restrições, mantêm-se os limites de restrições na frequência, de $-0,05 pu < \Delta f < 0,05 pu$, acrescentando-se os limites do PRODIST para variação de tensão de curta duração: $0,9 pu < V_T < 1,1 pu$.

10 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EM UMA MICRORREDE COM GERADOR SÍNCRONO DISTRIBUÍDO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações feitas sobre a microrrede descrita no capítulo 9, alimentada por dois motogeradores síncronos diretamente

A simulação da microrrede da Figura 39, alimentada por dois motogeradores de mesma especificação (Apêndice E) foi feita no *software SymPowerSystems* do *MATLAB/Simulink* (MATHWORKS, 2016). Os dados do fluxo de potência são apresentados na Tabela 8. No instante $t = 0$ s, o disjuntor do alimentador 2, que conecta a carga L2 à rede, está aberto e a microrrede está fornecendo potência para a concessionária.

Tabela 8 – Fluxo de potência da microrrede em $t = 0$ s.

Elemento	Valores nominais			Valores do fluxo de potência			
	V_{Base} (kV)	P (MW)	Q (MVar)	V (pu)	Ângulo tensão (°)	P (MW)	Q (MVar)
Carga L1-1	0,48	0,32	0,19	0,9129	-3,77	0,27	0,16
Carga L1-2	2,4	0,8	0,6	0,9687	1,17	0,75	0,56
Carga L2	2,4	1,7	0,72	0	0	0	0
Carga L3-1	0,48	0,9	0,35	0,9269	-3,87	0,77	0,30
Carga L3-2	0,48	0,40	0	0,9845	-1,35	0,39	0
Gerador DG1	0,48	1,6	-	1,05	3,6	1,6	0,14
Gerador DG2	0,48	1,6	-	1,05	3,61	1,6	0,04
Barra infinita	69	-	-	1	0	-0,73	0,21
Banco capacitor e PCC	13,8	0	-1	1,0004	0,02	0	-1

Fonte: própria autora (2017)

Analisando-se os valores dados na Tabela 8 para o fluxo de potência das cargas, verifica-se que todas as cargas estão absorvendo valores de potência inferiores a seus valores nominais. Isto se deve à característica exponencial das cargas, cuja potência varia com o quadrado da tensão na barra. Como nesta simulação não são utilizados compensadores de reativos, como bancos de capacitores e dispositivos FACTS, para elevar as tensões nas cargas, compensando

as perdas nas linhas e nos transformadores, as tensões nas cargas ficam em um patamar inferior ao nominal.

Para analisar o comportamento das máquinas com seus sistemas de controle e da tensão no PCC da microrrede foi estabelecida uma sequência de eventos na rede, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Sequência de eventos utilizada nos testes

Instante	Descrição
t=0 s	Cargas dos alimentadores 1 e 2 conectadas Alimentador 2 desconectado Gerador distribuído 1 fornecendo $1,6 + j0,16$ MVA Gerador distribuído 2 fornecendo $1,6 + j0,07$ MVA Concessionária fornecendo a potência residual de $0,9 + j0,89$ MVA
t=3 s	Alimentador 2 é conectado
t=8 s	Falta no transformador da concessionária
t=8,3 s	Abertura dos disjuntores da concessionária, provocando o ilhamento da microrrede
t= 8,6 s	Sistema de controle da microrrede, ao detectar o ilhamento, desconecta o alimentador 2 (controle da demanda), deixando somente as cargas prioritárias e que podem ser supridas pelos geradores distribuídos da microrrede
t=35 s	Carga L1-2, de $0,8+j0,6$ MVA, é desconectada

Fonte: própria autora (2017)

A sequência apresentada visa demonstrar o comportamento do sistema quando conectado à rede da concessionária (barra infinita), antes, durante e depois do processo de ilhamento e, posteriormente (após o instante 8,3 s) operando de forma isolada (ilhada) da rede. Assim, é possível monitorar o desempenho da rede em paralelo com a concessionária e operando de forma ilhada.

Importante ressaltar que o tempo de atuação do sistema de controle pelo lado da demanda é essencial para que as oscilações transitórias durante o ilhamento não sejam proibitivas. Caso se permita que os motogeradores fiquem operando por muito tempo alimentando uma carga cuja potência seja muito superior à sua capacidade, pode-se chegar a uma condição tal que, na prática, faria com que os sistemas de proteção dos equipamentos ou dos próprios alimentadores, atuassem no sentido de retirá-los de operação.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações feitas com as diferentes técnicas de controle apresentadas na seção 9.2, sempre utilizando o

mesmo ajuste de controle para ambas as máquinas (DG1 e DG2). Os diferentes cenários de simulação são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Cenários de simulação

Cenário	Regulador de velocidade	Regulador de Tensão
1	Isócrono (Integral)	AVR com compensação na realimentação
2	PI com <i>droop</i>	AVR com compensação na realimentação
3	<i>Washout</i>	AVR com compensação na realimentação
4	MPC	AVR com compensação na realimentação
5		MPC

Fonte: própria autora (2017)

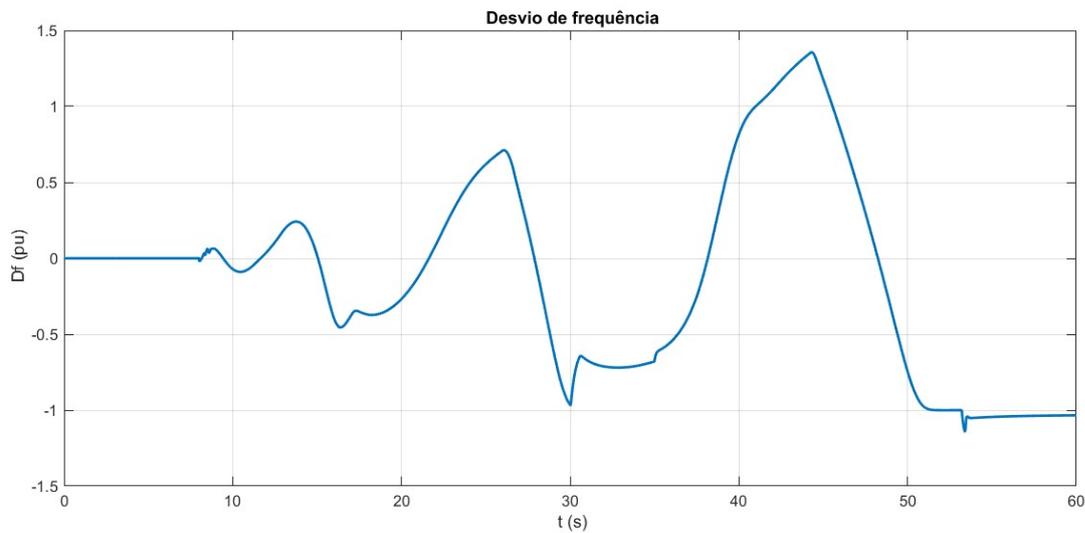
10.1.1 Cenário 1: operação com controle isócrono

A primeira simulação considerou a regulação de velocidade feita por meio de um controlador isócrono e a de tensão feita com um AVR com compensação na realimentação. A curva de frequência para este cenário é apresentada na Figura 49.

Como era de se esperar, da teoria tradicional de controle de geradores, o sistema fica instável após o distúrbio na condição ilhada.

Enquanto as máquinas estão conectadas ao barramento infinito, o problema de instabilidade não é observado, mesmo com a conexão da carga do alimentador 2, no instante $t = 3 s$. Como a carga de $1,6 + j0,07$ MVA é muito inferior à capacidade da rede da concessionária, cuja potência de curto-circuito é 1000 MVA, não se observa desvio significativo de frequência com a desconexão do alimentador 2. Situação diferente ocorre quando se desconecta um alimentador em uma rede ilhada, como se verá nas próximas seções.

Figura 49 – Desvio de frequência do gerador DG1 com regulador de velocidade isócrono



Fonte: própria autora (2017)

Enquanto a microrrede estiver operando em paralelo com a concessionária, o barramento infinito controla a frequência da rede. Quando a microrrede passa a operar de forma ilhada, no instante $t = 8,3 s$, as duas máquinas passam a ser responsáveis pela referência de frequência da rede, porém com uma técnica de controle inadequada para esta condição, entram em uma condição de instabilidade, como é mostrado na Figura 49.

10.1.2 Cenários 2 a 5: comparação entre as diferentes técnicas de regulação

A seguir serão apresentadas as curvas de potência, tensão e desvio de frequência das máquinas, assim como a tensão no PCC para os cenários 2 a 5, já que o cenário 1, com o controlador com ação integral, já provou ser inadequado para a operação em modo ilhado com geradores em paralelo.

Considerando-se que os geradores DG1 e DG2 possuem mesma especificação técnica e mesmo controle, as curvas de ambos serão muito semelhantes. Desta forma, para simplificar a demonstração dos resultados, serão apresentadas somente as curvas do gerador DG1.

10.1.2.1 Potências de saída dos geradores

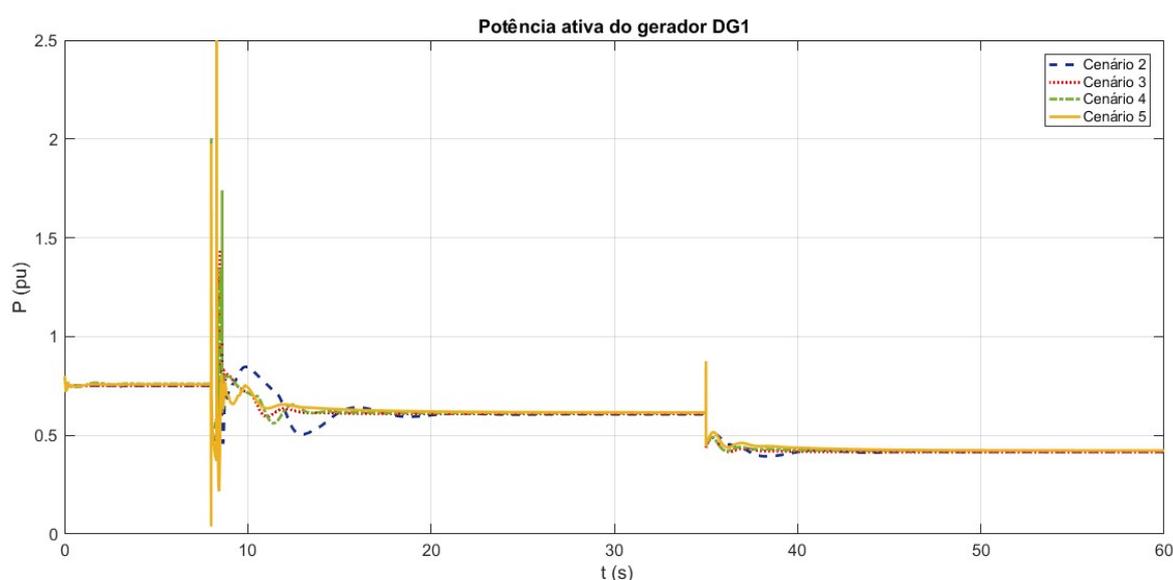
Na Figura 50 e na Figura 51 são apresentadas, respectivamente, a potência ativa e reativa fornecidas pelo gerador DG1, em pu, para cada um dos cenários descritos na Tabela 10.

Considerando-se a potência base do gerador de 2000 MVA, verifica-se que enquanto estão operando em paralelo com a rede, cada gerador está fornecendo pouco mais de 1500 KW e 226 KVAR.

Quando ocorre a conexão do alimentador 2, no instante $t = 3$ s, praticamente não se observa variação na potência gerada, já que toda variação de potência acaba sendo absorvida pelo barramento infinito, representando a concessionária.

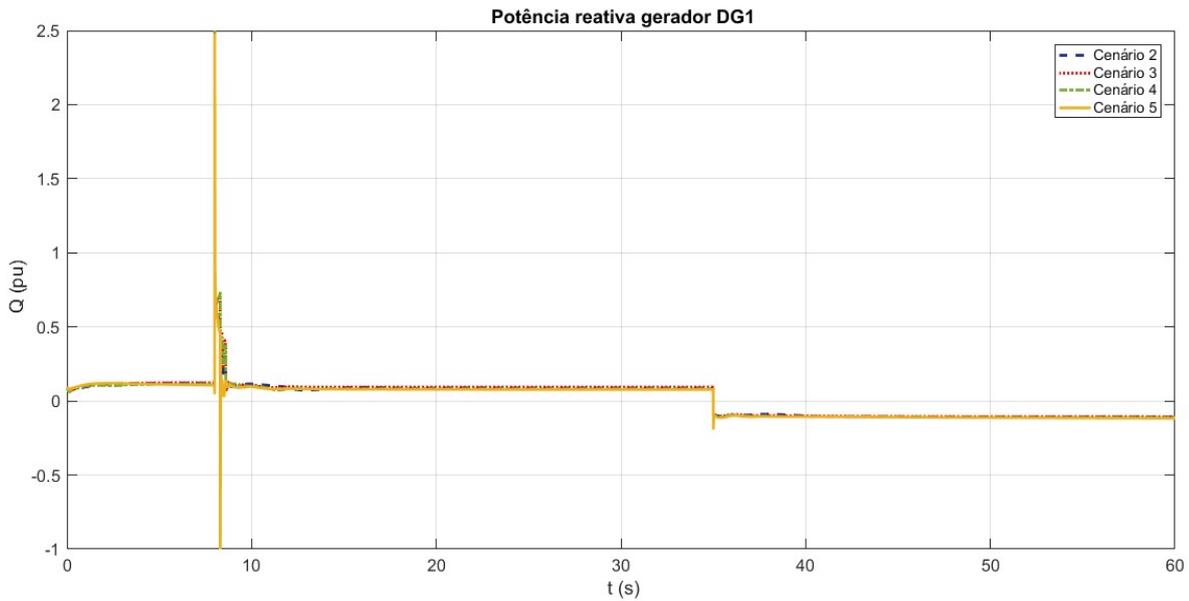
Quando a rede passa a operar de forma ilhada, e o alimentador 2 é desconectado pelo sistema de controle da microrrede, os sistemas de controle dos motogeradores agem no sentido de reduzir a potência ativa gerada, adaptando-se à nova condição de carga de $2,42 + j1,14$ MVA (referente aos alimentadores 1 e 3 e excetuando-se as perdas nas linhas e transformadores). Nesta situação, na qual as cargas são alimentadas exclusivamente pelos dois motogeradores, cada um deles passa a fornecer cerca de 0,62 pu ou 1240 kW de potência ativa.

Figura 50 – Potência ativa no gerador DG1 nos cenários 2 a 5



Fonte: própria autora (2017)

Figura 51 – Potência reativa no gerador DG1 nos cenários 2 a 5



Fonte: própria autora (2017)

Em se tratando da potência reativa, como há um banco de capacitores fixo de 1 MVAR conectado à barra de 13,8 kV da rede, praticamente todo o reativo da microrrede é fornecido por este banco. Aos motogeradores cabe o fornecimento de apenas 0,094 pu ou 188 kVAR cada, após a desconexão de microrrede.

Quando ocorre a desconexão da carga L1-2, de $0,8 + j0,6$ MVA, os controladores dos motogeradores agem de forma a reduzir ainda mais a potência gerada, para 0,423 pu ou 846 kW. A partir deste instante, o gerador passa a consumir reativo, já que o banco de capacitores continua conectado e a soma das potências reativas consumidas pelas cargas, linhas e transformadores passa a ser inferior à potência reativa fornecida pelo banco de capacitores¹⁹.

