



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DA BIOMASSA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM *SMART GRID*

**Gustavo Vieira de Souza Dias
Pablo Nunes da Costa**

Brasília, março de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Gustavo Vieira de Souza Dias – 08/30992

Pablo Nunes da Costa – 10/03526

ESTUDO DA GERAÇÃO DISTRÍBUIDA A PARTIR DA BIOMASSA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM SMART GRID

Projeto de conclusão de curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília para obtenção do diploma de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Mauro Moura Severino.

Brasília/2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DA BIOMASSA
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM SMART GRID**

Gustavo Vieira de Souza Dias – 08/30992

Pablo Nunes da Costa – 10/03526

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília para
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADO POR:

MAURO MOURA SEVERINO, Dr. ENE/UNB

(ORIENTADOR)

ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO, Dr. ENE/UNB

(EXAMINADOR INTERNO)

RAFAEL AMARAL SHAYANI, Dr. ENE/UNB

(EXAMINADOR INTERNO)

Brasília, 15 de Abril de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

DIAS, GUSTAVO VIEIRA DE SOUZA e COSTA, PABLO NUNES DA

Estudo de Geração Distribuída a Partir da Biomassa de Resíduos Sólidos Urbanos em Smart Grid [Distrito Federal] 2013.

xiii, 137p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2013).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Geração Distribuída

2. Biomassa

3. Resíduos Sólidos Urbanos

4. Smart Grid

I. ENE/FT/UnB

II. Engenheiro (2013)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DIAS, G. V. S. e COSTA, P. N. da (2013). Estudo de Geração Distribuída a Partir da Biomassa de Resíduos Sólidos Urbanos em Smart Grid. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação FT. Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Vieira de Souza Dias e Pablo Nunes da Costa

TÍTULO: Estudo de Geração Distribuída a Partir da Biomassa de Resíduos Sólidos Urbanos em Smart Grid.

Grau: Engenheiro

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gustavo Vieira de Souza Dias
SRES Quadra 12 Conj. "Q" Casa 44 –
Cruzeiro, 70645-175 – Brasília – DF – Brasil.
gustavo.vsd@gmail.com

Pablo Nunes da Costa
SHCES Quadra 1105 Bl. 'B' Apt. 402 –
Cruzeiro, 70658-152 Brasília – DF – Brasil.
pablonunesc@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nos proporcionar mais uma das diversas realizações em nossas vidas.

Aos nossos pais, pela dedicação, por estarem sempre ao nosso lado e pelo apoio constante durante todo o período de graduação.

Aos nossos amigos e familiares, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos de ausência.

Ao professor Mauro Moura Severino, pela orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos a gentil contribuição desde a base teórica à discussão dos resultados encontrados.

Ao professor Rafael Amaral Shayani, pela contribuição em diversos momentos durante a realização desses estudos.

Aos integrantes da banca examinadora, pelas ótimas contribuições e comentários para o enriquecimento do trabalho.

Aos docentes e servidores técnico-administrativos do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, por todo o conhecimento transmitido e o amparo dado durante o curso.

RESUMO

ESTUDO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DA BIOMASSA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM SMART GRID

Tendo em vista a necessidade de se buscar fontes alternativas para a geração de energia elétrica para suprir o aumento na demanda e o crescimento populacional e econômico do Brasil, torna-se cada vez mais importante realizar estudos que demonstrem como essa geração pode ser realizada e os seus impactos. Partindo desse ponto, esse trabalho explora as diversas rotas tecnológicas da geração a partir de resíduos sólidos e as maneiras de se inserir essa geração distribuída nas redes de distribuição já existentes, além de discorrer sobre as redes inteligentes (*smart grid*), suas vantagens e formas de atuação.

O desenvolvimento do trabalho foi realizado com simulações de inserção da geração proposta no sistema elétrico convencional, de forma a se obter relações que esclareçam como o sistema reage à penetração de geração distribuída e quais as configurações que favorecem o bom funcionamento da rede de distribuição. Para isso é utilizado um modelo de alimentador radial que permite inserir a geração distribuída de diversas formas nas unidades consumidoras e observar o fluxo de potência no sistema. É realizada ainda uma análise da atuação do *smart grid* em redes onde há geração distribuída de energia de forma que este possa realizar manobras que evitem o desligamento ou danos ao sistema.

Assim, a partir das simulações realizadas e dos resultados obtidos, verificou-se que a metodologia utilizada foi adequada, pois foi possível observar diversas configurações onde a geração distribuída a partir da biomassa de resíduos sólidos urbanos pode ser inserida na rede convencional de energia elétrica trazendo apenas benefícios para o consumidor e aliviando a carga da concessionária em horários de pico. A metodologia empregada na análise de redes em *smart grid* também possibilitou resultados que apontam para grandes vantagens na implementação desse sistema, aumentando a confiabilidade e a robustez do sistema de distribuição de energia elétrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Rotas tecnológicas para obtenção da energia da biomassa	11
Figura 2.2 Viabilidade econômica das tecnologias de conversão da biomassa	12
Figura 2.3 Classificação dos resíduos sólidos segundo a fonte geradora	14
Figura 2.4 Rotas tecnológicas para geração de energia a partir de resíduos sólidos	19
Figura 2.5 Sistema de extração e tratamento do biogás para produção de energia	22
Figura 2.6 Esquema representativo de dupla camada de combustão	25
Figura 2.7 Esquema representativo do processo utilizado na tecnologia Dranco	28
Figura 2.8 Processo de digestão anaeróbica.....	29
Figura 2.9 Esquema simplificado da tecnologia B.E.M.....	31
Figura 2.10 Representação de uma biorrefinaria utilizando a tecnologia B.E.M.....	33
Figura 2.11 Representação de uma residência com <i>smart grid</i>	47
Figura 3.1 Sistema representativo do alimentador de 40 barras.....	53
Figura 3.2 Alimentador com dimensões, cabos e numeração das barras.....	59
Figura 3.3 Potência dos transformadores e fator de potência das cargas.....	61
Figura 3.4 Grupo motor gerador utilizado para conversão de biogás em energia.....	72
Figura 3.5 Rotina para determinar a quantidade máxima de lixo.....	77
Figura 3.6 Legenda utilizada no fluxograma da Figura 3.5.....	78
Figura 3.7 Rotina para simular o impacto da GD na rede de distribuição.....	81
Figura 3.8 Legenda utilizada no fluxograma da Figura 3.7.....	82
Figura 3.9 Rotina para simular a atuação do <i>smart grid</i> para corte de carga.....	85
Figura 4.1 Simulação para determinar a quantidade máxima de lixo.....	92
Figura 4.2 Geração típica em uma a cada três unidades consumidoras.....	96
Figura 4.3 Geração típica em uma a cada seis unidades consumidoras.....	99
Figura 4.4 Geração típica apenas em uma unidade consumidora.....	100
Figura 4.5 Geração típica em uma a cada três unidades consumidoras.....	110
Figura 4.6 Alimentador com as alterações realizadas nos parâmetros.....	117
Figura 4.7 Alimentador em um sistema de distribuição de tensão secundária.....	122
Figura 4.8 Representação do controle de carga em residência.....	124