Comparando o papel de cada configuração de regulação de velocidade e tensão, verifica-se que no cenário com regulador de velocidade convencional com *droop*, a curva de potência oscila menos vezes que nos demais cenários, que apresentam comportamento semelhante entre si.

Os picos elevados nas curvas de potência da Figura 50 e na Figura 51 são atribuídos a erros numéricos do *Matlab*. Devido ao tempo de execução, todas as simulações foram feitas no método fasorial (*phasor*). Quando utilizada a opção

¹⁹ Embora não seja escopo deste trabalho, fica claro que em uma configuração de microrrede como a apresentada na Figura 39 seria mais interessante o uso de fontes de reativos com potência variável, quer seja com bancos automáticos ou dispositivos FACTS.

continuous, os picos na transição para ilhado foram reduzidos a menos de 2 pu, porém como este método levou a tempos de simulação muito elevados, principalmente considerando-se que o cenário utilizado é de 60 s, optou-se por não utilizá-lo, devido às limitações de processamento.

10.1.2.2 Desvio de frequência

Na Figura 52 são apresentadas as curvas de desvio de frequência (diretamente acoplada à velocidade síncrona dos geradores pela razão $\omega = 2\pi f$), para cada cenário.

Enquanto a microrrede está em paralelo com a concessionária, mesmo com a conexão de um alimentador, não há reflexo visível na frequência da microrrede, já que nesta condição a frequência é controlada pelo barramento infinito, que possui potência muito superior à potência das máquinas.

Quando ocorre o ilhamento, no instante $t = 8,3 \text{ s}$, ocorre um transitório de amplitude significativa, por um período de cerca de 2,6 s para o cenário 5 (MPC) até cerca de 8 s para o cenário 2 (*droop* e AVR). Apesar disto, em nenhum dos casos foram ultrapassados de forma significativa²⁰ os limites de frequência determinados pelo PRODIST.

Considerando-se que neste trabalho somente se considera o controle de frequência local (operados com base em medições locais e sem necessidade de *links* de comunicação), verifica-se que o uso de controle com *droop* (cenário 2) não leva a frequência a seu valor de referência e não seria adequado a esta condição. Para que este tipo de controle pudesse ser utilizado em uma microrrede ilhada, seria necessário existir outra(s) fonte(s) com potência superior à dos motogeradores e cujos controles fossem capazes de levar o erro de frequência a zero em estado estacionário.

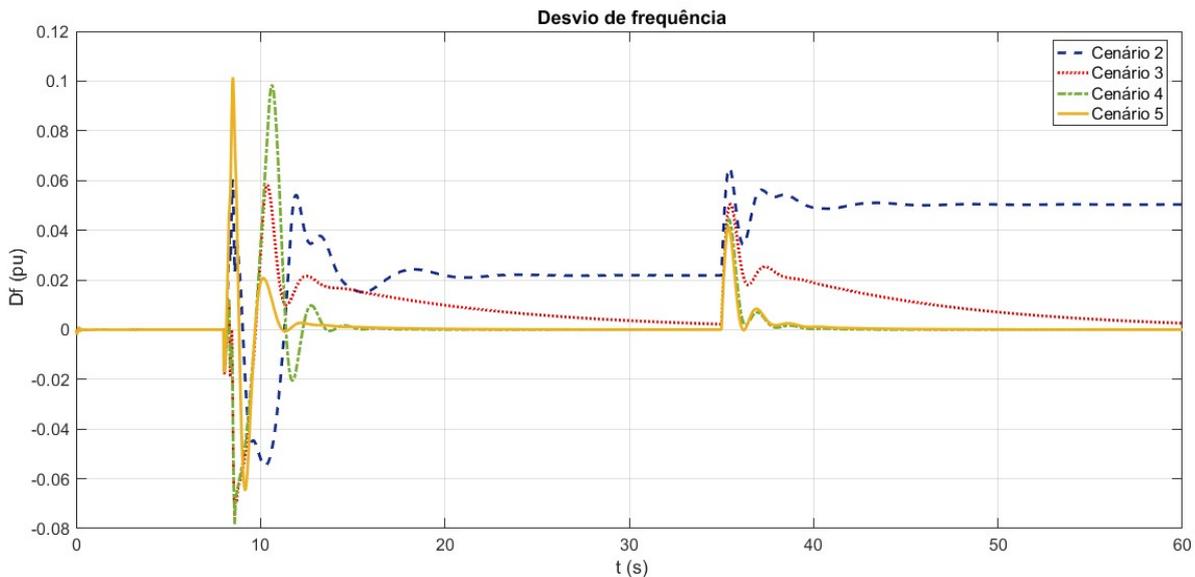
No cenário com controle de velocidade *washout*, a frequência é levada ao valor de referência após um período de pouco menos de 30 s, sem a necessidade

²⁰ Para os cenários 3 e 5 houve uma pequena ultrapassagem por um período de cerca de 0,4s que não desqualifica o uso dos controladores. Além de os limites do PRODIST não considerarem a condição de ilhamento, microrredes dispostas operar nestas condições certamente teriam outras fontes de GD de resposta rápida, como bancos de baterias, que contribuiriam com a diminuição da oscilação no transitório.

de controle secundário. Ajustes com tempo de resposta mais rápido levariam o sobressinal muito acima dos limites do PRODIST.

Quando ocorre a desconexão da carga L1-2, apesar de a microrrede não ter mais o barramento infinito como referência de frequência, os reguladores dos cenários 3 a 5 são capazes de levar o erro de estado estacionário a zero, segundos após o distúrbio.

Figura 52 – Desvio de frequência do gerador DG1 nos cenários 2 a 5



Fonte: própria autora (2017)

A configuração que apresenta melhor desempenho quanto à regulação de frequência, principalmente no transitório de ilhamento é a que utiliza o MPC tanto para a regulação de frequência quanto de tensão (cenário 5).

10.1.2.3 Tensão

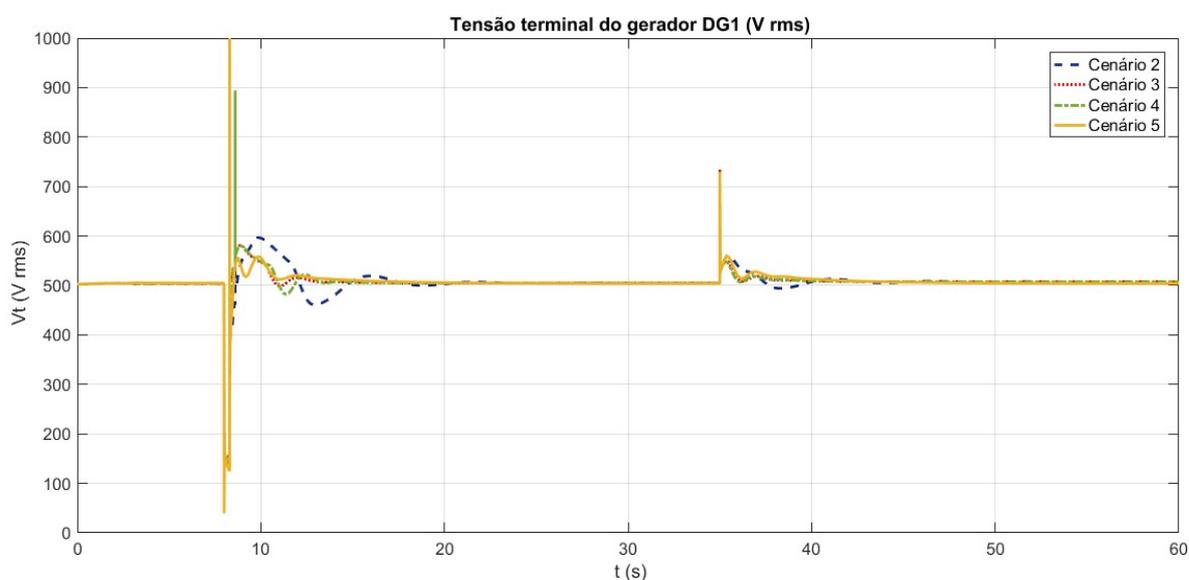
O comportamento da tensão terminal (valor eficaz) do gerador DG1 é representado na Figura 53.

Para o fluxo de potência, foi considerado o ajuste de 1,05 pu para a tensão terminal do gerador (ver Tabela 8), ou seja, 504 V. Neste sentido verifica-se que, mesmo com os transitórios decorrentes do ilhamento, a tensão terminal não chega a ultrapassar 10% de sobressinal para os cenários 4 e 5, que usam o MPC.

De forma análoga ao que ocorre com a potência, o cenário 2 apresenta o comportamento com mais oscilações, enquanto o 5, onde o controle de velocidade e tensão é feito pelo MPC, permite uma variação mais suave e com menor sobressinal.

Em se tratando da tensão no PCC, representada na Figura 54, as curvas são semelhantes às da tensão terminal do gerador DG1.

Figura 53 – Tensão terminal eficaz no gerador DG1 para os cenários 2 a 5

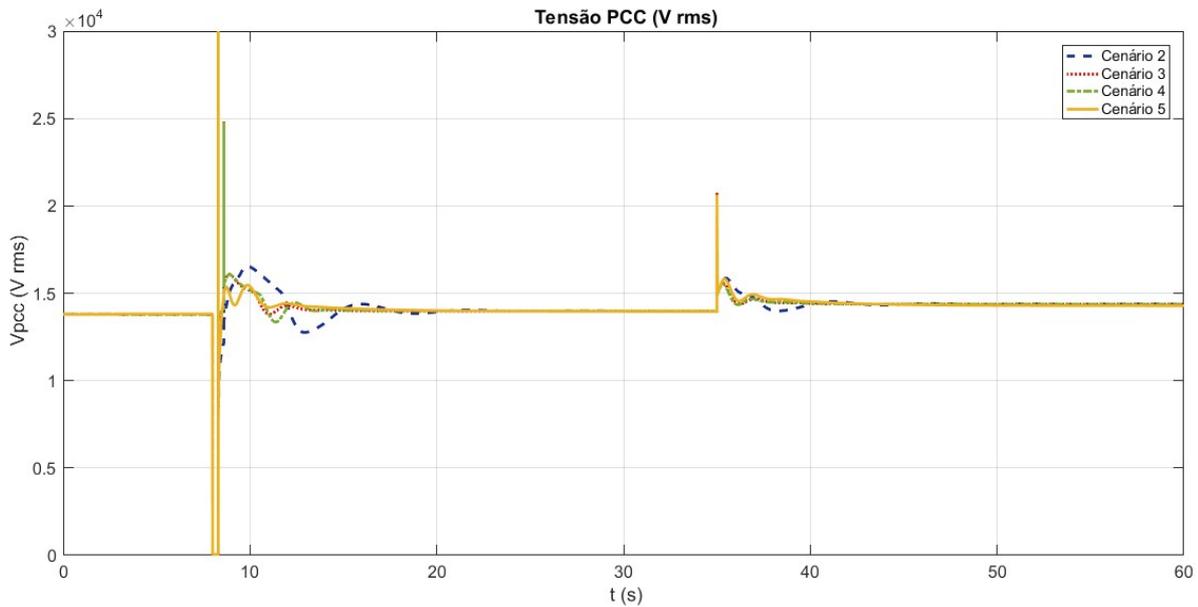


Fonte: própria autora (2017)

Considerando-se as faixas de classificação de tensões em regime permanente do PRODIST, que determina que em pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 1 kV e inferior a 69 kV, para a tensão de atendimento ser considerada adequada, deve respeitar a relação $0,93TR < TL < 1,05TR$, onde TR é a tensão de referência, que neste caso é 13,8 kV e TL é a tensão de leitura.

Enquanto a microrrede estava operando em paralelo com a concessionária, a tensão no PCC estava em 13,8 kV. Após o ilhamento e até a desconexão da carga L1-2, a tensão ficou entre 13,9 e 14 kV. Após o instante $t = 35$ s, a tensão passou a 14,3 kV, ainda dentro do atual limite de 5% do PRODIST.

Figura 54 – Tensão no Ponto de Conexão Comum – PCC, nos cenários 2 a 5



Fonte: própria autora (2017)

Importante ressaltar que no mesmo barramento do PCC está conectado um banco de capacitores fixo. Com a redução do consumo de reativos na rede, decorrente da desconexão de cargas, é natural que a tensão do ponto onde está conectado o banco se eleve.

11 CONCLUSÕES

Embora os investimentos em energia renovável não tradicional apresentem, na maioria dos casos, custos superiores aos necessários na adoção de fontes tradicionais, é inegável que estes investimentos trazem também diversos benefícios além da própria energia gerada.

Analisando-se o trabalho apresentado sob a ótica da geração distribuída, verifica-se que o uso de motogeradores para o aproveitamento do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos é uma alternativa interessante. Enquanto ainda é subutilizada no Brasil, há muitos anos é usada em países desenvolvidos, como os Estados Unidos.

Além de ser uma fonte de geração de energia próxima aos centros de consumo, a implantação de usinas para aproveitamento do biogás gerado pela decomposição de resíduos orgânicos para a geração de energia pode contribuir no cálculo de viabilidade de projetos que permitam correta destinação dos resíduos sólidos produzidos nas cidades. Os recursos obtidos com a comercialização e/ou o uso da energia gerada, assim como os recursos gerados com a venda de créditos de carbono podem servir como um incentivo para o investimento em plantas que façam o reaproveitamento do metano gerado pela decomposição do lixo, evitando seu despejo na atmosfera.

Embora a conexão destas novas fontes de energia elétrica distribuída seja de grande importância na diversificação da matriz energética, é de suma importância que sejam feitos estudos do impacto destas novas fontes nas redes de distribuição, também para que seja possível tirar o maior proveito dos investimentos feitos nestas novas fontes, aumentando a confiabilidade e disponibilidade da rede.

Com o aumento da participação da geração distribuída, intensifica-se também a necessidade de uso de sistemas de controle cada vez mais modernos, para permitir a operação econômica e segura do sistema. O uso de sistemas de gestão e controle modernos (com conceito de “*smart grids*”) poderá permitir a operação de sistemas em ilha de forma segura, aumentando ainda mais a disponibilidade do sistema.

Neste contexto, o uso das técnicas de controle convencionais, com malha de controle primário local e uma malha adicional de controle centralizado, exigindo o

uso de *links* de comunicação, não se mostra como a alternativa ideal para permitir o desenvolvimento de microrredes. A adição do elemento de comunicação representa mais um possível ponto de falha no sistema, além de exigir mais investimento e a provável necessidade de se readequar os ajustes o projeto do controle centralizado a cada novo agente que se conecta à rede.

Com o aumento da quantidade de agentes na geração e com a necessidade de se aumentar a confiabilidade e disponibilidade do sistema, técnicas de controle descentralizado, que não exijam investimento em *links* especiais de comunicação, mostram-se ser a solução ideal quando se fala em microrredes.

Realizando-se uma análise qualitativa na aplicação de controle preditivo para o sistema estudado neste trabalho, verifica-se que esta é uma alternativa interessante para a aplicação em microrredes, permitindo respostas mais rápidas e menos oscilatórias.

O modelo utilizado neste trabalho é relativamente simples, já que o maior objetivo era mostrar que o MPC é uma solução factível para o controle de motogeradores em microrredes. No entanto, seria possível a inclusão de estados adicionais no modelo, que considerassem o consumo/custo do combustível, por exemplo, ou a emissão de gases poluentes, algo que realmente deve ser controlado em um sistema como este. Considerando-se que o MPC permite o uso de restrições nas variáveis e a busca do ponto ótimo de operação nas condições estabelecidas no projeto, aumenta-se ainda mais a expectativa de vantagens no uso deste tipo de controlador para a aplicação em geração distribuída.

O modelo apresentado neste trabalho, embora mostre que este tipo de controle poderia ser usado com eficiência no controle da estabilidade de redes elétricas, poderia trazer ainda trazer mais funcionalidades, como a busca do ponto ótimo de operação, com menor custo, restrições operacionais quanto aos limites de emissão de gases, o compartilhamento de cargas entre máquinas em paralelo, etc. Para tal, todos estes fatores devem ser incluídos no modelo da planta.

11.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se os seguintes tópicos, não contemplados por esta pesquisa:

- Inclusão de estados adicionais na planta para o projeto de um MPC que permita maior controle dos parâmetros da planta e uma operação mais eficiente;
- Simulação de uma microrrede com outras fontes de geração de energia conectadas através de inversores, como painéis solares e bancos de baterias, de forma a avaliar os tempos de restabelecimento da frequência e tensão na ocorrência do ilhamento (transitório) e de outros distúrbios quando da operação ilhada;
- Analisar esquemas de controle e proteção de microrredes com o conceito *smart grid*.
- Analisar a viabilidade financeira da implantação de uma usina para aproveitamento do biogás do lixo no aterro sanitário de Joinville.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA MUNICIPAL DE REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTO DE JOINVILLE – AMAE. **Sistema de Esgotamento Sanitário**. Disponível em <<http://www.amae.sc.gov.br/servicos/abastecimento-de-agua-e-esgotamento-sanitario/sistema-de-esgotamento-sanitario/>>. Acesso em: 18 abr. 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **BIG – Banco de Informações da Geração** (Atualizado em 22/04/2017). Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power System Stability and Control**. 2.ed. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.

ANDERSSON, Göran. **Modelling and Analysis of Electric Power Systems: power flow analysis, fault analysis, power systems dynamics and stability**. Apostila 227-0526-00. Zürich: ETH Zürich - EEH - Power Systems Laboratory, 2008. Disponível em: <<https://www.ethz.ch/en.html>>. Acesso em: 04 nov. 2015.

ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Atualizado em 11/01/2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/-/asset_publisher/nHNpDfkNeRpN/content/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fregulacao-da-distribuicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_nHNpDfkNeRpN%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D4>. Acesso em: 14 set. 2017.

ARCADIS TETRPLAN. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. Ministério de Minas e Energia – MMA e Programa das Nações Unidas para o desenvolvimento – PNUD: S.i., 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em 06 mai. 2017.

BEVRANI, Hassan; WATANABE, Masayuki; MITANI, Yasunori. **Power System Monitoring and Control**. First Edition. S.L.: John Wiley & Sons, 2014.

- BP p.l.c. **BP Energy Outlook 2035**. [S.l.]: BP p.l.c, 2015
- BRASIL: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017 – Ano base 2016**: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- BRASIL: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 13/14: Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro: EPE(1), 2014
- BRASIL: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 18/14: Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**, Rio de Janeiro: EPE(3), 2014
- BRASIL: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 26/14: Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023)**. Rio de Janeiro: EPE(2), 2014
- BRASIL: INSTITUTO DE PESQUISA DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS. **Tabelas: Maiores Economias do Mundo**. Disponível em: <.>Acesso em: 30/08/15.
- CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, Carlos. **Model Predictive Control**. Grã-Bretanha: Springer, 1998.
- CAROLINO, Suélio Fernandes. **Regulador Automático de Tensão Robusto Utilizando Técnicas de Controle Adaptativo**. Dissertação de mestrado – UFRN, 2013.
- CATERPILLAR. **Gas Engines Application and Instalation Guide – Low Energy Fuels**. USA: Caterpillar Inc., 1997.
- CELESC. **Manual de Procedimentos I-432.0004**: Requisitos para a Conexão de Micro ou Minigeradores de Energia ao Sistema Elétrico da Celesc Distribuição. 2014.
- CHAGAS, Alexandre Guedes. **Avaliação da Estabilidade de Sistemas de Distribuição Considerando a Presença de Elevada Penetração de Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, 2016.
- CIGRÉ. **Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks**. Working Group C4.605. S.I, Cigré, 2014.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Apêndice A – Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. São Paulo,

Cetesb, 2009. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES. **Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines**. British Columbia: Ministry of Environment, 2010. Disponível em: <<http://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/waste-management/garbage/landfills>>. Acesso em 02 mai. 2017.

DIMEAS, Ari; *et al.* **Microgrids: Architectures and Control**. First Edition. S.L.: John Wiley & Sons, 2014.

DUARTE, Adriana Carneiro. **Projetos de MDL em Aterros Sanitários no Brasil: Alternativa para o Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação (Mestrado de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, 2006.

ENVIRONMENT AGENCY. **Guidance for monitoring landfill gas engine emissions**. Bristol, Environment Agency, 2004.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE JOINVILLE – IPPUJ (Org.). **Joinville – Cidade em Dados 2016**. Joinville: Prefeitura Municipal, 2016, 158p. Ilustrada. Disponível em <<https://ippuj.joinville.sc.gov.br/>>. Acesso em: 16 abr. 2017

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE JOINVILLE – IPPUJ (Org.). **Joinville – Cidade em Dados 2010/2011**. Joinville: Prefeitura Municipal, 2011, 194p. Ilustrada. Disponível em <<https://ippuj.joinville.sc.gov.br/>>. Acesso em: 22 abr. 2017

FUNDAÇÃO MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE – FUNDEMA (Org). **Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos do Município de Joinville (PMGIRS)**. Joinville: Prefeitura Municipal, 2013. Disponível em <<https://www.joinville.sc.gov.br>>. Acesso em: 16 abr. 2017

GIBBARD, M.J.; POURBEIK, P. and VOWLES, D.J. **Small-signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems**. Adelaide: University of Adelaide Press, 2015.

GLOVER, J. Duncan; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas J. **Power System Analysis and Design**. 5 ed. USA: Cengage Learning, 2012.

- GONÇALVES, Luiz Fernando. **Contribuições para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- GUERRERO, Josep M; *et al.* **Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 4, august 2005 .
- HINGORANI ,Narain G.; GYUGYI, Laszlo. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. 1st Edition. Wiley-IEEE Press: 1999.
- HIYAMA, Takashi, *et al.* **Wide-area Power System Oscillation Damping using Model Predictive Control Technique**. In: IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.131 No.7 pp.536–541, 2011.
- HUANG, Bin. **Stability of Distribution Systems with a Large Penetration of Distributed Generation**. Tese de Doutorado - Universität Dortmund, 2006.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. France: OECD/IEA (2), 2014.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2014 – Executive Summary**. France: OECD/IEA (1), 2014.
- IEEE, 1993. **Load representation for dynamic performance analysis**. IEEE TaskForce on Load representation for Dynamic Performance. IEEE Transactions on Power Systems 8 (2), 472–482.
- IEEE, 2004. **Definition and Classification os Power System Stability**. IEEE/CIGRÉ Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. IEEE Transactions on Power Systems, 2004.
- IEEE. **IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™** - IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. 2009.
- IEEE. **IEEE Std 421.5-2005** – IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. USA: IEEE, 2006.
- IEEE-PES. **Trends in Microgrid Control**. IEEE/PES Task Force on Microgrid Control. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014.

KATIRAEI, K.; IRAVANI, M. R.; LEHN, P. W. **Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources**. In: IET Gener. Transm. Distrib., 2007, 1, (3), pp. 369–378. Canada, 2007.

KERSTING, William H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Ratón: FL: CRC Press, 2002, 314p.

KRISHNAMURTHY, Shashank; LASSETER, Robert. **Control of WoundField Synchronous Machine Gensets for Operation in a CERTS Microgrid**. USA: University of Wisconsin, 2009.

KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**. USA: McGraw-Hill, 1993.

LALOR, Gillian R. **Frequency Control on an Island Power System with Evolving Plant Mix**. Tese de Pós-doutorado -University College Dublin, 2005.

LIU, Qing, *et al.* **PID-MPC Based Automatic Voltage Regulator Design in Wide-Area Interconnect Power System**. In: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014.

Manual do Usuário do Programa de Computador Biogás: Geração e Uso Energético – efluentes e resíduo rural – Versão 1.0 / CETESB, Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo: CETESB, SMA, MCT, 2006. 62p.

Manual do Usuário do Programa de Computador Biogás: Geração e Uso Energético – aterros – Versão 1.0 / CETESB, Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo: CETESB, SMA, MCT, 2006. 65p.

MENDES, Luiz Gustavo Galhardo; SOBRINHO, Pedro Magalhães. **Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário**. Revista de Ciências Exatas, Taubaté, v.11, n.2, p.71-76, 2005. Disponível em: <<http://revistas.unitau.br/ojs-2.2/index.php/exatas/article/viewFile/358/480>>. Acesso em 21 abr. 2017.

MOCHOSWSKI, Jan; BIALEK, Janusz W.; BUMBY, James R. **Power System Dynamics** Stability and Control. 2 ed. UK: John Wiley & Sons, 2008.

PAVAN, Margareth de Cássia Oliveira. **Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, 2010.

QMC Laboratórios de Análises. **Relatório da Qualidade dos Efluentes das Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs dos Sistemas de Esgotamento Sanitário de Joinville nº 003/2017**. Florianópolis, QMC, 2017. Disponível em: <<http://www.amae.sc.gov.br/publicacoes/relatorios/>>. Acesso em: 18 abr. 2017

RENJIT, Ajit A.; ILLINDALA, Mahesh S.; MONDAL, Abrez. **Certs Microgrid: Modeling, Analysis and Control of Distributed Energy Resources - Phase I**. Columbus: The Ohio State University, 2015

RESE, Leonardo **Modelagem, Análise de Estabilidade e Controle de Microrredes de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

RINKE, Tobias B. **MPC-based Frequency Regulation and Inertia Mimicking for Improved Grid Integration of Renewable Energy Sources**. Master's degree thesis - Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich. Zurich, 2011.

SALIM, Rodrigo Hartstein. **Uma Abordagem para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, 2011.

TCHOBANOGLIOUS, George; KREITH, Frank. **Handbook of Solid Waste Management**. 2 ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. EPE: Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>>. Acesso em 05 mai. 2017.

VANDOORN, Lieven; *et al.* **Directly-Coupled Synchronous Generators With Converter Behavior in Islanded Microgrids**. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 3, AUGUST 2012.

VIDYASAGAR, Puvvula S R V R S S; SWARUP, K Shanti. **Discrete Model Predictive Frequency and Voltage Control of Isolated Micro-grid in Smart Grid Scenario**. IEEE, 2016.

VIEIRA FILHO, Xisto. **Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração**. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

- VIEIRA JR, José Carlos de Melo. **Detecção de ilhamento de geradores distribuídos: uma revisão bibliográfica sobre o tema.** In Revista Eletrônica de Energia (Universidade de Salvador). v. 1, n. 1, p. 3 -14 , jul./dez. 2011.
- WANG, Liuping. **Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®.** London: Springer, 2009.
- WILSON XU; MAUCH, Konrad; MARTEL, Sylvain. **An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and Issues for Canada.** CETC - Varennes 2004-074
- WOODWARD. **Governing Fundamentals and Power Management-** Reference Manual (Manual 26260). USA: Woodward, 2004
- WORLD BANK. **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean.** World Bank. Oct. 2003. 236p. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/954761468011430611/pdf/332640handbook.pdf>>. Acesso em 21 abr. 2017.
- WORLD ENERGY COUNCIL. **Energy Efficiency Technologies: Overview Report.** Londres: WEC, 2013.
- YAZDANIAN Mehrdad; MEHRIZI-SANI, Ali. **Distributed Control Techniques in Microgrids.** In: IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, 2014.
- YAZDANIAN Mehrdad; MEHRIZI-SANI, Ali. **Washout Filter-Based Power Sharing.** In: IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 2, 2016.
- ZALI, S. M. **Equivalent Dynamic Model of Distribution Network With Distributed Generation.** Tese de doutorado – University of Manchester, 2012.
- ZANGENEH, Mohsen; *et al.* **A New Power Management Control Strategy for a MV Microgrid with Both Synchronous Generator and Inverter-Interfaced Distributed Energy Resources.** IEEE, 2014. Published in: 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)

APÊNDICE A – USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS DE RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL

De acordo com o Banco de Informações da Geração da ANEEL, o Brasil tem, e hoje (consulta realizada em 22/04/2017) quinze usinas movidas a biogás provenientes de resíduos sólidos urbanos, perfazendo uma capacidade instalada de 117.760 kW.

Nome da Usina	Proprietário	Município	Início da Operação	Potência Inst. (kW)	Destino da Energia (*)
Salvador	Termoverde Salvador S.A.	Salvador/BA	22/12/2010	19.730	Produção independent e de energia
São João Biogás	São João Energia Ambiental S.A	São Paulo/SP	27/03/2008	24.640	Produção independent e de energia
Energ-Biog	Biomass Users Network do Brasil	Barueri/SP	18/12/2002	30	Registro
Asja BH	Consortio Horizonte Asja	Belo Horizonte/MG	-	4.278	Registro
Arrudas	Companhia de Saneamento de Minas Gerais	Belo Horizonte/MG	-	2.400	Registro
Ambient	Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S.A	Ribeirão Preto/SP	-	1.500	Registro
Biotérmica Recreio	BioTérmica Energia S.A	Minas do Leão/RS	24/06/2015	8.556	Produção independent e de energia
Uberlândia	Energas Geração de Energia Ltda	Uberlândia/MG	01/12/2011	2.852	Registro
CTR Juiz de Fora	Valorgas - Energia e Biogas Ltda	Juiz de Fora/MG	01/08/2013	4.278	Registro
Itajaí Biogás	Itajaí Biogás e Energia S.A.	Itajaí/SC	01/02/2013	1.065	Registro
Termoverde e Caieiras	Termoverde Caieiras Ltda	Caieiras/SP	15/07/2016	29.547	Produção independent e de energia
Guatapar	Guatapar Energia S.A.	Guatapar/SP	29/08/2014	5.704	Produção independent e de energia
Bandeirantes	Biogas Energia Ambiental S.A	São Paulo/SP	03/11/2014	4.624	Registro
Curitiba Energia	Curitiba Energia SPE Ltda	Fazenda Rio Grande/PR	11/01/2016	4.278	Registro
Tecipar	Tecipar Engenharia e Meio Ambiente LTDA	Santana de Parnaíba/SP	30/10/2015	4.278	Registro

(*) Produtores independentes de energia são agentes pessoa jurídica que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio (toda ou parte da energia), por sua conta e risco. Para usinas com capacidade até 5MW, não é necessária autorização da ANEEL para operação, bastando um registro, nos termos da lei nº 9074/95 (Arcadis Tetraplan, 2010)

Fonte: elaborado pela autora, 2017, com base em informações do Banco de Informações da Geração da ANEEL

APÊNDICE B – ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste apêndice serão apresentados alguns conceitos básicos de estabilidade de sistemas elétricos de potência.

B.1 CONCEITO DE ESTABILIDADE

Sistemas elétricos de potência são sistemas dinâmicos complexos e não lineares cujo desempenho é influenciado por um vasto leque de equipamentos com diferentes características e respostas dinâmicas. A confiabilidade do sistema não depende somente de a energia estar disponível para os consumidores, já que a maioria das cargas funciona somente em determinadas faixas de tensão e frequência. Desta forma, além de buscar a garantia de continuidade do fornecimento de energia, os sinais devem estar dentro de determinados limites de tensão e frequência.

A premissa básica para o funcionamento adequado de um sistema de potência é que a oferta de energia permanentemente deve estar em balanço com a demanda. Variações na demanda ocorrem constantemente e devem ser compensadas por aumento ou redução na geração de energia elétrica. Além disto, as máquinas síncronas, responsáveis por grande parte da energia elétrica gerada no sistema elétrico, devem estar em sincronismo com a rede e a integridade das linhas de transmissão deve ser mantida (ANDERSON; FOUAD, 2003).