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Destinação final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil.....	17
Gráfico 3.1 Curva de carga típica para um dia útil.....	58
Gráfico 4.1 Correntes e tensões para todos os dias simulados.....	91
Gráfico 4.2 Corrente máxima no alimentador para cada dia.....	95
Gráfico 4.3 Comparação entre as correntes máximas das simulações 4.5 e 4.6.1.....	98
Gráfico 4.4 Comparação entre as correntes máximas para as três configurações.....	102
Gráfico 4.5 Relação entre a geração e a demanda para um dia útil.....	103
Gráfico 4.6 Potências resultantes para a geração no horário de pico.....	104
Gráfico 4.7 Demandas antes e depois do <i>smart grid</i> para o sábado.....	107
Gráfico 4.8 Percentual de corte de carga para o sábado.....	108
Gráfico 4.9 Demandas antes e depois da atuação do <i>smart grid</i> para o dia útil.....	113
Gráfico 4.10 Percentual de corte de carga para um dia útil.....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Rotas tecnológicas para conversão da biomassa em energia.....	12
Quadro 2.2 Composição gravimétrica do lixo coletado em 2011 no Brasil.....	15
Quadro 2.3 Geração média <i>per capita</i> de resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	18
Quadro 2.4 Composição química antes e depois da purificação do biogás.....	23
Quadro 2.5 Poder calorífico inferior de alguns resíduos sólidos urbanos.....	26
Quadro 2.6 Principais plantas de geração de energia com a tecnologia Dranco.....	30
Quadro 3.1 Características dos condutores do alimentador.....	54
Quadro 3.2 Parâmetros dos condutores elétricos com 1.089 mm entre as fases.....	54
Quadro 3.3 Bases do sistema em pu.....	55
Quadro 3.4 Parâmetros dos transformadores trifásicos – classe 15 kV e 60 Hz.....	56
Quadro 3.5 Impedância dos transformadores com as bases do alimentador.....	57
Quadro 3.6 Faixas aceitáveis para a variação da tensão.....	67
Quadro 3.7 Comparativo entre as tecnologias para conversão da biomassa.....	69
Quadro 3.8 Poder calorífico de diversos gases.....	70
Quadro 4.1 Descrição das simulações realizadas.....	88
Quadro 4.2 Simulação do sistema sem nenhuma geração distribuída – dia útil.....	89
Quadro 4.3 Simulação para determinar o valor máximo de geração.....	93
Quadro 4.4 Valores extremos alcançados de corrente e tensão.....	94
Quadro 4.5 Comparação entre correntes máximas para o domingo.....	97
Quadro 4.6 Comparação entre correntes máximas.....	101
Quadro 4.7 Simulação com carga 20% acima do padrão – limite que afeta o sistema.....	105
Quadro 4.8 Simulação com carga 50% acima do padrão.....	106
Quadro 4.9 Percentual da carga atendido pela geração a partir da biomassa – I.....	109
Quadro 4.10 Simulação com carga 10% acima do padrão – limite que afeta o sistema....	110
Quadro 4.11 Simulação com carga 50% acima do padrão – dia útil.....	111
Quadro 4.12 Simulação com carga 50% acima do padrão – sábado.....	112
Quadro 4.13 Simulação com carga 50% acima do padrão – domingo.....	112
Quadro 4.14 Percentual da carga atendido pela geração a partir da biomassa – II.....	115
Quadro 4.15 Simulação com sobrecarga no ramo principal – dia útil.....	118
Quadro 4.16 Simulação com sobrecarga no ramo principal – sábado.....	119
Quadro 4.17 Simulação com sobrecarga no ramo principal – domingo.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- AIE – Agência Internacional de Energia
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- AWG – *American Wire Gauge*
- BEM – Biomassa-Energia-Materiais
- CEB – Companhia Energética de Brasília
- CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa
- CEWEP – Confederation of European Waste-to-Energy Plants
- DRC – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
- DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente
- GD – Geração distribuída
- GDBM – Geração distribuída a partir da biomassa
- GDL – Gás do lixo
- GLP – Gás liquefeito de petróleo
- IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
- LTC – Conversão à Baixa Temperatura
- MMA – Ministério do Meio Ambiente
- MME – Ministério de Minas e Energia
- ONU – Organização das Nações Unidas
- PCI – Poder Calorífico Inferior
- PCS – Poder Calorífico Superior
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- SG – Smart Grid
- SIN – Sistema Interligado Nacional
- UnB – Universidade de Brasília
- USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	3
2	ESTADO-DA-ARTE EM GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA	4
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
2.2	BIOMASSA	5
2.2.1	Resíduos florestais	5
2.2.2	Resíduos agrícolas	7
2.2.3	Resíduos industriais	8
2.2.4	Resíduos urbanos.....	9
2.2.5	Rotas tecnológicas a partir da biomassa	10
2.3	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	13
2.3.1	Conceito de resíduo	13
2.3.2	Composição do lixo.....	15
2.3.3	Panorama dos resíduos sólidos no Brasil	16
2.3.4	Rotas tecnológicas a partir de resíduos sólidos urbanos.....	18
2.4	TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	21
2.4.1	Tecnologia de gás do lixo (GDL).....	21
2.4.2	Tecnologia de incineração controlada do lixo.....	24
2.4.3	Tecnologia Dranco.....	27
2.4.4	Tecnologia B.E.M.	30
2.5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	33
2.5.1	Aspectos gerais.....	33
2.5.1.1	Conceito de geração distribuída	34
2.5.1.2	Aspectos positivos e negativos da geração distribuída.....	35
2.5.1.3	Influência da geração distribuída no sistema elétrico.....	36
2.5.2	Aspectos políticos e regulatórios	39
2.5.2.1	Tarifa branca	40
2.5.2.2	Microgeração e minigeração distribuída	41
2.5.2.3	Sistemas de medição de energia elétrica	43
2.5.3	Smart grid	45
2.5.3.1	Conceitos básicos	45

2.5.3.2	Tipos de controle	46
2.5.3.3	Controle de carga	47
2.5.3.4	Medidor digital de energia	48
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	51
3.2	MATERIAIS.....	51
3.2.1	Características do alimentador de distribuição.....	51
3.2.1.1	Modelo do alimentador	51
3.2.1.1.1	Parâmetros elétricos dos condutores	53
3.2.1.1.2	Bases do sistema em pu.....	54
3.2.1.1.3	Parâmetros elétricos dos transformadores	55
3.2.1.2	Tipos de unidades consumidoras.....	57
3.2.1.3	Curvas de carga típicas.....	57
3.2.1.4	Ramos e ramificações.....	58
3.2.1.5	Hipóteses adotadas para o transformador.....	61
3.2.1.5.1	Alimentador trifásico e simétrico	61
3.2.1.5.2	Tipos de carga	62
3.2.1.5.3	Balanceamento das cargas.....	62
3.2.1.5.4	Resistência, reatância e distância entre fases	62
3.2.1.5.5	Demais hipóteses.....	63
3.2.2	Ferramenta computacional	64
3.2.2.1	MatPower	64
3.2.2.2	Dados de entrada do programa.....	65
3.2.2.3	Limites utilizados	66
3.3	METODOLOGIA	67
3.3.1	Determinação da geração a partir de RSU	67
3.3.1.1	Quantidade de lixo gerada.....	67
3.3.1.2	Produção de biogás a partir de RSU.....	68
3.3.1.3	Poder calorífico do biogás.....	70
3.3.1.4	Potência gerada a partir dos resíduos sólidos urbanos	71
3.3.2	Simulação da inserção de GD a partir de resíduos sólidos urbanos.....	75
3.3.2.1	Dados de saída do programa	75
3.3.2.2	Rotinas e algoritmo	76
3.3.2.2.1	Rotina 1 – Determinação da quantidade máxima de lixo.....	77

3.3.2.2.2	Rotina 2 – Impactos da geração distribuída	80
3.3.2.2.3	Rotina 3 – Atuação do <i>smart grid</i> para determinação das cargas desligadas....	84
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
4	RESULTADOS E ANÁLISE	87
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	87
4.2	APRESENTAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	87
4.3	SIMULAÇÃO DO SISTEMA SEM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	88
4.4	SIMULAÇÃO PARA DETERMINAR O MÁXIMO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	91
4.5	SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO TÍPICA EM TODAS AS UNIDADES CONSUMIDORAS.....	94
4.6	SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO TÍPICA APENAS EM ALGUMAS DAS UNIDADES CONSUMIDORAS.....	96
4.6.1	Geração típica apenas em uma em cada três unidades consumidoras	96
4.6.2	Geração típica apenas em uma em cada seis unidades consumidoras.....	98
4.6.3	Geração típica apenas em uma unidade consumidora.....	99
4.7	SIMULAÇÃO COM GERAÇÃO TÍPICA SOMENTE EM UM INTERVALO DE HORA DETERMINADO	102
4.8	SIMULAÇÃO COM A CARGA VARIANDO E GERAÇÃO EM TODAS AS UNIDADES CONSUMIDORAS.....	104
4.9	SIMULAÇÃO COM A CARGA VARIANDO E GERAÇÃO EM UMA A CADA TRÊS UNIDADES CONSUMIDORAS	109
4.10	SIMULAÇÃO COM CORTE NA ALIMENTAÇÃO DA SUBESTAÇÃO.....	115
4.11	SIMULAÇÃO COM SOBRECORRENTE NO RAMO PRINCIPAL E CORTE DE CARGA POR FATOR DE POTÊNCIA.....	115
4.12	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
5	CONCLUSÕES	125
5.1	ASPECTOS GERAIS	125
5.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	126
5.3	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	127
	REFERÊNCIAS	128
	ANEXO	133

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O crescimento econômico e populacional do Brasil na última década tem proporcionado um grande debate a respeito da matriz energética brasileira. Porém, a preocupação em aumentar a capacidade de geração é acompanhada pela necessidade da utilização de fontes renováveis para obtenção desta energia. Neste cenário, o Brasil se destaca como um dos maiores investidores em fontes renováveis. Segundo publicação do instituto americano Pew (Who is Winning the Clean Energy Race) o Brasil é o décimo país que mais investe em energia limpa, tendo direcionado oito milhões de dólares para desenvolvimentos na área em 2011.

O Brasil possui uma posição privilegiada em relação à quantidade de energia que é gerada a partir de fontes renováveis, já que a maior parte da sua energia vem de centrais hidrelétricas. De acordo com o Banco de Informações da Geração, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui atualmente 2.726 empreendimentos em operação, com 120.347.751 kW de potência instalada. Para os próximos anos há ainda a previsão de um aumento de 49.718.879 kW na capacidade de geração do país devido aos empreendimentos em construção e os empreendimentos já outorgados. Destes 2.726 empreendimentos em operação, 204 são usinas hidrelétricas com 79.237.664 kW de potência instalada, correspondendo a 65,84% da capacidade instalada no Brasil. (ANEEL, 2013).

Apesar de utilizar matéria prima renovável, as grandes usinas hidroelétricas tem como desvantagem o grande impacto ambiental e é por isso que o mundo vem a cada dia mais voltando seus investimentos para fontes alternativas de energia como a eólica, solar e biomassa. Em abril de 2012 a Organização das Nações Unidas (ONU) publicou o documento *Sustainable Energy for All* afirmando que para atender às aspirações globais de um futuro sustentável, os sistemas de energia em todo o mundo devem ser transformados. Para esta transformação, o documento determina três objetivos para serem alcançados até 2030: garantir acesso universal a serviços modernos de energia, dobrar a taxa global de melhoria em eficiência energética e dobrar a percentagem de energias renováveis na matriz energética global.

Apesar de o Brasil ter 89% de sua matriz elétrica proveniente de fontes renováveis, é muito pequena a porção da geração de energia que utiliza energia solar, eólica ou biomassa como fonte de geração. Dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2012) indicam que a apenas 6,6% da oferta de energia no Brasil utiliza a biomassa como fonte de geração. As outras fontes de energia tem ainda menos participação na matriz energética brasileira: 4,4% de gás natural, 2,7% de nuclear e 2,5% de derivados de petróleo, entre outros.

A biomassa é utilizada hoje no Brasil como a segunda maior fonte de geração de energia, ficando atrás somente da energia proveniente de hidrelétricas. Dados da ANEEL indicam que atualmente 446 usinas que utilizam biomassa estão em operação no Brasil, gerando um total de 9.814 MW. A grande maioria dessas usinas utiliza o bagaço da cana como matéria prima, totalizando 359 usinas. Por sua vez, apenas 19 usinas atualmente utilizam o biogás como fonte de energia.

O uso da biomassa na geração de eletricidade possui diversas rotas tecnológicas que envolvem a transformação da biomassa, por intermédio de processos termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos em um produto intermediário, que, por fim, é utilizado para geração de energia elétrica. Algumas dessas vias de tecnologia apresentam melhores quesitos de viabilidade técnica e econômica, tanto no momento presente, quanto em um momento futuro.

Sendo assim, este trabalho foi elaborado de forma a buscar aparatos teóricos e práticos que venham a atender a essa necessidade da expansão das fontes de geração de energia para matérias primas renováveis, para que a geração possa também atender uma necessidade global de cuidado com o meio ambiente. Dessa forma, esse trabalho aborda a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, como lixo e esgoto doméstico (lodo), materiais com uma carga energética que na maioria das vezes são descartados sem que haja o devido aproveitamento.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Esse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar a possibilidade de se aproveitar os resíduos sólidos urbanos como fonte de energia elétrica, bem como apresentar resultados e análises de quais impactos essa geração teria quando inserida na

rede convencional de distribuição de energia, além da análise da viabilidade tecnológica e das diversas rotas possíveis para a geração proposta. Tem-se ainda como objetivo estudar a operação de redes inteligentes (*smart grid*) em redes de distribuição com geração distribuída utilizando os resíduos sólidos como fonte.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Considerando o objetivo apresentado, esse trabalho foi estruturado em cinco capítulos que abordam todo o conteúdo. Este primeiro capítulo apresenta uma introdução ao trabalho, contemplando a motivação que levou à realização desse estudo, os objetivos que guiaram o seu desenvolvimento e a sua estruturação.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica do trabalho, onde são apresentados todos os conceitos envolvidos no tema aqui abordado. Esse capítulo trata da biomassa e das principais características dos resíduos sólidos urbanos (RSU), além de apresentar as tecnologias disponíveis para a geração de energia proposta. Além disso, o capítulo apresenta temas como a geração distribuída e as redes com *smart grid* e as tecnologias envolvidas.

O Capítulo 3 demonstra os materiais e métodos utilizados no trabalho para a análise da resposta da rede elétrica à geração distribuída. São apresentados as ferramentas computacionais, os modelos e procedimentos utilizados para atingir os objetivos propostos.

O Capítulo 4 descreve os resultados obtidos a partir dos materiais e métodos citados no capítulo anterior. São apresentadas nesse capítulo as análises dos resultados para diversas situações de forma a obter respostas para os questionamentos de como a rede elétrica de distribuição é afetada com a geração distribuída a partir de resíduos sólidos urbanos.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta o registro das conclusões do trabalho a partir da análise dos resultados obtidos e apresenta sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos.

2 ESTADO-DA-ARTE EM GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

A biomassa tem origem em resíduos sólidos — animais, vegetais, industriais e florestais — e, voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. Ela apresenta diferentes tecnologias para o processamento e transformação da energia, mas todas as tecnologias de biomassa atualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética de sua cadeia produtiva (CRUZ e NOGUEIRA, 2004).

A Agência Internacional de Energia (AIE) calcula que, em aproximadamente 20 anos, cerca de 30% do total da energia consumida pela humanidade será proveniente das fontes renováveis, que hoje representam 14% da energia produzida no mundo, em que a biomassa tem 11,4% na participação da oferta (CORTEZ et al., 2008). A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Os resíduos gerados em todo o mundo são recurso de grande potencial para a obtenção de energia apenas sob uma adequada exploração.

Os resíduos sólidos urbanos e industriais já estão sendo utilizados em alguns países devido a seu avanço tecnológico. Porém, ainda se encontram dificuldades para desenvolver uma análise relevante em âmbito mundial, haja vista que sua natureza compreende muitos materiais orgânicos e não-orgânicos e que a proporção da composição dos resíduos varia de acordo com o nível econômico e o desenvolvimento industrial de cada país e também com os diversos destinos desses resíduos.

Ao se falar de temas como fontes renováveis de energia, principalmente em pequena escala como é objeto de estudo desse trabalho, é propício pensar na utilização dessa fonte em uma rede energizada e dotada de total ou parcial controle. Dessa forma, com um conceito simplista tem-se a ideia de geração distribuída, a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Esse conceito envolve, ainda, equipamentos de medida, controle e comando que articulam a operação dos geradores e o eventual ligamento e desligamento de cargas para que estas se adaptem à oferta de energia.