Desta forma, pode-se definir “Estabilidade do Sistema” como a propriedade de um sistema de potência de permanecer em um estado de equilíbrio operacional sob condições normais de operação e de recuperar seu equilíbrio (na condição inicial ou em um novo estado, caso ocorram modificações topológicas no sistema), dentro de determinados limites, quando submetido a distúrbio de certa magnitude (KUNDUR, 1993).

Como salienta o professor Göran Andersson em sua referência (ANDERSSON, 2008), é muito importante salientar que o sistema de potência é um

sistema não linear, ou seja, sua estabilidade depende das características e da magnitude do distúrbio²¹, além das condições iniciais de operação.

Muito importante também, de acordo com o mesmo professor, é que não necessariamente o sistema, em condições de estabilidade, voltará ao mesmo estado anterior ao distúrbio. Quando ocorrer alguma mudança na topologia da rede, como a retirada de uma carga ou de uma linha, o novo estado de equilíbrio necessariamente será diferente do existente anteriormente. Além disto, é necessário que este novo estado de equilíbrio seja operacionalmente aceitável, de outra forma os sistemas de controle e/ou de proteção poderão promover novas mudanças na topologia da rede (isolamento de uma linha, por exemplo), que influenciarão na estabilidade do sistema.

Quando se fala em estabilidade em sistemas de potência, geralmente se busca dividir o problema de forma a focar nos fatores que influenciam no tipo no problema de estabilidade que deve ser tratado. Segundo IEEE (2004), embora a estabilidade seja um problema único, os vários fatores que levam à instabilidade fazem com que não seja possível entender e lidar com o problema como uma coisa só.

Desta forma, é muito comum se classificar os estudos de estabilidade com base nas seguintes características:

- Característica física do modo de instabilidade resultante indicada pela principal variável na qual a instabilidade pode ser observada (estabilidade angular, de frequência e de tensão);
- A magnitude do distúrbio, que influencia no método de cálculo e predição (pequeno, grande ou transitório);
- Equipamentos, processos e intervalo de tempo a ser considerado no sentido de se obter estabilidade (curto prazo e longo prazo).

Antes de tratar de cada tipo de situação, é importante ressaltar que os diferentes tipos de instabilidade podem não ocorrer em sua forma pura, ou seja, em determinadas situações, como em eventos em cascata, conforme os eventos acontecem, uma forma de instabilidade pode levar a outra (IEEE, 2004). Mesmo assim, conhecer as diferentes situações que levam à instabilidade e suas causas dá

²¹ Pode-se definir se um sistema linear é estável ou não independentemente das características do distúrbio. O mesmo não ocorre em sistemas não lineares, para os quais geralmente são definidas regiões de estabilidade, dependendo das características do distúrbio.

subsídios para o desenvolvimento de ferramentas e procedimentos apropriados para evitar que tais situações ocorram ou diminuir seus efeitos.

B.2 ESTABILIDADE ANGULAR OU SÍNCRONA

A estabilidade angular refere-se à possibilidade das máquinas síncronas conectadas a determinado sistema de permanecerem em sincronismo com a rede mesmo após algum distúrbio (ANDERSSON, 2008).

Em um sistema elétrico de potência, o total de potência ativa fornecida pelos geradores, desprezando-se as perdas, deve ser igual ao total de potência ativa consumida pelas cargas, ou seja, a oferta de energia deve sempre estar para cumprir a demanda. Nesta condição, há um equilíbrio entre o torque mecânico de entrada dos geradores síncronos e o torque eletromagnético de cada gerador, permitindo que a velocidade síncrona se mantenha constante. Caso ocorra uma perturbação no sistema, haverá uma aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas, de acordo com as leis da física (IEEE Std. , 2004). Quando um gerador gira mais rápido que outro conectado ao mesmo sistema, a posição angular do rotor mais rápido irá avançar com relação ao mais lento, fazendo com que parte da carga da máquina mais lenta seja transferida à máquina mais rápida. A máquina mais rápida, agora com mais carga, tende a desacelerar, reduzindo-se a diferença angular entre ambas.

A relação ângulo-potência é altamente não linear, então o processo descrito no parágrafo anterior ocorre somente até certo limite de separação angular. Após este limite, quando há um aumento no ângulo, a transferência de potência é reduzida de tal forma a aumentar ainda mais a diferença angular, o que pode levar à instabilidade (perda de sincronismo), caso o sistema não possua energia cinética suficiente para absorver a energia cinética correspondente à diferença de velocidade destes rotores (IEEE, 2004).

Para facilitar os estudos de estabilidade angular, é comum caracterizá-la entre as seguintes subcategorias:

- **Estabilidade a pequenas perturbações ou pequenos sinais:** está relacionada à habilidade do sistema em manter o sincronismo quando submetido a pequenos distúrbios na rede, como em chaveamentos de pequenas cargas. Neste caso, os distúrbios devem ser pequenos o

suficiente para permitir linearização do sistema em torno do ponto de operação para efeitos de análise. Normalmente o problema de estabilidade de pequenos sinais está associado ao insuficiente amortecimento das oscilações (Andersson, 2008) e depende basicamente dos estados iniciais de operação do sistema. O período de tempo de interesse nos estudos de pequenos sinais é na ordem de 10 a 20 segundos após a ocorrência do distúrbio (IEEE, 2004);

- **Estabilidade a grandes distúrbios ou estabilidade transitória:** associada à habilidade em se manter o sincronismo na ocorrência de um grande distúrbio, como um curto-circuito em uma linha de transmissão. Nestes casos há grandes excursões nos ângulos dos rotores e é possível observar a relação não linear entre potência e ângulo. A estabilidade transitória depende tanto das condições operacionais iniciais do sistema quanto da severidade do distúrbio. Neste caso, o período de tempo de interesse nos estudos de grandes distúrbios é na ordem de 3 a 5 segundos após a ocorrência do distúrbio e pode se estender para 10 a 20 segundos para sistemas muito grandes com oscilações inter-área dominantes (IEEE, 2004).

Os dois tipos de estabilidade angular aqui apresentados são classificados como fenômenos de curto prazo.

B.2.1 Equação de Oscilação da Máquina Síncrona

A estabilidade angular e as oscilações dos rotores de máquinas síncronas são essencialmente governadas pelas equações do movimento, que descrevem o desbalanço entre o torque eletromagnético e o torque mecânico das máquinas elétricas.

Quando há um desbalanço entre o torque eletromagnético e o mecânico em uma máquina elétrica, surge um torque acelerante ou desacelerante dado pela equação:

$$T_a = T_m - T_e \quad (76)$$

onde,

T_a : Torque acelerante [N.m]

T_m : Torque mecânico [N.m]

T_e : Torque eletromagnético [N.m]

O torque resultante do desbalanço é responsável por acelerar a inércia combinada do gerador e sua máquina motriz. Desta forma, a equação do movimento da máquina é dada por (KUNDUR, 1994):

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (77)$$

onde,

J : Momento de inércia total do gerador e máquina motriz [kg.m²]

ω_m : Velocidade angular do rotor [rad/s (mecânicos)]

t : tempo [s]

O momento de inércia da equação (77) pode ser substituído em termos da constante de inércia H do conjunto, em pu, levando-se em consideração a potência de base S_b em VA e velocidade angular nominal (ω_{0m}) da máquina em radianos mecânicos por segundo (KUNDUR, 1994):

$$H = \frac{1J\omega_{0m}^2}{2S_{base}} \quad (78)$$

Substituindo-se (78) em (77) tem-se:

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} S_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (79)$$

Considerando-se que $T_{base} = S_{base}/\omega_{0m}$ e utilizando-se uma barra sobre a letra para representá-la em pu, pode-se rearranjar a equação (79) da seguinte forma:

$$\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{1}{2H} (\bar{T}_m - \bar{T}_e) \quad (80)$$

onde,

$\bar{\omega}_r$: $\left(= \frac{\omega_m}{\omega_{0m}} = \frac{\omega_r/(p_f/2)}{\omega_0/(p_f/2)} = \frac{\omega_r}{\omega_0} \right)$ Velocidade angular do rotor

ω_0 : Velocidade angular nominal do rotor [rad/s (elétricos)]

p_f : Número de polos

Tomando-se δ como a posição angular do rotor, em radianos elétricos, tem-se que:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (81)$$

O que, em pu, fica:

$$\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (82)$$

Substituindo-se (82) em (80), a equação de movimento a ser utilizada nos estudos de estabilidade síncrona fica:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (\bar{T}_m - \bar{T}_e) \quad (83)$$

Dependendo-se da conveniência, a equação (83) pode ser representada em termos de potência elétrica e mecânica, ao invés do torque, já que $\bar{P}_m = \bar{T}_m \cdot \omega_r / \omega_0$ e $\bar{P}_e = \bar{T}_e \cdot \omega_r / \omega_0$:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0^2}{\omega_r} \frac{1}{2H} (\bar{P}_m - \bar{P}_e) \quad (84)$$

Segundo Göran Andersson (2008), observações e experiências em sistemas de potência reais durante distúrbios levam a constatação de que a velocidade angular do rotor, ω_r e ω_m , não costuma desviar significativamente de seus valores nominais, ω_0 e ω_{0m} , respectivamente. Desta forma, a equação de oscilação (84) poderia ser reescrita de forma simplificada como:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (\bar{P}_m - \bar{P}_e) \quad (85)$$

O ângulo δ está diretamente relacionado com a potência elétrica P_e fornecida pela máquina síncrona, através da seguinte equação:

$$P_e = \frac{E'V_{barra}}{X_{eq}} \text{sen}\delta \quad (86)$$

onde,

E' : Tensão atrás da reatância indutiva X'_d do gerador [pu]

V_{barra} : Tensão na barra infinita [pu]

X_{eq} : Reatância equivalente dada pela soma da reatância transitória de eixo direto do gerador (X'_d) e a reatância do sistema (X)

B.2 ESTABILIDADE DE TENSÃO

Estabilidade de tensão está relacionada à capacidade de um sistema de potência em manter a tensão estável dentro de uma faixa aceitável em todas as barras do sistema, quer seja em condições normais de operação quanto após submetidos a distúrbios (KUNDUR, 1994). Depende da habilidade do sistema em manter e/ou restabelecer o equilíbrio entre a demanda e a oferta de potência.

Instabilidade de tensão geralmente decorre quando potência reativa injetada em determinada barra difere do valor necessário para se atingir a tensão desejada. Caso este desbalanço seja muito grande, as tensões passam a ficar fora da faixa aceitável (ANDERSSON, 2008).

Como a instabilidade de tensão está mais associada ao fluxo de potência reativa e esta geralmente não pode ser transportada tão facilmente em sistemas de potência, onde a reatância da linha costuma ser maior que sua resistência ($X \gg R$) geralmente se trata este tipo de instabilidade como um fenômeno local (Andersson, 2008). Apesar disto, a instabilidade de tensão pode vir acompanhada de uma sequência de eventos capazes de levar uma parte significativa do sistema a um colapso de tensão, resultando em *blackout* ou afundamento de tensão (IEEE, 2004).

Segundo Göran Andersson (2008), colapsos de tensão geralmente resultam em tensões muito baixas no sistema, já nos casos de instabilidade, também é possível ter situações de aparecimento de sobretensões. A redução de tensão é associada a condições de carga elevada, enquanto elevações na tensão surgem em decorrência de situações com carga reduzida.

Assim como na definição de estabilidade angular, também é usual se classificar estabilidade de tensão em subcategorias, relacionadas com a amplitude do distúrbio e também com o horizonte de tempo considerado (IEEE, 2004):

- **Estabilidade a grandes distúrbios:** refere-se à habilidade do sistema em manter as tensões nas barras estáveis após distúrbios de grande magnitude, tais como faltas, perda de geração ou contingências. A avaliação deste tipo de estabilidade depende da análise não linear da resposta do sistema por um período de tempo suficientemente grande que permita avaliar o desempenho e as interações entre as fontes, cargas e os dispositivos de controle e proteção (discretos e contínuos) que influenciam o comportamento do sistema. Esta análise pode se estender de poucos segundos a dezenas de minutos;
- **Estabilidade a pequenos distúrbios:** refere-se à habilidade do sistema em manter as tensões estáveis quando sujeitas a pequenos distúrbios como os decorrentes das constantes alterações de carga. A análise deste tipo de fenômeno pode ser feita através da linearização das equações do sistema, dentro de determinadas condições, já que ele depende das características da carga, das características dos controles contínuos e dos discretos em um determinado instante de tempo. Obviamente também é possível considerar as

características não lineares (mudanças discretas) com um modelo matemático mais complexo, dependendo dos aspectos que se deseja avaliar;

- **Estabilidade a curto prazo:** similar à estabilidade angular a curto prazo, está relacionada à dinâmica das cargas. Sua análise é feita através da solução das equações diferenciais do sistema apropriadas ao período de interesse, que costuma ser na ordem de segundos;

- **Estabilidade a longo prazo:** envolve equipamentos de ação mais lenta, como transformadores de tap variável, e exige uma análise por um período mais longo, na ordem de minutos.

Em análises a pequenos sinais a estabilidade de tensão está diretamente associada à angular, sendo difícil fazer distinção entre elas (GIBBARD; POURBEI; VOWLES, 2015):

B.3 ESTABILIDADE DE FREQUÊNCIA

A estabilidade de frequência está associada a habilidade do sistema de potência em manter a frequência da rede estável mesmo após um distúrbio que acarrete em significativo desbalanço entre a potência consumida pelas cargas e a gerada pelos geradores (como consequência da potência mecânica dos geradores).

Diferentemente dos casos de estabilidade apresentados nos itens anteriores, que tratavam de desbalanços locais, a estabilidade de frequência trata o sistema de forma mais global. Quando a soma das potências gerada e injetada em uma rede interligada é insuficiente para atender à potência demandada pelas cargas por ela alimentadas, incluindo as perdas na rede, a frequência de todo o sistema elétrico será afetada. Caso o desbalanço de potência possa ser compensado pela energia cinética armazenada nas partes girantes dos geradores conectados à rede, haverá apenas um desvio de frequência temporário, que logo é compensado pelo incremento de geração de potência ativa, determinado pelo controle de frequência do sistema. Por outro lado, se o desbalanço de potência for de tal magnitude que não permita a rápida compensação pela energia cinética armazenada, pode haver um grande desvio de frequência que levará à desconexão de geradores e/ou cargas, pela atuação dos sistemas de proteção e/ou de corte de cargas (na tentativa de se manter parte do sistema e restabelecer a frequência).

Grandes variações na frequência da rede geralmente podem ser consequência de erros na previsão de demanda (no despacho centralizado de potência) levando à falta de potência reserva, perda de um grande bloco de carga ou de algum grande gerador ou barra (RINKE, 2011). Também podem causar problemas de instabilidade a falha de equipamentos ou a descoordenação entre os sistemas de controle e proteção (IEEE, 2004).

Perturbações severas no sistema geralmente resultam em grandes excursões de frequência, de fluxo de potência, tensão e outras variáveis do sistema, exigindo a ação de processos, controles e sistemas de proteção que não são modelados na análise convencional de estabilidade transitória e de tensão, descritas nos itens anteriores (IEEE, 2004). Estes processos podem ser lentos, como no caso de se acionar uma unidade geradora de grande porte para posterior conexão à rede, ou rápidos, como na atuação do sistema de proteção que detecta que determinada variável está fora do limite de ajuste e envia um sinal para desconexão de um bloco de carga, gerador ou barra.