Nesse capítulo, são introduzidos os tipos de fontes de biomassa disponíveis no Brasil, dando enfoque à geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, como lixo e esgoto doméstico (lodo), com o propósito de apresentar e analisar as tecnologias envolvidas e as maneiras de aplicação. Serão discutidas também as formas de se associar essa geração alternativa à rede elétrica por meio da geração distribuída, estudando os impactos que a geração distribuída a partir da biomassa pode gerar no sistema elétrico. Enfim, será apresentado o conceito de *smart grid* e as suas formas de atuação como controle de carga a fim de proporcionar mais confiabilidade à rede de distribuição de energia elétrica.

2.2 BIOMASSA

2.2.1 Resíduos florestais

A biomassa proveniente das florestas é no Brasil uma ótima saída para o debate a respeito da geração alternativa de energia, uma vez que a cobertura florestal no país é extensa e renovável. Com a grande quantidade de plantações florestais distribuídas no território brasileiro, o seu aproveitamento energético possibilitaria a redução de gastos com linhas de transmissão do local de geração até os consumidores finais (PRETO e MORTOZA, 2010).

Conforme indica o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) no documento “Florestas do Brasil em resumo” (SFB, 2010), o Brasil possui uma área territorial de 851 milhões de hectares, onde 60,7% dessa área é cobertura florestal, num total de 516 milhões de hectares de área florestal. De toda esta área florestal, 6,5 milhões de hectares são ocupados por plantações

florestais, compostas predominantemente por plantações de Eucalipto, com 4,9 milhões de ha, e de Pinus, com 1,6 milhões de ha (ABRAF, 2012).

A madeira hoje é utilizada no Brasil para inúmeras aplicações, como a construção civil e a indústria de papel, e em todo o processo desde a extração da madeira até produto final é gerado uma grande quantidade de resíduos (sobras de madeira, galhos, casca, copa, touça e raízes) que podem se tornar um problema ambiental se não manejados adequadamente para seu aproveitamento energético.

Outro exemplo de aproveitamento de resíduos da madeira é no processo Kraft¹ utilizado nas indústrias de papel e celulose. Neste processo é empregada uma solução de hidróxido de sódio – NaOH – e sulfito de sódio – Na₂SO₃ – o licor branco, para separar a celulose da matéria prima lenhosa, na etapa denominada digestão. Nesta operação mais da metade da madeira se solubiliza, saindo junto com os produtos químicos na forma de uma lixívia escura², o licor negro. Esse efluente, após ser concentrado, é queimado em uma caldeira de recuperação química, liberando calor e produzindo um fundido de sais inorgânicos, que misturado em água fornece o licor verde, que posteriormente é caustificado para transformar-se no licor branco novamente, fechando assim o ciclo (NOGUEIRA; WALTER, 1995).

De acordo com a publicação do Ministério do Meio Ambiente “Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos” (WIECHETECK, 2009), os resíduos florestais podem gerar energia a partir de quatro principais processos: combustão direta e incineração, gaseificação, briquetagem³ e pirólise⁴. Esse documento destaca ainda a possibilidade da utilização dos resíduos florestais em indústrias para suprir o seu próprio

¹ Processo químico realizado para transformar a madeira em polpa, que é a matéria prima do papel. Nesse processo é separado a lignina, a celulose e a hemicelulose que constituem a madeira.

² Na indústria papeleira, a lixívia negra é um fluido processual produzido na saída do digestor, um elemento que é responsável pela cozedura da madeira para retirar componentes indesejáveis ao processo de fabricação do papel, tais como lenhina, extrativos e cinzas.

³ Briquetagem é o nome dado ao processo de prensa de pequenos restos de madeira moída para moldar formas coerentes de maior tamanho.

⁴ Na Pirólise, a biomassa é exposta a altas temperaturas sem a presença de oxigênio, mirando acelerar a decomposição da mesma. O que sobra da decomposição é uma mistura de gases, líquidos (óleos vegetais) e sólidos (carvão vegetal).

consumo de energia, reduzindo assim os gastos e solucionando o problema ambiental de manejo dos resíduos gerados no processo de produção.

A geração de energia a partir da biomassa de resíduos florestais se torna ainda mais interessante no aspecto ambiental, uma vez que pode contribuir para a diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera. Além disso, o consumo de resíduos de madeira reduz a emissão do gás metano no processo, haja vista que, não ocorrendo à deposição da madeira em pilhas, evita-se a digestão anaeróbica e, conseqüente, a emissão de metano.

2.2.2 Resíduos agrícolas

O cenário agrícola no Brasil não poderia ser mais favorável para se pensar em aproveitamento energético dos resíduos gerados nos processos de produção agrícola no país. O ministro da agricultura, Mendes Ribeiro, afirmou em agosto de 2012 que o Brasil produziu safra recorde na história da agricultura, com 165,92 milhões de toneladas de grãos. Esse aumento na produção de grãos é devido principalmente a investimentos em tecnologia e aumentos na produtividade e na área plantada (PRETO e MORTOZA, 2010).

Assim como na produção a partir da biomassa florestal, o processo de produção agrícola também gera resíduos que são descartados sem o devido aproveitamento energético, causando impactos ambientais indesejáveis. Esses resíduos são divididos em resíduos agrícolas e resíduos agroindustriais. Os resíduos agrícolas são os oriundos da fase agrícola do cultivo de determinada espécie, ou seja, os resíduos produzidos no campo. Os resíduos agroindustriais, por sua vez, são resultantes do beneficiamento industrial da biomassa (OLIVEIRA, 2011).

Nesse contexto, o Brasil vem se destacando não somente como um grande produtor agrícola, mas também como um dos líderes da agricultura da energia. O Brasil é o país que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura de energia. A primeira vantagem que se destaca é a perspectiva de incorporação de áreas à agricultura de energia, sem competição com a agricultura de alimentos, e com impactos ambientais circunscritos ao socialmente aceito. O segundo aspecto a considerar é a possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário. Por situar-se, predominantemente, na faixa tropical e subtropical do planeta, o Brasil recebe intensa radiação solar ao longo do ano.

Em decorrência de sua extensão e localização geográfica, o Brasil apresenta diversidade de clima, exuberância de biodiversidade e detém um quarto das reservas superficiais de água doce (MMA, 2006).

Quando feita uma análise preliminar dos cultivos que podem ser utilizados para esse fim, devemos levar em conta que a viabilidade econômica pode ser mais facilmente alcançada quando se parte do princípio que a cultura deve ter um grande volume de safra e também uma alta geração de resíduos no processo de produção. A quantificação dos resíduos agrícolas é feita com base nos “índices de colheita”, que expressam a relação percentual entre a quantidade total de biomassa gerada por hectare plantado de uma determinada cultura e a quantidade de produto economicamente aproveitável. Além disso, esses resíduos são bastante procurados para produção de ração animal. Portanto, para fins de geração de energia elétrica, em sistemas de co-geração e possível produção de excedente, as culturas atualmente economicamente viáveis são a cana-de-açúcar, o arroz, o milho, a soja e o capim-elefante (PRETO e MORTOZA, 2010).

2.2.3 Resíduos industriais

Diversos tipos de resíduos industriais podem ser utilizados como formas de obtenção de energia, como rejeitos de criadouros, abatedouros, destilarias, fábricas de laticínios e indústrias de processamento de carnes. Esses resíduos são produzidos em baixa escala e em locais dispersos. Porém, mesmo considerando essa a pequena produção de biomassa anual, esses resíduos possuem uma carga energética que pode e deve ser utilizada para gerar energia elétrica. Assim, essa energia gerada será consumida pela própria indústria nos seus processos e, se possível, o excedente poderá ser comercializado.

Esses sistemas de cogeração distribuídos apresentam várias vantagens que tornam o aproveitamento desses resíduos interessante. Além de gerar energia elétrica para o próprio consumo, as indústrias se tornam menos dependentes da energia fornecida pela concessionária local e encontram soluções para aproveitamento dos resíduos produzidos em seus processos, diminuindo assim os investimentos e os impactos ambientais produzidos pelo descarte inadequado desses resíduos.

Entre as maneiras existentes para a utilização desses resíduos industriais como fonte de energia, tem-se a geração do biogás, que pode ser gerado em aterros sanitários ou

biodigestores. Esse biogás gerado, apesar de ser um dos subprodutos indesejáveis dos aterros e lixões e ser um dos mais potentes gases do efeito estufa, é um gás combustível de alto poder energético, devido à alta concentração do metano na sua constituição, podendo ser utilizado para obtenção de energia.

2.2.4 Resíduos urbanos

Atualmente grandes quantidades de resíduos são produzidas diariamente em pequenos e grandes centros urbanos. Esses resíduos muitas vezes não são adequadamente depositados em aterros sanitários ou controlados, sendo despejados em lixões, gerando problemas ambientais, sociais e econômicos. A Lei Nacional de Resíduos Sólidos⁵, sancionada em 2010, pelo presidente Luís Inácio Lula da Silva, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, fazendo distinção entre resíduo (lixo que pode ser reaproveitado) e rejeito (que não é passível de reaproveitamento). Essa lei determina ainda que sejam extintos do país todos os lixões existentes, substituindo-os por aterros sanitários onde ocorra o manejo adequado desses resíduos, dentre outras importâncias (BRASIL, 2010).

A coleta e o devido tratamento desses resíduos permitem a implementação da biomassa como fonte renovável de energia, tendo como matéria prima de geração os resíduos sólidos urbanos. A biomassa energética derivada de resíduos urbanos – sólidos ou líquidos – é composta pelos diferentes tipos de lixo gerado nos meios urbanos e pelos efluentes domésticos e comerciais captados pelas estações de tratamento de água e esgoto.

O resíduo sólido, vulgarmente chamado de lixo, é uma mistura heterogênea de plásticos, metais, vidros, madeiras, papéis e matéria orgânica. No Brasil, o lixo é comumente coletado por empresas contratadas para prestar tal serviço e são transportados até grandes áreas abertas para serem despejados, os chamados lixões (PRETO e MORTOZA, 2010). Esses resíduos são descartados nessas grandes áreas e, em determinados intervalos de tempo, são revolvidos e cobertos com camadas de terra. Porém, essas áreas muitas vezes recebem o lixo descartado por residências e comércio sem qualquer tipo de pré-seleção de materiais que poderiam ser reciclados. Esses resíduos, quando acumulados em área aberta durante algum tempo, se tornam um grave problema ambiental, trazendo mau cheiro,

⁵ Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências

doenças e dando origem a um líquido altamente tóxico, o chorume⁶. No Brasil, a coleta seletiva de lixo, criada com intuito de estimular a reciclagem de materiais como metais, vidros e plásticos, é pouco difundida, sendo utilizada efetivamente em poucas cidades.

Os resíduos urbanos sólidos e líquidos oriundos dos setores comerciais e residenciais poderiam, após serem recolhidos, passar por um sistema de gerenciamento e seleção que identificaria sua destinação em função de algumas características. Essa destinação poderia ser para a reciclagem, para a compostagem ou fabricação de adubos e fertilizantes, para descarte em aterros sanitários ou para a geração de energia elétrica.

Existem várias maneiras para se aproveitar a carga energética da biomassa proveniente de resíduos urbanos, dessas maneiras as que mais se destacam por serem mais viáveis tecnologicamente e economicamente são: a queima direta, a gaseificação e queima do biogás gerado em aterros (OLIVEIRA, 2000).

2.2.5 Rotas tecnológicas a partir da biomassa

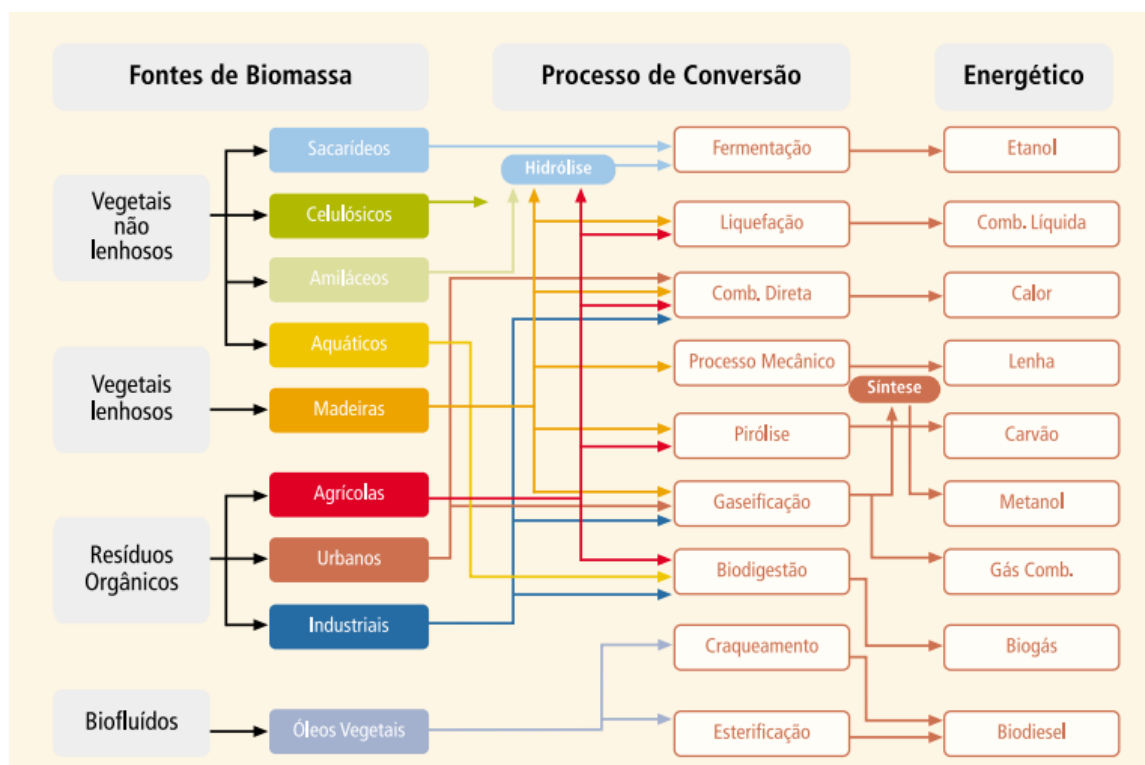
Até o momento foram apresentadas as diversas fontes de biomassa que podem ser utilizadas para a geração de energia elétrica. A partir deste ponto começa-se a discorrer sobre as tecnologias e rotas para se transformar a matéria com carga energética de forma a termos a energia elétrica como produto final.

A grande diversidade de fontes de biomassa reflete em um grande leque de possibilidades de processos químicos, físicos e biológicos para o processo de transformação da biomassa em energia elétrica. A Figura 2.1 ilustra as possibilidades de processos de conversão de energia para cada uma das fontes de biomassa apresentadas anteriormente.

Como ilustra a figura, são muitos os processos para obtenção da energia elétrica a partir da biomassa. Nesses processos é feita a conversão da matéria-prima em um produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz. Essa máquina produzirá a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica. De uma maneira geral, todas as rotas tecnológicas citadas também podem ser aplicadas em processos de cogeração –

⁶ Substância líquida resultante do processos biológicos, químicos e físicos de putrefação (apodrecimento) de resíduos orgânicos. O chorume é muito encontrado em lixões e aterros sanitários e possui aspecto viscoso e cheiro forte e desagradável.

produção de dois ou mais energéticos a partir de um único processo para geração de energia – tradicionalmente utilizados por setores industriais (ANEEL, 2008).



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª edição – Brasília: ANEEL, 2005.

Figura 2.1 Rotas tecnológicas para obtenção de energia da biomassa.

O Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2007) propõe ainda outra abordagem em relação às rotas tecnológicas para obtenção de energia a partir da biomassa, frisando que a conceituação de biomassa é bastante ampla e pode ser tratada de diversas formas. Assim, o Quadro 2.1 mostra uma apresentação alternativa das rotas tecnológicas a partir das fontes de biomassa e suas formas de produção.