Assim como na análise da estabilidade de tensão, o estudo das oscilações de frequência pode ser dividido em fenômenos de curto prazo, com um horizonte de poucos segundos, e de longo prazo, podendo durar vários minutos. Um bom exemplo de um fenômeno de curto prazo é a formação de uma ilha (condição que será tratada posteriormente neste trabalho, na qual uma porção da rede opera isolada do sistema interligado) com geração insuficiente para o atendimento das cargas e sem sistema de proteção capaz de cortar a carga necessária para manter o equilíbrio entre oferta e demanda na ilha. Em uma situação como esta, a frequência decai rapidamente, causando um *blackout* na ilha (IEEE, 2004).

Fenômenos de longo prazo podem ser relacionados a processos com maior inércia ou constante de tempo, como no caso de sistemas de controle e proteção de turbinas, caldeiras e reatores (ANDERSSON, 2008).

APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DE CARGAS UTILIZADAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE

C.1 CARGAS ESTÁTICAS

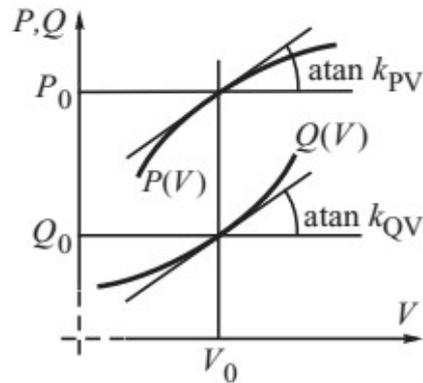
Uma carga estática é definida como um modelo que expressa as potências ativa e reativa em função da frequência e da magnitude da tensão em determinado instante ($P(V, f)$ e $Q(V, f)$, respectivamente). Modelos de cargas estáticas podem ser utilizados para representar cargas que exibem característica quase instantânea e invariante com o tempo de resposta da potência demandada quando submetida a uma variação na tensão e/ou frequência da rede na barra de conexão. Também podem ser utilizados para modelar cargas cuja resposta à variação de tensão é tão rápida que não pode ser capturada pelos instrumentos de medição ou ainda se o interesse da análise não estiver nos transitórios iniciais, como é o caso de estudos de estabilidade em longo prazo (CIGRÉ, 2014).

Em condições normais (estado estacionário), a demanda por potência das cargas depende da tensão na barra a que estão conectadas e da frequência da rede. As características $P(V)$ e $Q(V)$ tomadas à frequência constante são denominadas “características de tensão”, já as $P(f)$ e $Q(f)$ tomadas à tensão constante são chamadas “características de frequência”.

Na Figura 55, é possível observar a característica de tensão de determinada carga (para frequência a análise seria análoga), onde se verifica como a potência demandada varia com a tensão. A inclinação da tangente da curva em determinado ponto é denominada sensibilidade de tensão. Análise semelhante aconteceria para um gráfico P, Q versus f .

Os índices k_{pV} e k_{qV} são denominados sensibilidade à tensão e os k_{pf} e k_{qf} , sensibilidade à frequência, ambos relativos à potência ativa e reativa, respectivamente. Estes índices correspondem ao coeficiente angular da reta tangente às curvas P, Q versus V (Figura 55) e P, Q versus f em um ponto de referência (“0”) determinado, e são dados pelas equações em (87) (MOCHOSWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008):

Figura 55 - Sensibilidade à tensão



Fonte: Mochowski; Bialek; Bumby (2008).

$$k_{PV} = \frac{\Delta P / \Delta P_0}{\Delta V / \Delta V_0}, \quad k_{QV} = \frac{\Delta Q / \Delta Q_0}{\Delta V / \Delta V_0}, \quad k_{Pf} = \frac{\Delta P / \Delta P_0}{\Delta f / \Delta f_0}, \quad k_{Qf} = \frac{\Delta Q / \Delta Q_0}{\Delta f / \Delta f_0} \quad (87)$$

De acordo com Cigré (2014), as cargas estáticas podem ser divididas em exponencial, polinomial, linear, compreensiva, modelos estáticos de motores de indução e cargas com interface com elementos de eletrônica de potência.

C.1.1 Modelo Exponencial

O modelo exponencial de carga estática é um dos mais utilizados em estudos de estabilidade e será também utilizado para representar os consumidores nas simulações do capítulo 10. É representado pelas equações (88) e (89) (CIGRÉ, 2014), onde o índice “0” representa a condição inicial de cada uma das variáveis e os expoentes são os valores de sensibilidade à tensão e à frequência, retratados na equação (87).

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{k_{PV}} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{k_{Pf}} \quad (88)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{k_{QV}} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{k_{Qf}} \quad (89)$$

No Apêndice 3-A da referência *Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks* (CIGRÉ, 2014) estão listados os parâmetros de sensibilidade de tensão e frequência de uma série de cargas usualmente representadas em estudos de sistemas de potência. Neste apêndice também são dados valores típicos para os índices utilizados nas equações que serão apresentadas nas próximas seções.

Como a dependência das cargas com relação à frequência geralmente é desprezada em análises de sistemas de potência, já que as variações de tensão são muito mais frequentes e representativas que as de frequência (CIGRÉ, 2014), as equações (88) e (89) ficam resumidas às equações (90) e (91).

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{k_{PV}} \quad (90)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{k_{QV}} \quad (91)$$

Caso os expoentes das equações (90) e (91) sejam 0, 1 ou 2, a carga pode ser representada por modelos de potência constante, corrente constante ou impedância constante, respectivamente (IEEE, 1994).

Em livros de análise de sistemas de potência, onde geralmente se modela somente os sistemas de transmissão e subtransmissão, é comum encontrar somente as equações simplificadas (90) e (91) (exemplo são as referências de Kundur (1994) e Mochowski, Bialek e Bumby (2008)) nos modelos exponenciais. No trabalho do Cigré (2014), no entanto, é dado destaque ao fato de que nem sempre esta simplificação é válida, como em casos nos quais a frequência possua grandes excursões, como em sistemas de menor potência, com baixa inércia equivalente (o que também acontece em sistemas com grande penetração de geração distribuída com fontes renováveis, por exemplo) ou em sistemas dominados por máquinas equipadas com reguladores de frequência de ação lenta.

Para os casos em que se deva considerar a dependência da demanda com a frequência, as equações (88) e (89) geralmente são substituídas pelas equações (92) e (93), onde $\Delta f (= f - f_0)$ (CIGRÉ, 2014).

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{k_{PV}} \left(1 + k_{Pf} \frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (92)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{k_{QV}} \left(1 + k_{Qf} \frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (93)$$

C.1.2 Modelo Polinomial

O modelo polinomial também é bastante usado para representar cargas e engloba várias variantes. Este modelo também é conhecido como *ZIP*, já que é

composto por uma parcela de impedância constante (Z), outra de corrente constante (I) e uma última de potência constante (P), como se pode observar nas equações (94) e (95) (CIGRÉ, 2014), onde a dependência de frequência foi ignorada.

$$P = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (94)$$

$$Q = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \quad (95)$$

Os fatores p_1 e q_1 , p_2 e q_2 , p_3 e q_3 representam as participações relativas de cargas de impedância constante, corrente constante e potência constante, respectivamente. A soma dos fatores em cada uma das equações é igual a 1 (CIGRÉ, 2014).

Assim como nas equações exponenciais, também é possível incluir a dependência de frequência no modelo, conforme representado em (96) e (97).

$$P = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \left(1 + k_{pf} \frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (96)$$

$$Q = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \left(1 + k_{pf} \frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (97)$$

C.1.3 Modelo Linear

O modelo linear pode ser utilizado em estudos nos quais a tensão varia em uma faixa estreita em torno de seu valor nominal, como ocorre em análises de estabilidade a pequenos sinais, e não é recomendado para casos onde há grandes excursões no sinal de tensão (CIGRÉ, 2014). É dado pelas equações (98) e (99).

$$P = P_0 \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) \right] \quad (98)$$

$$Q = P_0 \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) \right] \quad (99)$$

O documento publicado pelo grupo de estudos do Cigré (2014) cita dois estudos que indicam que a potência reativa geralmente varia de acordo com o modelo ZIP, sendo que um deles chega a recomendar o uso do modelo linear somente para potência ativa, enquanto que para potência reativa deveria ser utilizado o polinomial.

C.1.4 Modelo Compreensivo

É um modelo que oferece a flexibilidade de acomodar diversas formas de representação de cargas (KUNDUR, 1994), sendo representado pela equação (100).

$$P = P_0[P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}] \quad (100)$$

onde,

$$P_{ZIP} = p_1 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0}\right) + p_3 \quad (101)$$

$$P_{EX1} = p_4 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{a_1} \left(1 + k_{pf_1} \frac{\Delta f}{f_0}\right) \quad (102)$$

$$P_{EX2} = p_5 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{a_2} \left(1 + k_{pf_2} \frac{\Delta f}{f_0}\right) \quad (103)$$

As expressões para potência reativa são dadas de forma análoga (KUNDUR, 1994).

Com o objetivo de capturar a dinâmica das cargas, os expoentes a_1 e a_2 tornam-se dependentes da tensão abaixo de um determinado valor de tensão de barra. Para evitar erros de cálculos, a maioria dos *softwares* comerciais, as parcelas de potência e corrente constante da equação (101) são trocadas por uma representação por impedância constante ou na forma elíptica quando a tensão baixa a um valor pré-determinado (geralmente menor ou igual a 0,7 pu), para garantir estabilidade numérica da solução.

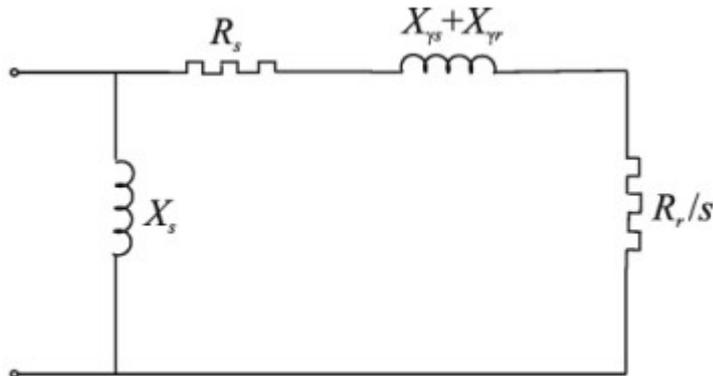
C.1.5 Modelo Estático de Motor de Indução

Cerca de 50 a 70% de toda a eletricidade é consumida por motores elétricos e, dentre estes, cerca de 90% são motores de indução. Geralmente os motores compõem parcela mais significativa da carga no caso de instalações predominantemente industriais (MOCHOSWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008).

Geralmente se utiliza o modelo estático para representar os motores de indução, derivando as equações do circuito equivalente apresentado na Figura 56, onde R_s e $X_{\gamma s}$, são a resistência e a reatância de dispersão do estator e R_r e $X_{\gamma r}$, as de rotor. A reatância *shunt* é representada por X_s , dado pela soma da reatância de

magnetização, representada na figura, e $X_{\gamma s}$. O escorregamento é representado por $s (= (\omega_s - \omega)/\omega_s)$, onde ω_s é a velocidade síncrona e ω é a velocidade angular do rotor).

Figura 56 - Circuito equivalente de um motor de indução



Fonte: Cigré (2014)

As equações que representam as potências ativa e reativa no modelo estático são:

$$P = \left(R_s + \frac{R_r}{s} \right) \frac{V^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{\gamma s} + X_{\gamma r})^2} \quad (104)$$

$$Q = (X_{\gamma s} + X_{\gamma r}) \frac{V^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{\gamma s} + X_{\gamma r})^2} + \frac{V^2}{X_s} \quad (105)$$

C.1.6 Cargas com Interface com Elementos de Eletrônica de Potência

A eletrônica de potência está cada vez mais presente nos equipamentos, em sistemas de iluminação, nos processos industriais, etc, fazendo com que a participação de cargas não lineares na demanda total dos sistemas elétricos seja crescente. O Cigré (2014) divide estas cargas em quatro grupos: fontes de corrente contínua, fontes de luz de alta eficiência (como fluorescentes compactas e lâmpadas LED), *drivers* de motores e carregadores para veículos elétricos (que hoje ainda não representam uma parcela relevante da carga do sistema, mas com a evolução da tecnologia, certamente deverão ser consideradas).

Em geral as cargas não lineares podem ter seu comportamento representado por modelos exponenciais e polinomiais. No já mencionado Apêndice 3-A da referência *Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks* (CIGRÉ, 2014) são apresentados modelos para fontes de corrente contínua, de fontes de lâmpadas compactas e a LED e de *drivers* para motores monofásicos e trifásicos operando em modo contínuo e descontínuo.

C.2 CARGAS DINÂMICAS

A resposta da maioria das cargas a alterações de tensão e frequência é bastante rápida e o estado estacionário geralmente é rapidamente atingido após pequenas variações de frequência e tensão, permitindo que modelos estáticos de carga possam ser utilizados em estudos com este tipo de cenário (KUNDUR, 1994).

Existem casos, no entanto, em que é necessário se considerar a dinâmica de algumas cargas, como em sistemas com alta concentração de motores ou ainda em estudos de oscilações entre áreas, de estabilidade de tensão e de estabilidade em longo prazo (KUNDUR, 1994).

Os modelos de carga dinâmicos geralmente expressam as potências ativa e reativa em qualquer instante como uma função da tensão e da frequência em instantes anteriores (usualmente incluindo o presente instante). Tais modelos geralmente são representados por equações de diferenças e ou diferenciais (IEEE, 1993).

O grupo de trabalho do Cigré (2014) salienta que tanto modelos estáticos quanto dinâmicos podem ser utilizados em estudos dinâmicos, até porque, na prática, não existem cargas estáticas (considerando-se o conceito mais amplo de carga, utilizado em análise de sistemas de potência). Quando se trata de grandes perturbações na tensão e/ou frequência do sistema, qualquer carga irá responder de uma forma finita, levando certo tempo para fazer a transição entre o estado pré e o pós distúrbio.

De acordo com Cigré (2014), as cargas dinâmicas podem ser divididas em exponencial, modelos dinâmicos de motores de indução, compostas, distribuição, carga do barramento de potência, e modelos de sistemas de armazenamento de energia distribuídos (utilizados em microrredes).

Detalhes da modelagem dinâmica de cargas podem ser encontrados no capítulo 7 da referência (KUNDUR, 1994) e na seção 3.3 da referência (CIGRÉ, 2014).

APÊNDICE D – CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Sistemas de potência são sistemas dinâmicos complexos, cujo controle é de essencial importância para manter a operação estável e segura.

O sistema elétrico de potência é planejado, construído e gerido com base nos seguintes pilares:

- Confiabilidade e segurança do fornecimento;
- Qualidade de energia, mantendo-se tensões e frequência dentro de limites predeterminados;
- Economia, buscando as fontes de energia de menor custo para cada período, evitando também partidas frequentes de geradores, que acarretam grande custo operacional;
- Impacto ambiental.

Como enfatiza Andersson (2008), quanto mais seguro e confiável o sistema, mais cara é a energia elétrica. Desta forma, fica evidente que no projeto, construção e gerenciamento de um sistema elétrico deve-se buscar um equilíbrio entre confiabilidade e custo. Neste sentido, pode ser que se tenha que aceitar que o sistema de controle não seja capaz de garantir a continuidade do fornecimento de energia quando da ocorrência de alguns fenômenos, geralmente de baixa probabilidade de ocorrência, quando o custo para a implantação da ação que evitaria a desconexão de cargas, por exemplo, supera o prejuízo ocasionado pela falha do sistema.