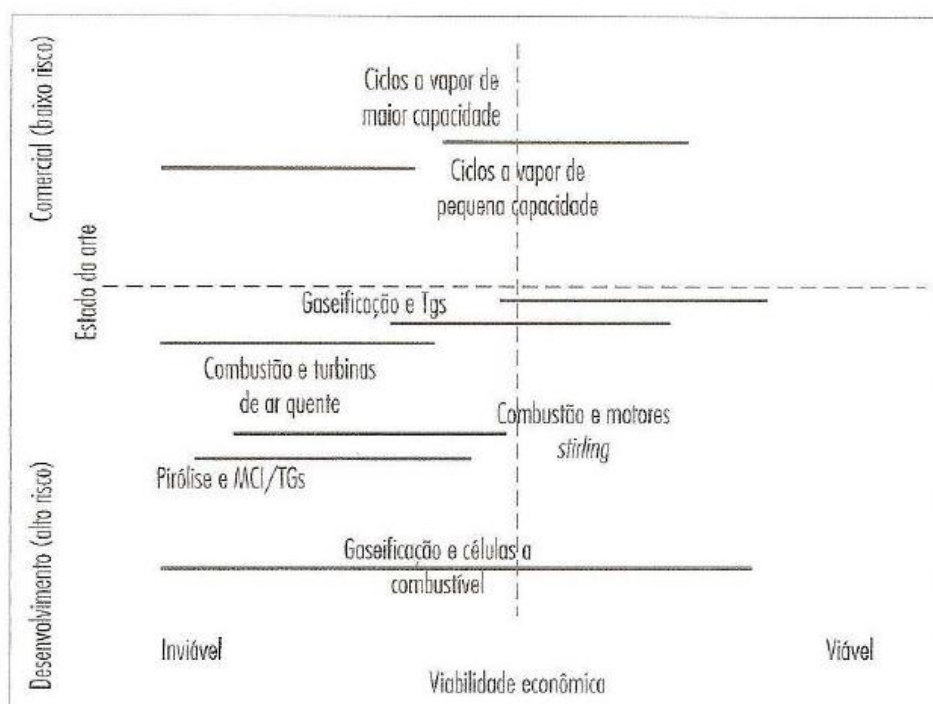
Pode-se observar pelo Quadro 2.1 que aos resíduos sólidos urbanos são atribuídas três rotas tecnológicas para se obter a energia elétrica: digestão, combustão e gaseificação. Esses processos são exatamente a base para as técnicas que serão discutidas nesse trabalho, que tem como ênfase a biomassa de resíduos urbanos. Assim, obtem-se no Quadro 2.1 e na Figura 2.1 duas classificações possíveis para as rotas tecnológicas a partir de biomassa que são complementares e corroboram a validade das técnicas estudadas.

Quadro 2.1 Rotas tecnológicas para conversão da biomassa em energia.

Fontes de biomassa	Rotas tecnológicas	Bioenergéticos	Serviço final
Produção agrícola e resíduos florestais	Densificação Esterificação	Peletes de madeira Briquetes Biodiesel	Calor Eletricidade Transporte
Cultura de energéticas: biomassa vegetal, madeira, óleos vegetais	Combustão, Gaseificação Pirólise, fermentação/ destilação	Carvão vegetal Gás combustível Bioóleo e Bioetanol	Calor Eletricidade Transporte
Resíduos de processamento da biomassa	Digestão Hidrólise	Biogás Bioetanol Solventes	Calor Eletricidade Transporte
Resíduos urbanos	Digestão Combustão e Gaseificação	Biogás Combustível residual	Calor Eletricidade

Fonte: HALL et al. 2005.

Entre todas essas formas, algumas são mais complexas e ainda não possuem tecnologia suficiente para tornar o processo economicamente viável, porém algumas rotas se destacam por apresentarem boas condições de utilização na atualidade ou por terem boas perspectivas de utilização no médio e longo prazo. A Figura 2.2, traz uma visão geral das condições de viabilidade econômica e estado da arte destas tecnologias feitas para o cenário europeu no final do século XX (CORTEZ et al., 2008).



Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *BIOMASSA para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

Figura 2.2 Viabilidade econômica das tecnologias de conversão da biomassa.

Esse trabalho tem como foco a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, fonte de biomassa que podem ser convertidos basicamente por quatro processos mais tecnologicamente e economicamente viáveis: tecnologia do gás do lixo (gaseificação), incineração controlada do lixo (combustão direta), tecnologia Dranco (biodigestor) e a tecnologia Biomassa-Energia-Materiais (B.E.M.). As quatro tecnologias citadas já se encontram em funcionamento em vários lugares nos Estados Unidos e na Europa, porém em território nacional, a tecnologia do gás do lixo é a que mais se destaca com sucesso em operação, como nos aterros que já se encontram em funcionamento nas cidades de São Paulo e de Caieiras, ambas no estado de São Paulo.

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.3.1 Conceito de resíduo

O termo resíduo engloba os diversos objetos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente (VOIGT et al., 1999) – diferentemente do significado usual de lixo como sujeira ou “aquilo que se varre para tornar limpa uma casa, rua, jardim, etc; varredura; imundice, sujeira; escória, ralé” (MICHAELIS, 1998).

Resíduos sólidos são definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas⁷ como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos na definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. Apesar de esta definição ser ampla, é oficial e será de base a este estudo (ABNT, 2004).

Apesar dessa definição formal, a reutilização de resíduos, que se pode efetivar de várias formas (reciclagem, recuperação do biogás, compostagem, reutilização direta), e vem

⁷ Norma Brasileira ABNT NBR 10.004, segunda edição, publicada em 31/5/2004 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas com o título “Resíduos sólidos – Classificação”.

sendo realizado há mais de 20 anos em diversos países, é importante quanto aos aspectos ambientais, sanitários, sociais, energéticos e econômicos, aproximando-se da visão de que resíduo pode significar matéria-prima fora do lugar ou dinheiro jogado fora (OLIVEIRA, 2004).

É importante distinguir o conceito de resíduos do conceito de rejeitos. Enquanto o primeiro se refere ao material resultante de processos que ainda pode ser aproveitado, os rejeitos são os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a origem, o tipo de resíduo, a composição química e a periculosidade. A Figura 2.3 ilustra um esquema de classificação dos resíduos segundo a fonte geradora, tendo em destaque os resíduos sólidos urbanos, objeto de estudo desse trabalho.

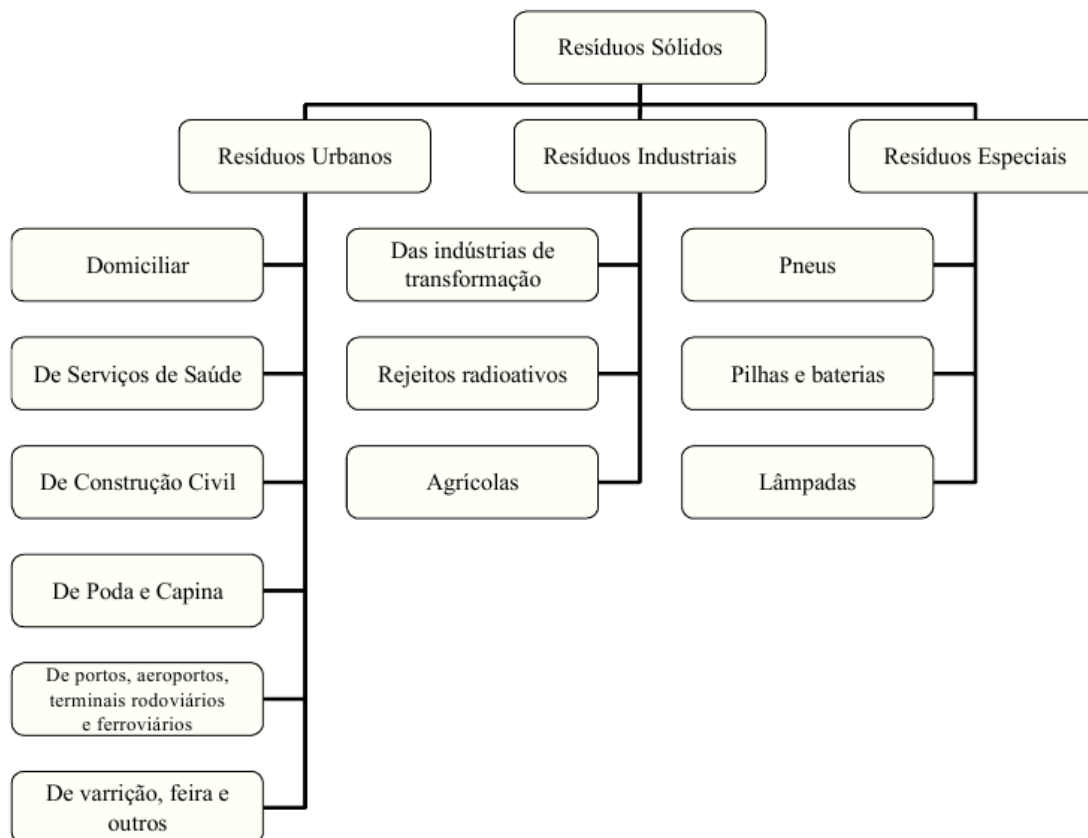


Figura 2.3 Classificação dos resíduos sólidos segundo a fonte geradora.

2.3.2 Composição do lixo

A composição típica dos resíduos sólidos urbanos considerados não especiais é de restos de alimentos, papéis, papelão, plásticos, borrachas, couro, isopor, embalagens metalizadas, fraldas descartáveis infantis e geriátricas, absorventes higiênicos, vidros, metais, entulhos, resíduos de jardins, tecidos, madeiras, pilhas, baterias, lâmpadas, eletroeletrônicos, materiais volumosos e outros (FEAM, 2012). Comumente esses materiais são classificados em dois grandes grupos: orgânicos e inorgânicos. O material orgânico é composto por produtos de origem animal e vegetal, como restos de alimentos, porém é importante ressaltar que nem todo material orgânico é biodegradável, ou seja, suscetível à decomposição por ação microbiana. O material inorgânico, por sua vez, é aquele que não tem origem biológica, como metais, vidro, borracha e plásticos. A composição dos resíduos que chegam ao aterro afeta a produção de gases de forma qualitativa e quantitativa. Quanto maior o percentual de materiais biodegradáveis, maior será a quantidade de substrato para os microrganismos responsáveis pela biodegradação do resíduo, aumentando a taxa de geração de gases (BORBA, 2006).

Segundo levantamento da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) a respeito do lixo coletado no Brasil no ano de 2011, o Quadro 2.2 indica a composição gravimétrica das 55.534.440 toneladas de lixo coletadas neste ano, de acordo com o tipo de material encontrado, refletindo assim uma média de participação de cada material no lixo típico no Brasil. Cabe ainda ressaltar que desses materiais coletados, 51,4% é matéria orgânica (com alto potencial energético), 31,9% corresponde ao lixo que pode ser reciclado se receber o devido tratamento e 16,7% são outros materiais.

Quadro 2.2 *Composição gravimétrica do lixo coletado em 2011 no Brasil.*

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria Orgânica	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251

Fonte: Pesquisa ABRELPE 2011 e Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais (Fevereiro/2012)

Uma relação bastante utilizada é a carbono/nitrogênio, que indica o grau de decomposição da matéria orgânica do lixo nos processos de tratamento e disposição final, encontrando-se, em geral, na ordem de 35/1 a 20/1, também para os resíduos domiciliares. O conhecimento dessas características biológicas, juntamente com as características químicas, propicia a seleção dos métodos de tratamento e disposição final mais adequado para cada tipo de resíduo produzido (IBAM, 2001).

2.3.3 Panorama dos resíduos sólidos no Brasil⁸

A gestão de resíduos sólidos é um problema que deve ser levado em consideração pelos gestores públicos em esfera municipal, estadual e federal. A destinação correta dos resíduos sólidos permite não só o aproveitamento energético e a geração de energia como também contribui para a reciclagem de materiais, aumenta as condições de saneamento básico e diminui a poluição e emissão de gases poluentes.

A geração de lixo no Brasil em 2011 teve um aumento percentual de 1,8% em relação ao ano anterior, ultrapassando, portanto, o aumento da população no mesmo período que foi de 0,9%. Esse cenário mostra que a produção de lixo *per capita* está aumentando e ao mesmo tempo esse lixo não está sendo direcionado de forma correta para o devido manejo dos resíduos.

Segundo levantamento da ABRELPE foi gerado no Brasil 61.936.368 toneladas de resíduos sólidos em 2011. Dessa quantidade de lixo, apenas 55.534.440 toneladas foram coletadas, assim, 6,4 milhões de toneladas de RSU deixaram de ser coletadas e, portanto, tiveram destino impróprio. Essa coleta dos RSU, porém, teve um aumento percentual de 2,5%, indicando uma ampliação na cobertura dos serviços de coleta de RSU no país, mesmo que ainda não seja suficiente para dar o devido fim para todo o lixo gerado. A geração per capita de lixo também reflete esse cenário indicando aumento de 0,8% na geração de resíduos sólidos e de 1,7% na coleta desses resíduos. Assim, cada habitante gerou em média 381,6 kg/habitante/ano e 84,6% desse lixo foi coletado.

Na região Centro Oeste esses números são ligeiramente maiores que a média nacional. A média de geração de lixo nessa região foi de 416,8 kg/habitante/ano. Essa quantidade

⁸ O item 2.3.3 tem como referência o “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011”, da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) publicado em 8 de maio de 2012.

aparece ainda maior quando analisamos a geração de lixo apenas no Distrito Federal, indicando a maior das taxas de geração de resíduos urbanos per capita. A geração de RSU no Distrito Federal ficou na média de 1,599 kg/habitante/dia, refletindo então em uma média de 583,6 kg/habitante/ano, superando em mais de 50% a média de produção de lixo em nível nacional.

Quanto à destinação final dos RSU, temos três maiores possíveis destinos no Brasil: os lixões, os aterros controlados e os aterros sanitários. Os lixões são os piores destinos para os RSU, pois são depósitos de lixo a céu aberto sem nenhuma preparação anterior do solo. Nos lixões não há sistema de tratamento de efluentes líquidos (chorume) e isto leva a uma contaminação do solo e do lençol freático. Os aterros controlados são intermediários entre os lixões e os aterros sanitários. Nos aterros controlados há contenção do lixo, que depois de depositado é coberto com uma camada de terra, diminuindo o impacto visual e o mau cheiro, porém ainda ocorre contaminação do solo e do lençol freático. Finalmente, os aterros sanitários seriam a destinação ideal dos RSU, pois se preocupam com a disposição do lixo, tratamento do solo, captação do chorume e outras medidas para amenizar os danos à saúde pública e ao meio ambiente. O Gráfico 2.1 indica a destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil nos anos de 2010 e 2011.



Fonte: Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. ABRELPE, 2012.

Gráfico 2.1 *Destinação final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil*

Observa-se pelo Gráfico 2.1 um aumento na quantidade de lixo que sofreu um tratamento adequado, porém este revela ainda que mais de 40% do lixo coletado no Brasil não tem tratamento adequado após a realização da coleta, o que reflete o mau aproveitamento dos resíduos, gerando ainda problemas ao meio ambiente e à população.

No Distrito Federal, 49,8% do lixo coletado durante o ano teve como destino final aterros controlados, 33,9% foram para aterros sanitários e 16,3% foram destinados aos lixões, indicando que muito ainda deve ser melhorado de forma que o lixo possa ser aproveitado da melhor forma, gerando energia e contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais.

Ainda em relação ao panorama do lixo no Brasil, o Quadro 2.3 ilustra a quantidade média de lixo que é gerado por pessoa em cada dia, de acordo com o tamanho da cidade em estudo. Assim, pode-se ver claramente que a produção de lixo no Distrito Federal não está acima somente da média brasileira como também está ligeiramente acima da geração *per capita* de cidades com o mesmo porte.

Quadro 2.3 *Geração média per capita de resíduos sólidos urbanos no Brasil.*

Tamanho da cidade	População urbana (hab.)	Geração per capita (kg/hab./dia)
Pequena	Até 30 mil	0,50
Média	30 mil a 500 mil	0,50 a 0,80
Grande	500 mil a 5 milhões	0,80 a 1,00
Megalópole	> 5 milhões	> 1,00

Fonte: Monteiro et al. (2001) apud CEMIG GT e FEAM (2010).