Em sistemas de potência (principalmente transmissão e subtransmissão), os fluxos de potência ativa e reativa são considerados como independentes entre si (como forma de simplificação dos estudos) e são predominantemente influenciados por diferentes ações de controle: potência ativa está estreitamente relacionada ao controle de frequência enquanto a potência reativa está mais relacionada com o controle de tensão (KUNDUR, 1994).

Os controles de tensão e de frequência são, portanto, essenciais para manter a qualidade da energia e o equilíbrio do sistema elétrico.

D.1 CONTROLE DE FREQUÊNCIA E POTÊNCIA ATIVA

Como já tratado no capítulo 6, a frequência é um indicador do balanço entre a potência elétrica na saída do gerador e a potência mecânica aplicada no rotor. Quando há um equilíbrio entre a potência demandada e a gerada, a frequência é constante e igual em todo o sistema, quando este atinge o estado de equilíbrio. Quando há um incremento de carga ou perda de um gerador, o déficit de potência faz com que os geradores síncronos conectados à rede desacelerem, conseqüentemente reduzindo a frequência da rede, que está diretamente acoplada à velocidade síncrona dos geradores síncronos pela conhecida equação $\omega = 2\pi f^{22}$. Caso ocorra uma redução de carga não compensada por uma redução na geração, há um aumento da frequência da rede.

Na prática, as cargas nos diversos barramentos do sistema variam constantemente, fazendo com que o ponto de equilíbrio entre carga e geração seja frequentemente alterado, exigindo um constante restabelecimento do estado de equilíbrio da rede a ser realizado pelo sistema de controle (VIEIRA FILHO, 1984).

Na operação dos sistemas elétricos também podem ocorrer grandes desvios de frequência, causados por erros na previsão de carga ou de geração de energia por fontes renováveis (e intermitentes), ou ainda pela desconexão não programada de geradores, cargas ou linhas.

Como há muitos geradores fornecendo potência ao sistema, deve existir uma forma de se alocar o aumento de potência demandada entre os geradores. Uma forma de fazê-lo é através uso de controladores de velocidade em cada unidade de geração síncrona, responsáveis por promover um controle primário da velocidade. Controladores localizados nas centrais de controle são responsáveis pelo ajuste complementar da frequência e também pela alocação da geração (KUNDUR, 1994).

No controle de frequência tradicional são considerados três estágios de controle, conforme demonstrado na Figura 57, quais sejam (RINKE, 2011):

- **Controle primário:** realizado por todos os geradores participantes do controle de frequência da rede, em um intervalo de poucos segundos após a ocorrência do desvio de frequência, levando a geração a entrar em equilíbrio

²² Devido ao acoplamento existente entre frequência e velocidade da máquina síncrona, ao se tratar de controle ou regulação de velocidade ou frequência, se está tratando do mesmo tema.

com a demanda, porém sem restabelecer a frequência a seu valor de referência;

- **Controle secundário:** geralmente centralizado e automático (controle automático da geração), restabelece a frequência a seu valor de referência e mantém o intercâmbio de potência entre as áreas de controle dentro de valores programados. Trata-se de uma malha de controle mais lenta que a do controle primário, com característica integrativa, e nela atuam apenas determinadas máquinas que fazem parte da reserva complementar, levando a frequência de toda a rede a seu valor nominal a um custo mínimo.

- **Controle terciário:** feito de forma manual ou automática, responsável pelo despacho econômico das unidades geradoras, através da partida ou desligamento de reservas de *backup*, permitindo o restabelecimento dos níveis de segurança das reservas complementares. Geralmente consistem em máquinas térmicas que são mantidas em *stand-by*, em uma condição operacional que permita a sincronização com a rede em um período de uma ou duas horas (ANDERSSON, 2008).

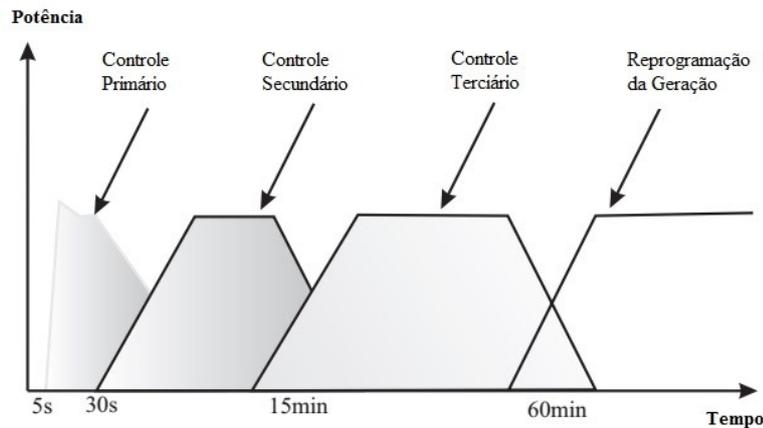
Em geral, os sistemas elétricos possuem uma capacidade intrínseca de auto-regulação devido ao efeito da variação da frequência nas cargas. Quando a frequência decai (pela perda de um gerador, por exemplo), também decai o valor absoluto da carga, graças à parcela de carga cuja potência demandada é dependente da frequência, o que fará com que o sistema atinja um novo estado de equilíbrio, diferente da condição inicial, porém com frequência estável. A esta característica dá-se o nome de “Regulação Própria do Sistema”, expressa pelo coeficiente de amortecimento D , denominado “Coeficiente de Amortecimento”, dado pela equação (106).

$$D = \frac{\Delta P_c}{\Delta f} \quad (106)$$

onde ΔP_c é a variação de carga ativa do sistema e Δf é a variação de frequência.

Embora exista esta regulação própria, ela é relativamente baixa (com D na ordem de 1%). Sendo assim, é necessário contar com regulações adicionais para manter a frequência dentro de valores aceitáveis (VIEIRA FILHO, 1984).

Figura 57 - Diferentes categorias de controle no tempo



Fonte: Rinke (2010) – traduzido pela autora.

Quando há um desequilíbrio entre potência elétrica gerada e demandada dado por um aumento repentino na carga, por exemplo, a geração ficará instantaneamente inferior ao consumo. Considerando-se que estas cargas continuarão conectadas drenando energia, momentaneamente esta deficiência na geração será suprida pela energia cinética (inércia) armazenada nas massas girantes do sistema fazendo com que a velocidade destas máquinas e, conseqüentemente, a frequência, sejam reduzidas (VIEIRA FILHO, 1984).

A contribuição da inércia na estabilidade é uma característica importante de geradores síncronos graças a seu acoplamento eletromecânico com o sistema. Na ocorrência de um desvio de frequência, a energia cinética armazenada nas massas girantes dos geradores síncronos conectados ao sistema é liberada. A energia cinética armazenada em uma massa girante é dada por (KUNDUR, 1994):

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_{0m}^2 = 5,48 \times 10^{-9} \frac{J(\text{rpm})^2}{S_{MVA}} \quad (107)$$

onde,

- J : Momento de inércia total do gerador e máquina motriz [kg.m²]
- ω_{0m} : Velocidade angular nominal do rotor [rad/s (mecânicos)]
- rpm : Rotações por minuto do rotor do gerador
- S_{MVA} : Potência ativa nominal da máquina, em MVA

Desta forma, o processo de conversão eletromecânica de um gerador síncrono conectado à rede pode ser dado pela equação (108), onde P_{perdas} equivalem às perdas no processo de conversão, como as perdas no cobre, no ferro,

de dispersão, por atrito e ventilação. Geralmente estas perdas são desconsideradas na modelagem para análise de estabilidade (RENJIT; ILLINDALA; MONDAL, 2015).

$$\frac{\Delta E_k}{\Delta t} = J\omega_{0m} \frac{\Delta\omega_m}{\Delta t} = P_m - P_e - P_{perdas} \quad (108)$$

Com a redução da velocidade dos geradores e, conseqüentemente, da frequência do sistema, surge a necessidade da atuação dos reguladores de velocidade das máquinas no sentido de aumentar as potências das unidades geradoras (ordenando o aumento da potência mecânica fornecida pelas máquinas motrizes) (VIEIRA FILHO, 1984) para compensar a perda de velocidade.

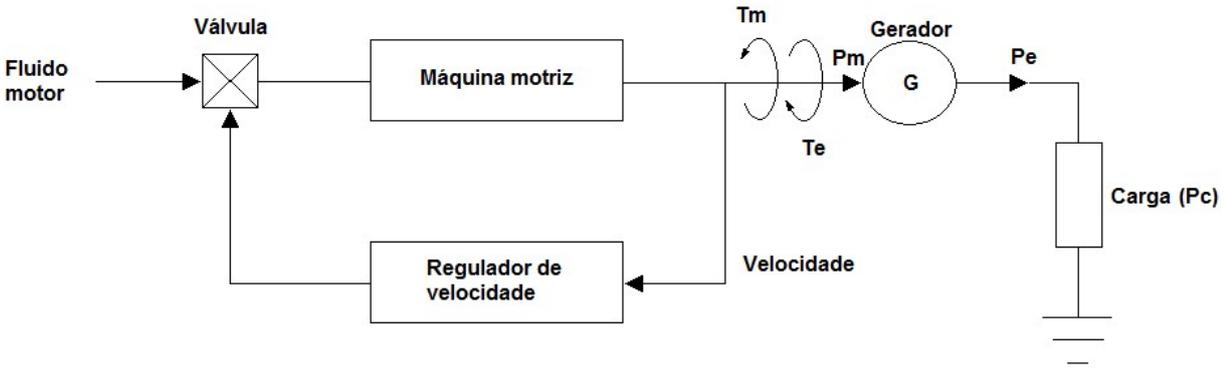
Estas máquinas que são capazes de absorver rapidamente estas oscilações de frequência através da atuação de seus reguladores de velocidade funcionam como uma reserva girante do sistema, que entra em um intervalo de poucos segundos para compensar pequenos desvios de frequência dados pequenos desequilíbrios entre geração e demanda (geralmente dados por erro de previsão do despacho centralizado).

D.1.1 Fundamentos da regulação de velocidade em máquinas síncronas

A regulação de velocidade em geradores síncronos pode ser compreendida pela análise da Figura 58, onde uma máquina síncrona alimenta uma carga isolada.

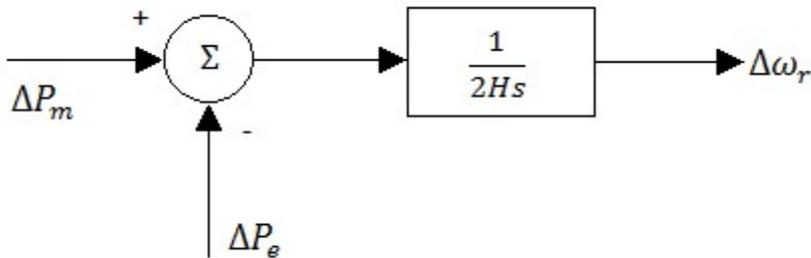
Quando há uma variação na potência demandada pela carga (P_c), imediatamente há um reflexo no torque eletromagnético (T_e) e, conseqüentemente, da potência de saída (P_e) do gerador, o que causa uma variação de velocidade, conforme equações de oscilação da máquina. A função de transferência que relaciona a variação de velocidade com a variação de potência é dada na Figura 59, baseada na equação (85).

Figura 58 - Esquema de uma máquina síncrona alimentando uma carga isolada



Fonte: própria autora (2017), baseada em (KUNDUR, 1994).

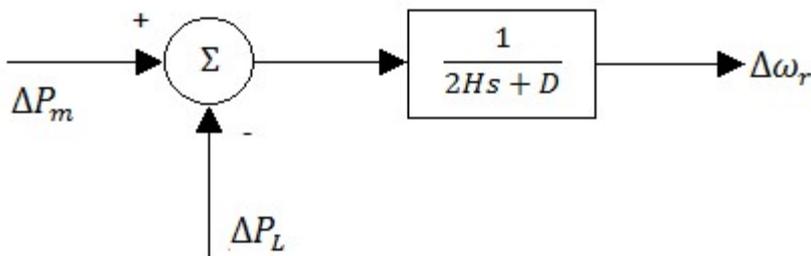
Figura 59 - Função de transferência que relaciona a variação de velocidade com a variação da potência



Fonte: própria autora (2017), adaptado de (KUNDUR, 1994).

Considerando-se que a carga geralmente é composta por uma parcela não sensível à frequência da rede (P_L) e outra sensível às variações de frequência ($D\Delta\omega_r$), ponderada pelo coeficiente de amortecimento D do sistema a ser modelado, o diagrama de blocos da Figura 59, considerando este efeito do amortecimento, ficaria como o da Figura 60.

Figura 60 - Função de transferência que relaciona a variação de velocidade com a variação da potência, incluindo efeitos do coeficiente de amortecimento da rede

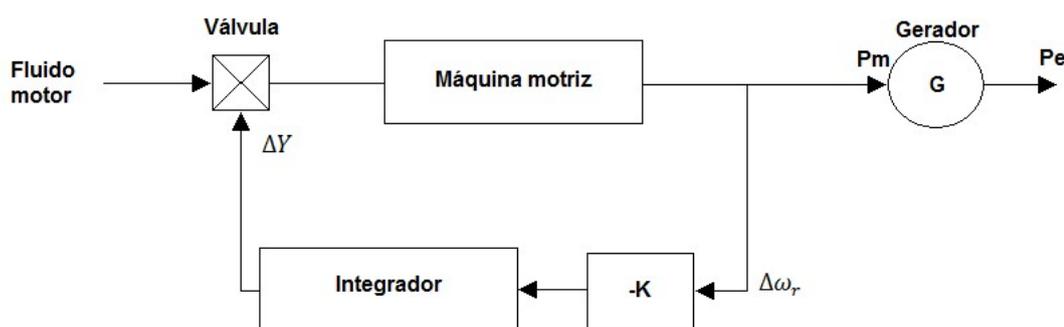


Fonte: própria autora (2017), adaptado de (KUNDUR, 1994).

D.1.1.1 Controle de velocidade isócrona (controle primário)

Um controlador isócrona, ao detectar um desvio de frequência, ajusta a válvula que regula o fluxo de combustível para a máquina motriz de forma a compensar a diferença de potência, fazendo com que a velocidade do gerador volte ao seu valor nominal. Este tipo de controlador possui ação integrativa, conforme indicado na Figura 61, levando o desvio de frequência (correspondente ao erro entre a frequência/velocidade medida e a referência) a zero em estado estacionário, desde que a carga alimentada esteja limitada à carga nominal da máquina, atuando na posição Y da válvula que regula o combustível que alimenta a máquina motriz.

Figura 61 – Esquema simplificado de uma máquina com controle isócrona



Fonte: própria autora (2017), adaptado de (KUNDUR, 1994).

Controladores isócronos geralmente são utilizados em aplicações mais simples, com um único gerador, ou em um sistema com múltiplos geradores quando somente um deles é responsável por responder às variações de frequência da rede (KUNDUR, 1994). Uma máquina com controlador isócrona simples não pode ser conectada com a rede da concessionária, que age praticamente como uma unidade isócrona, definindo a frequência de qualquer unidade que esteja em paralelo com ela (WOODWARD, 2004).

D.1.1.2 Controle com droop (controle primário)

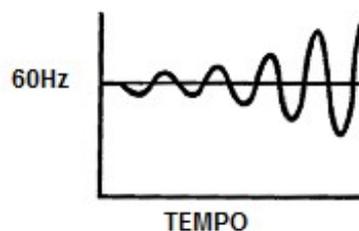
Um controlador isócrona não poderia ser utilizado em sistemas com duas ou mais unidades geradoras conectadas ao mesmo sistema, exceto se ambos os

geradores tiverem exatamente as mesmas configurações de velocidade ou se forem equipados com um esquema de compartilhamento de carga. Na maioria dos casos, o uso de controladores isócronos em geradores conectados em paralelo levará o sistema à instabilidade, já que cada um dos controladores fará com que seu respectivo gerador tente controlar a frequência do sistema de acordo com suas configurações (KUNDUR, 1994).

Este problema de instabilidade pode ser eliminado com o uso de controladores com *droop* (queda). Neste tipo de controlador, conforme a carga aumenta, o ajuste de velocidade diminui, fazendo com que o novo estado de equilíbrio se dê em um valor de velocidade/frequência pouco abaixo do nominal.

De acordo com o fabricante de controladores Woodward (2004), em um sistema sem *droop*, uma variação de carga faria com que a máquina primária reduzisse a velocidade e o regulador respondesse enviando um sinal para que se aumentasse o fluxo de combustível, de forma que a velocidade voltasse ao normal. Considerando-se que existe um atraso devido às características mecânicas do sistema, o regulador iria permitir o envio de mais combustível que o necessário, fazendo com que a velocidade continuasse a subir para além do valor de referência do controle (*overshoot* de velocidade). Para corrigir este *overshoot*, o controlador iria atuar de forma a corrigir a velocidade no outro sentido, porém a mesma inércia já citada levaria a um *undershoot* no sinal de velocidade. Esta constante correção de velocidade além do necessário em ambas as direções se amplificaria a cada ciclo, acarretando em instabilidade da máquina, como ilustrado na Figura 62.

Figura 62 - Velocidade do gerador com controlador inadequado à conexão em paralelo com a rede.



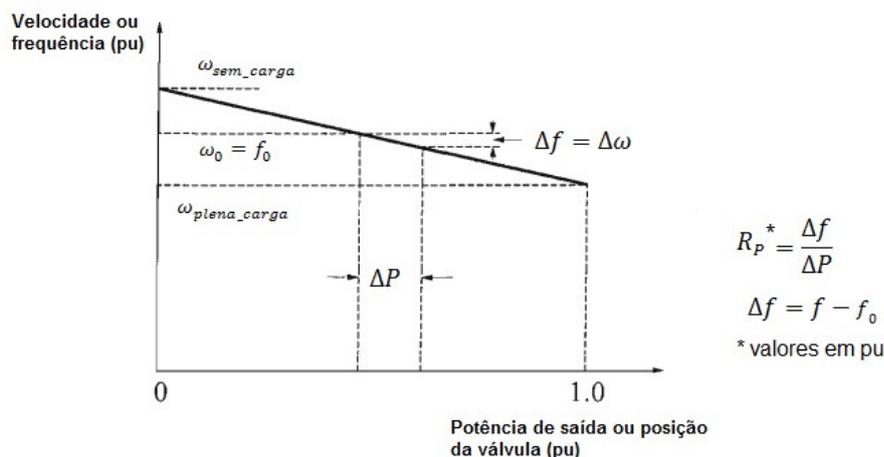
Fonte: Woodward (2004), traduzido pela autora.

Quando expresso em percentual, o *droop* de frequência (ou regulação) de uma máquina é dado como um percentual do ajuste de velocidade da situação sem

carga até plena carga do gerador, representado pela equação (109) e ilustrado na Figura 63.

$$R_p \% = \frac{\omega_{sem_carga} - \omega_{plena_carga}}{\omega_0} \times 100 \quad (109)$$

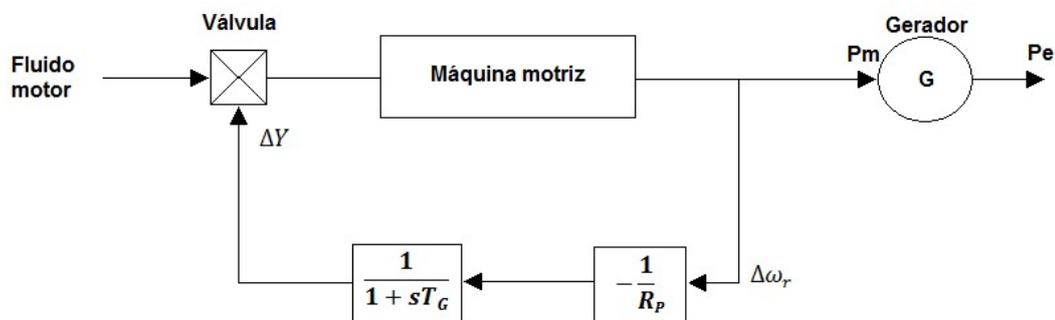
Figura 63 - Característica ideal de um controlador com *droop* de velocidade/frequência, em pu



Fonte: própria autora (2017), adaptado de (KUNDUR, 1994).

O diagrama de blocos simplificado de um regulador de velocidade com *droop* está representado na Figura 64, onde $T_G = 1/KR_p$, sendo K o ganho do controlador. O diagrama de um controlador com *droop* resulta da simplificação de um controle isócrona com realimentação, utilizando o *droop* (estatismo) R_p como ganho na realimentação.

Figura 64 – Esquema simplificado de uma máquina com controle com *droop*

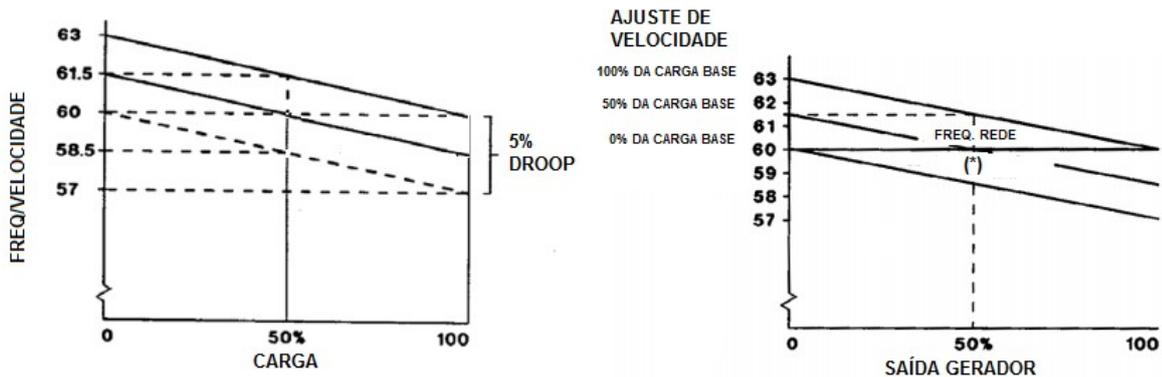


Fonte: própria autora (2017)

Na Figura 65 é possível observar a relação entre a velocidade e a carga assumida pelo gerador com *droop* de 5%. Como pode ser observado na Figura 65, a

potência fornecida pela máquina é determinada pelo ponto onde a linha de *droop* cruza a frequência da rede no gráfico. Em caso de variação da frequência da rede, a potência fornecida pela máquina equipada com o controlador da Figura 64 irá variar inversamente (WOODWARD, 2004).

Figura 65 – Características da potência gerada em função da frequência da rede com o uso do *droop*

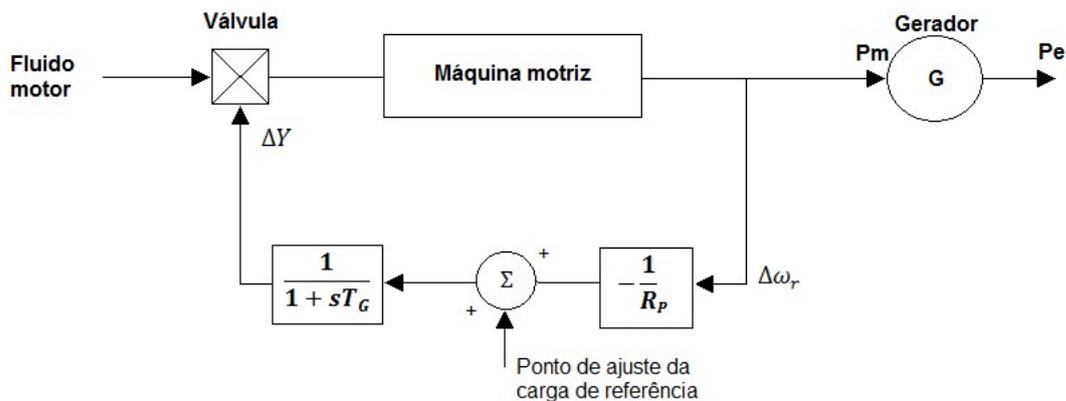


(*) Frequência da rede determinada por uma máquina isócrona, no caso de sistemas isolados, ou pela rede principal, no caso de gerador conectado em paralelo com a concessionária

Fonte: própria autora (2017), adaptado de (WOODWARD, 2004).

Para possibilitar este ajuste da carga de referência em uma determinada frequência, o diagrama de blocos da Figura 64 deve ser modificado para incluir uma entrada para o ajuste da carga de referência, como representado na Figura 66.

Figura 66–Esquema simplificado de uma máquina com controle com *droop* e ajuste de referência de carga



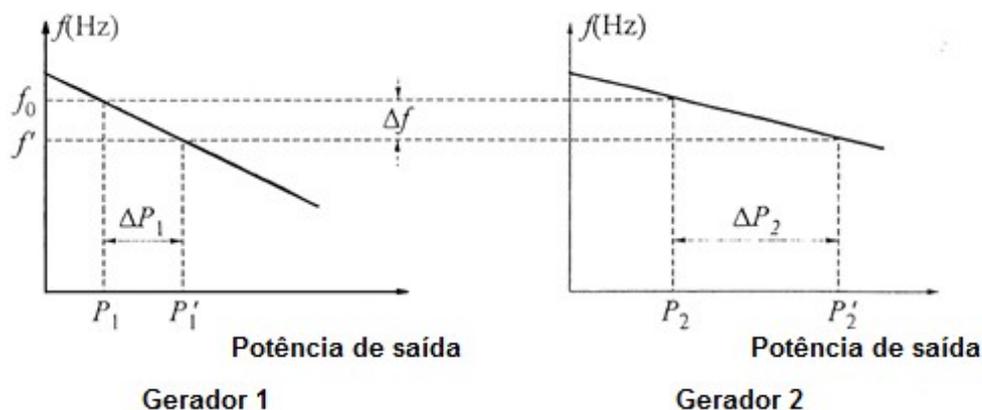
Fonte: própria autora (2017), adaptado de (KUNDUR, 1994).

O controle com *droop* também permite o compartilhamento de carga entre máquinas em paralelo. A parcela da carga assumida por cada gerador conectado em paralelo depende das características de *droop* de cada uma delas. Para uma

situação com duas máquinas como as representadas pelas curvas da Figura 67, o compartilhamento de cargas se daria pela seguinte relação:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{R_{P2}}{R_{P1}} \quad (110)$$

Figura 67–Compartilhamento de carga entre duas máquinas com controle *droop* de frequência



Fonte: Kundur (1994), traduzido pela autora.

Ocorrendo uma variação de carga ΔP_L em um sistema com n geradores com *droop* de velocidade, o sistema recuperará seu equilíbrio em um novo estado estacionário, com um pequeno desvio de frequência (Δf_{ss}) quando comparado ao estado anterior ao distúrbio. Este desvio de frequência pode ser calculado pela equação (111) (com D representando o amortecimento da carga) e está ilustrado na importante salientar que não é conveniente que a rede permaneça com desvios de frequência após a ocorrência de distúrbios. Desta forma, torna-se evidente a necessidade de se ter um segundo estágio de controle que haja no sentido de levar a frequência ao seu valor de referência. A este segundo estágio dá-se o nome de “Controle Secundário” (representado na Figura 69) (VIEIRA FILHO, 1984).

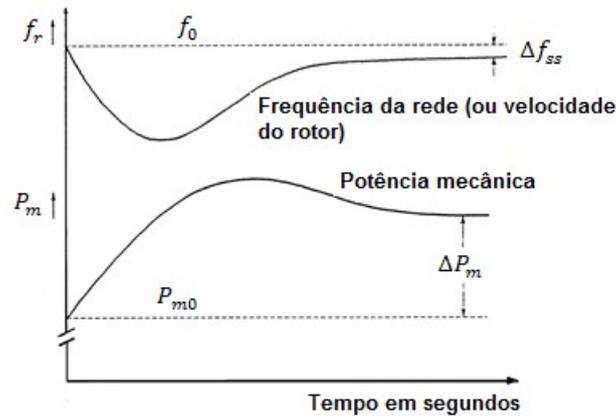
Figura 68.

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\left(\frac{1}{R_{P1}} + \frac{1}{R_{P2}} + \dots + \frac{1}{R_{Pn}}\right) + D} \quad (111)$$

importante salientar que não é conveniente que a rede permaneça com desvios de frequência após a ocorrência de distúrbios. Desta forma, torna-se evidente a necessidade de se ter um segundo estágio de controle que haja no sentido de levar a frequência ao seu valor de referência. A este segundo estágio dá-

se o nome de “Controle Secundário” (representado na Figura 69) (VIEIRA FILHO, 1984).

Figura 68—Resposta no tempo de uma máquina com regulação de velocidade com *droop*.



Fonte: adaptado pela autora de (KUNDUR, 1994).

D.1.1.3 Controle secundário

Como já comentado no início deste capítulo, o controle secundário possui uma ação mais lenta que o controle primário das máquinas e dele geralmente não participam todas as máquinas da área de controle, o que não seria econômico e nem necessário, de acordo com Vieira Filho (1984).

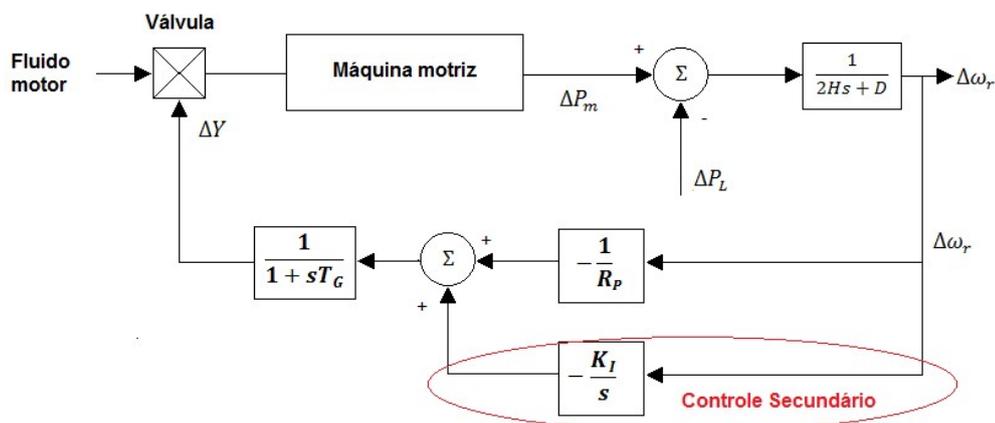
A atuação automática desta ação de controle complementar é feita pelo chamado Controle Automático de Geração (CAG), localizado em centros de operação, diferentemente do controle primário, que é localizado na própria usina. Os sinais de controle do CAG são transmitidos a geradores selecionados, com o uso de sistemas de comunicação.

Como o controle secundário é responsável por levar a frequência a seu valor de referência, ou seja, levar o erro de estado estacionário a zero, é natural se pensar em uma ação de controle integrativa para realizar esta ação. Sendo assim, para garantir que a frequência da rede retorne a seu valor inicial, deve ser inserida uma malha de controle com um integrador nas unidades participantes do controle secundário (VIEIRA FILHO, 1984), como representado na Figura 69.

Em sistemas interligados com mais de uma área de controle, o CAG também temo como objetivo manter o intercâmbio de potência entre áreas dentro de valores

programados, além de alocar a geração da forma mais econômica possível (o que também pode ser feito pelo controle terciário) (KUNDUR, 1994).

Figura 69–Esquema simplificado da inclusão da ação de controle secundária (geralmente centralizada) em um sistema de geração de energia



Fonte: própria autora (2017).

D.2 CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA

Assim como ocorre com a potência ativa, a potência reativa da rede também deve ser mantida em equilíbrio quando em estado estacionário, ou seja, a potência reativa produzida pelas máquinas síncronas e reatores deve ser igual à potência reativa consumida pelas cargas, somada às perdas reativas na rede. Desbalanços de potência reativa geralmente levam a desvios de tensão, já que as duas grandezas estão diretamente relacionadas, assim como frequência e potência ativa (ANDERSSON, 2008).

Em condições ideais de funcionamento, o fluxo de potência reativa na rede deve ser minimizado, de forma a maximizar o uso da capacidade das linhas de transmissão para o fluxo de potência ativa. Na prática, como a potência reativa não pode ser transmitida por longas distâncias ($X \gg R$ em um sistema de potência tradicional) e as oscilações de tensão acabam ocorrendo de forma localizada, o controle de tensão deve ser realizado de forma distribuída em vários pontos do sistema, não somente nas fontes de geração, ao contrário do que é feito no controle de frequência (KUNDUR, 1994). O controle de potência reativa é mais efetivo quanto mais próximo da carga reativa.

Antes de se abordar o controle de tensão e potência reativa é importante se conhecer as fontes deste tipo de potência, já que, como comentado, a compensação feita de forma local é mais efetiva.

Existem diversas fontes de geração e absorção de potência reativa em um sistema elétrico de potência, dentre elas pode-se destacar (KUNDUR, 1994):

- **Geradores síncronos:** podem tanto gerar quanto absorver reativos, a depender da excitação da máquina. Quando sobreexcitados, os geradores síncronos fornecem potência reativa e quando subexcitados, absorvem. A capacidade de absorver ou fornecer reativos está limitada pela corrente de campo e de armadura do gerador, e também por sua limitação térmica. O ajuste da excitação e, conseqüentemente, da tensão terminal dos geradores síncronos geralmente é feito por reguladores automáticos de tensão.
- **Linhas aéreas e subterrâneas:** quando operam abaixo de sua carga natural²³, produzem potência reativa e quando operam acima, absorvem;
- **Transformadores:** sempre absorvem reativos, independentemente de seu carregamento, devido aos efeitos de suas reatâncias;
- **Cargas:** geralmente absorvem potência reativa. Cargas com fator de potência indutivo muito baixo geralmente causam grandes problemas de queda de tensão. Por este motivo as concessionárias geralmente cobram pela potência reativa dos grandes consumidores, o que os incentiva a promover a compensação de reativos internamente a suas instalações;
- **Equipamentos de compensação de reativos:** geralmente são instalados em diversos pontos da rede para controlar a potência reativa de forma local. Alguns dos equipamentos que fazem compensação de reativos de forma passiva são capacitores e reatores shunt e capacitores série. De forma ativa atuam os condensadores síncronos e dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), tais como o SVC (*static var compensators*), STATCOM (*static synchronous compensator*), TSC (*thyristor switched capacitor*) e UPFC (*unified powerflow controller*) (HINGORANI; GYUGYI, 1999). Também são utilizados transformadores de *tap* variável para regular a tensão em locais específicos.

²³ Ocorre quando a potência reativa gerada pela capacitância da linha é igual à absorvida pela sua indutância, ou seja, sua impedância característica é, $Z_c = \sqrt{L/C}$. Nesta condição, os perfis de corrente e tensão são planos.

Como o foco deste trabalho é basicamente em geradores síncronos, a teoria de controle de tensão com equipamentos instalados ao longo de rede não será aprofundada. Na referência (KUNDUR, 1994) e em livros sobre qualidade de energia (HINGORANI; GYUGYI, 1999) é possível encontrar mais informações sobre estes equipamentos.

D.2.1 Controle automático de tensão

Os sistemas de excitação de geradores síncronos englobam ações de controle e proteção essenciais para o desempenho satisfatório da máquina (KUNDUR, 1994).

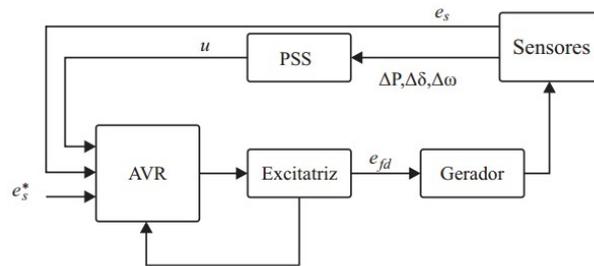
A função básica de um sistema de excitação é fornecer corrente para o campo do gerador síncrono e ajustá-la conforme a potência de saída do gerador varia (dentro de seus limites de capacidade operacional), de forma a manter a tensão terminal do equipamento o mais próximo possível de seu valor nominal. Além disso, o sistema de excitação deve ser capaz de responder a distúrbios transitórios enviando sinais à excitatriz consistentes com os limites (instantâneos e de curto prazo) do gerador síncrono e sem excedê-los, o que poderia provocar danos à máquina (KUNDUR, 1994),

Sob o ponto de vista do sistema, os sistemas de excitação dos geradores síncronos devem ser capazes de controlar de forma efetiva a tensão terminal do equipamento, respondendo de forma rápida aos distúrbios nas proximidades do ponto de conexão da máquina.

A Figura 70 representa um sistema de excitação de um gerador síncrono na forma de diagrama de blocos, onde ΔP , é a variação de potência, $\Delta\delta$ é a variação angular e $\Delta\omega$ a variação de velocidade do gerador.

Em estudos de estabilidade, um sistema de excitação é representado pela excitatriz, pelos sensores, PSS e AVR. Como já comentado, também existem diversos elementos de proteção atuando no sistema de excitação, que buscam garantir que os limites da excitatriz e do gerador não sejam ultrapassados. Estes elementos geralmente não são representados nos diagramas de blocos utilizados em estudos de estabilidade.

Figura 70 - Diagrama de blocos do sistema de controle da excitação de um gerador síncrono



Fonte: CAROLINO, 2013.

A excitatriz é a responsável por fornecer potência ao enrolamento de campo do gerador. Existem diversos tipos de excitatrizes no mercado, basicamente classificadas em três grandes categorias: corrente contínua, corrente alternada e que utilizam elementos estáticos. Na referência (KUNDUR, 1994) e na norma IEEE 421.1-2007: *IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*, que trata de definições para sistemas de excitação para máquinas síncronas, são fornecidos maiores detalhes dos vários tipos de sistemas de excitação normalmente utilizados em máquinas síncronas.

Os sensores são responsáveis por medir a tensão terminal, retificá-la para um valor CC e filtrá-la, para compará-la com um valor de referência para o sistema de controle (KUNDUR, 1994).

O PSS (do inglês *power system stabilizer*) é um estabilizador de sinais do sistema. Normalmente os PSSs podem utilizar sinais tais como o desvio de velocidade do rotor ou frequência, potência acelerante, ângulo de carga, etc (KUNDUR, 1994). Geralmente são utilizados em sistemas de grande porte.

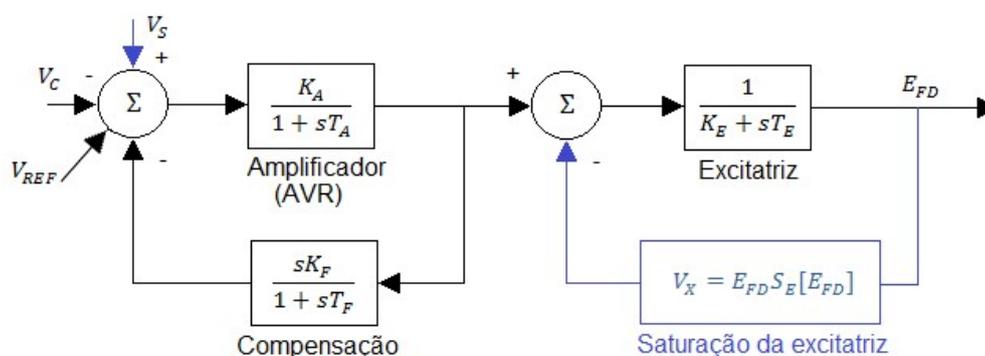
O regulador automático de tensão, ou AVR (do inglês *automatic voltage regulator*) representado na figura engloba os elementos de controle e de eletrônica de potência que levam o sinal de entrada para a excitatriz da máquina (GIBBARD; POURBEIK; VOWLES, 2015). Algumas de suas principais funções são: controlar a tensão do gerador para que fique dentro de limites pré-estabelecidos, regular a divisão de potência reativa de máquinas em paralelo, controlar a excitatriz para manter o gerador em sincronismo com o sistema em caso de distúrbios e amortecer oscilações que possam trazer problemas de estabilidade (CAROLINO, 2013).

Existem diversos modelos de reguladores automáticos de tensão, com características que dependem do tipo de sistema de excitação e do sistema de

potência a que o gerador está conectado. A norma IEEE 421.5 – *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies* (IEEE, 2006) apresenta vários modelos para serem utilizados em estudos de estabilidade de sistema, considerando-se diversos tipos de excitatrizes.

Na Figura 71 está ilustrado o diagrama de blocos de um sistema bastante utilizado em estudos, o AC5 da IEEE 421.5-2005, que representa um sistema simplificado sem escovas (*brushless machine*), cujo regulador é alimentado por uma fonte não afetada pelos distúrbios do sistema, como um ímã permanente.

Figura 71 - Sistema de excitação AC5A simplificado



Fonte: própria autora (2017), adaptado de IEEE (2006).

A tensão terminal de saída do transdutor, V_C , é comparada com uma referência, que representa o valor desejado da tensão terminal do transformador, V_{REF} . O erro resultante é então amplificado e enviado à excitatriz, que irá prover a tensão de campo e, posteriormente, a tensão terminal do gerador (IEEE, 2006). Neste mesmo ponto também pode ser considerado o sinal de tensão V_S , derivada do sistema PSS (estabilizador do sistema de potência), quando aplicável.

Este sistema de excitação proposto pelo IEEE também permite que seja considerada a saturação da excitatriz. A função $S_E[E_{FD}]$ é definida como um multiplicador da tensão de saída da excitatriz para representar o aumento dos requisitos de excitação devidos à saturação da excitatriz.

D.2.2 Droop de tensão

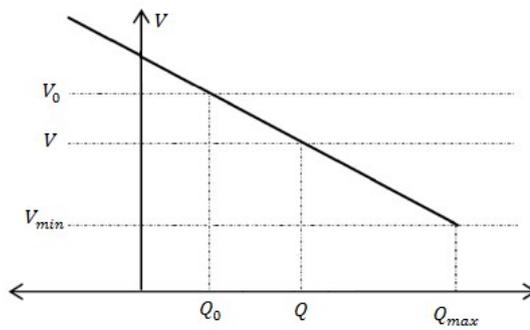
O *droop* de tensão é análogo ao de frequência, tratado no item 0, porém decorrente de um desbalanço de potência reativa, que resulta em um desvio local na

magnitude da tensão (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Está representado graficamente na Figura 72 e pela equação (112).

Como o *droop* de tensão não é muito usado em sistemas de potência de maior porte, onde as impedâncias são maiores e os fluxos de potência reativa, menores, não se encontram tantas referências técnicas em livros sobre esta técnica. Em artigos que tratam de controles em microrredes, no entanto, é mais comum se encontrar referência a *droop* de tensão.

$$V - V_0 = -R_Q(Q - Q_0) \tag{112}$$

Figura 72 - Característica ideal de um controlador com *droop* de tensão

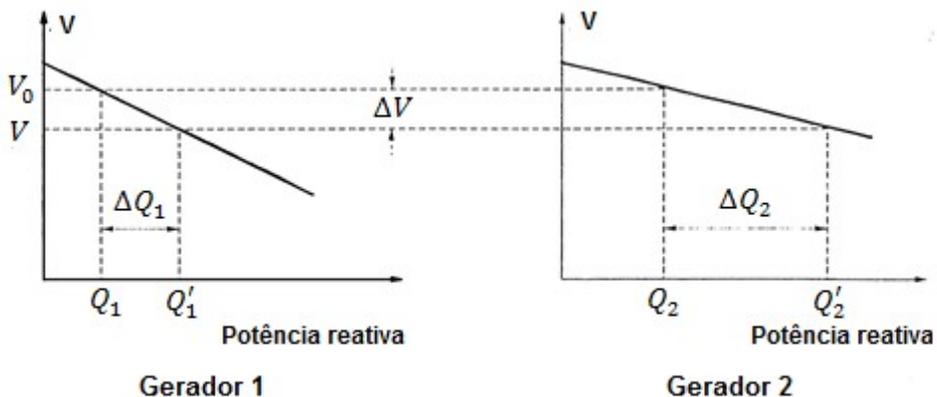


Fonte: Própria autora (2017)

Assim como no *droop* de frequência, a divisão de potência reativa entre geradores em paralelo está relacionada pelo coeficiente de cada uma das máquinas pela relação dada na equação (113), ilustrada na Figura 73:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} = \frac{R_{P2}}{R_{P1}} \tag{113}$$

Figura 73–Compartilhamento de carga entre duas máquinas com controle *droop* de tensão



Fonte: Própria autora (2017)

APÊNDICE E – DADOS TÉCNICOS DO MOTOGERADOR SÍNCRONO

E.1. DADOS GERAIS DO CONJUNTO

Potência nominal:	2.000 kVA	Eficiência (100% carga):	38,3%
Potência ativa:	1.600 kW	Consumo de combustível:	8910 Btu/kW-hr
Tensão de linha:	480 V	Momento de Inércia (J):	12,64 kg.m ²
Frequência:	60 Hz	Máx. sobrevelocidade:	125%
Velocidade Síncrona:	1200 rpm	Máx. <i>droop</i> :	5%

E.2. DADOS DO MOTOR

Combustível:	Gás	Nº cilindros:	20
Ciclo:	4 tempos	Combustão:	Interna

E.3. DADOS DO GERADOR SÍNCRONO

Excitação:	Imãs Permanentes	Eficiência 1 pu (1600 kW):	96,2%
Número de polos:	6	X/R:	0,63
Tipo de polo:	Salientes	Resistência de estator:	0,0019 Ω
Ajuste de tensão:	+/- 5,0%	Resistência de campo:	1,522 Ω
Fator de potência:	0,8		

Reatâncias		
Descrição	Valor em Ohm	Valor em pu
Subtransitória – eixo direto X''_d	0,0180	0,1563
Subtransitória – eixo em quadratura X''_q	0,0181	0,1571
Transitória – saturada X'_d	0,0288	0,2500
Síncrona – eixo direto X_d	0,2206	1,9149
Síncrona – eixo em quadratura X_q	0,1208	1,0486
Sequência negativa X_2	0,0181	0,1571
Sequência zero X_0	0,0062	0,0538

Constantes de tempo	
Descrição	Segundos
Transitória circuito aberto – eixo direto T'_{d0}	3,6300
Transitória curto-circuito – eixo direto T'_d	0,4741
Subtransitória circuito aberto – eixo direto T''_{d0}	0,0167
Subtransitória curto-circuito – eixo direto T''_d	0,0122
Subtransitória circuito aberto – eixo quadratura T''_{q0}	0,0113
Subtransitória curto-circuito – eixo quadratura T''_q	0,0091
Constante de tempo da excitatriz	0,1889
Curto-circuito na armadura	0,0459