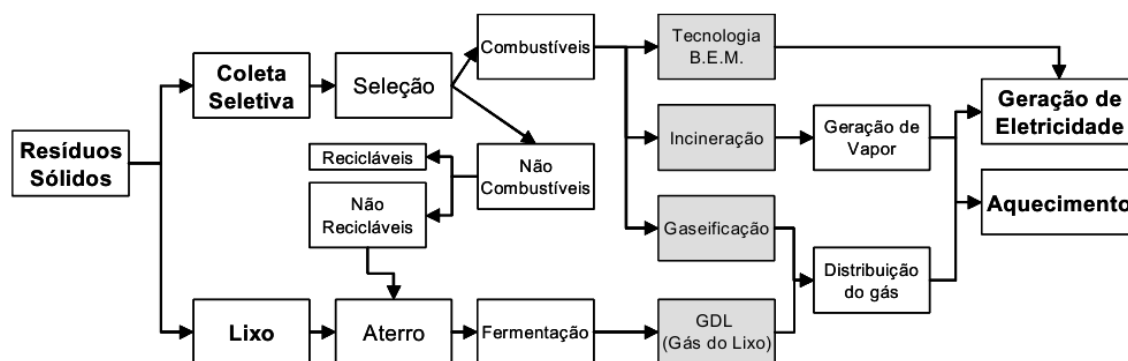
Com esse panorama atual dos resíduos sólidos no Brasil observa-se um grande potencial energético não utilizado devido às destinações inadequadas de grande parte do lixo coletado. Com o perfil de composição dos resíduos sólidos mostrado acima, temos uma grande porcentagem de matéria orgânica com alto poder calorífico⁹ que, através das rotas tecnológicas adequadas, pode ser aproveitada para geração de energia elétrica.

2.3.4 Rotas tecnológicas a partir de resíduos sólidos urbanos

Os resíduos sólidos urbanos são fontes inesgotáveis de energia, pois estão sendo gerados continuamente no cotidiano do ser humano na forma de lixo domiciliar, comercial e também no esgoto doméstico (lodo). Quanto maior for a cidade, maior será o seu potencial de geração de energia através destes resíduos, em virtude das suas características e da quantidade de lixo produzida por habitante. Existem vários métodos para geração de energia a partir de RSU, porém quatro deles destacam-se pelo maior avanço nas técnicas

⁹ Poder calorífico é a designação dada à quantidade de energia por unidade de massa liberada durante a oxidação de um determinado combustível.

de processamento e na viabilidade econômica: a utilização do gás do lixo (GDL), a incineração, a tecnologia Dranco e a tecnologia Biomassa-energia-materiais (B.E.M.). A Figura 2.4 mostra de uma forma simplificada as quatro principais rotas tecnológicas citadas para se obter energia a partir dos resíduos sólidos urbanos.



Fonte: SABIÁ, Rodolfo José; DUARTE, Paulo Henrique G.; MARTINS, Maria da Conceição Bezerra; ALVES JÚNIOR, Francisco Tarcísio. *Estudo da geração de energia a partir dos resíduos sólidos*, 2005.

Figura 2.4 Rotas tecnológicas para geração de energia a partir de resíduos sólidos.

O gás do lixo é um composto de vários gases originado da decomposição dos resíduos sólidos nos aterros sanitários. Provavelmente, este deve ser o método mais aplicado para a geração de energia nos dias atuais a partir do lixo urbano e do esgoto domiciliar. O GDL é um gás composto em percentual molar de 40 a 55% de metano, 35 a 50% de dióxido de carbono e de 0 a 20% de nitrogênio. O poder calorífico do GDL é de 14,9 a 20,5 MJ/m³, aproximadamente 5.800 kcal/m³. O método para a utilização do GDL consiste basicamente na distribuição, ao longo do aterro sanitário, de uma tubulação que realize a captação do gás, o qual será armazenado sob pressão, a fim de ser utilizado para a geração de energia. Esse sistema tem a vantagem de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e permitir a utilização para a geração de energia ou como combustível doméstico. Dentre as desvantagens da utilização do GDL, destacam-se a ineficiência no processo de recuperação do gás (50% do total de GDL produzido), a inviabilidade da utilização do metano para lugares remotos e o alto custo de *upgrade* das plantas (SABIÁ, 2005).

A incineração consiste no aproveitamento do poder calorífico do material combustível existente no lixo para a geração de vapor. Devido à grande variedade de materiais presentes no RSU, os remanescentes da queima são geralmente gases como CO₂, SO₂, N₂ e

vapor de água, além das cinzas e escórias de materiais ferrosos e inertes (PAVAN, 2010). Sendo o enfoque a geração de energia é aconselhável a utilização de materiais com maior poder calorífico como papel e plástico. Entre as vantagens deste sistema destacam-se o uso direto da energia térmica para a geração de vapor, o consumo contínuo de resíduos, a ausência relativa de ruídos no processo e a pequena área para instalação. As desvantagens são mais acentuadas: inviabilidade com resíduos clorados e de menor poder calorífico, sensibilidade em relação à umidade excessiva, necessidade de equipamento auxiliar para manter a combustão, possibilidade de concentração de metais tóxicos nas cinzas, emissão de dioxinas e furanos e altos custos de investimento, operação e manutenção. Com a incineração controlada dos resíduos urbanos é possível com 500 toneladas diárias, abastecer uma usina termelétrica com potência de 16 MW, o que representa um potencial energético de cerca 0,7 MWh/t (TOLMASQUIM, 2003).

A gaseificação (tecnologia Dranco) consiste na formação de gases mais simples (CH_4 , CO , CO_2 e H_2) a partir do fornecimento de calor, para a desintegração das cadeias poliméricas dos materiais existentes nos resíduos. A digestão anaeróbica é um processo de conversão de matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio livre, e ocorre em dois estágios: primeiro ocorre a conversão de orgânicos complexos em materiais como ácidos voláteis¹⁰ e depois a conversão destes ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos como o metano e o gás carbônico (CHERNICHARO, 1997).

De uma maneira geral, a digestão anaeróbica pode ser descrita em quatro estágios: pré-tratamento, digestão dos resíduos, recuperação do biogás e tratamento dos resíduos. A maioria dos sistemas requer pré-tratamento dos resíduos para se obter uma massa homogênea. Este pré-processamento envolve a separação ou triagem dos materiais não biodegradáveis seguido por uma trituração. A triagem tem por objetivo a remoção de materiais reaproveitáveis como vidros, metais ou plásticos e não desejáveis (o rejeito) como pedras, madeira, etc. (DE BAERE, 2003; BRABER, 1995).

A tecnologia BEM é uma tecnologia ainda não comercializada que vem sendo desenvolvida por um grupo de pesquisadores brasileiros e está em fase de construção de uma planta piloto, que irá operar no interior de São Paulo. Esta utiliza um processo de pré-

¹⁰ Ácidos voláteis são ácidos que possuem um baixo ponto de ebulição, apresentando portanto uma tendência à evaporação, como o ácido acético – CH_3COOH – e o ácido fluorídrico – HF .

hidrólise ácida que separa as frações seca e líquida do lixo, encaminhando aquela para um sistema de queimadores externos de turbinas a gás (ciclo Brayton¹¹), em virtude de sua granulometria¹², cujo calor pode ser recuperado por uma caldeira e atender, assim, a um ciclo combinado. A fração líquida pode originar furfural – C₅H₄O₂ –, insumo da indústria petroquímica, atualmente importado (OLIVEIRA, 2004).

No item seguinte serão abordadas as quatro principais tecnologias, destacadas na Figura 2.4, apontando as principais características tecnológicas e econômicas envolvidas em cada um dos processos de conversão da biomassa em energia elétrica.

2.4 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.4.1 Tecnologia de gás do lixo (GDL)

Um sistema padrão de coleta de GDL como utilizado atualmente consiste em três componentes centrais: poços de coleta e tubos condutores, um sistema de tratamento e um compressor. Além disto, em aterros sanitários com sistema de recuperação energética, existirá ainda um *flare* para queima do excesso de gás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos (OLIVEIRA, 2004).

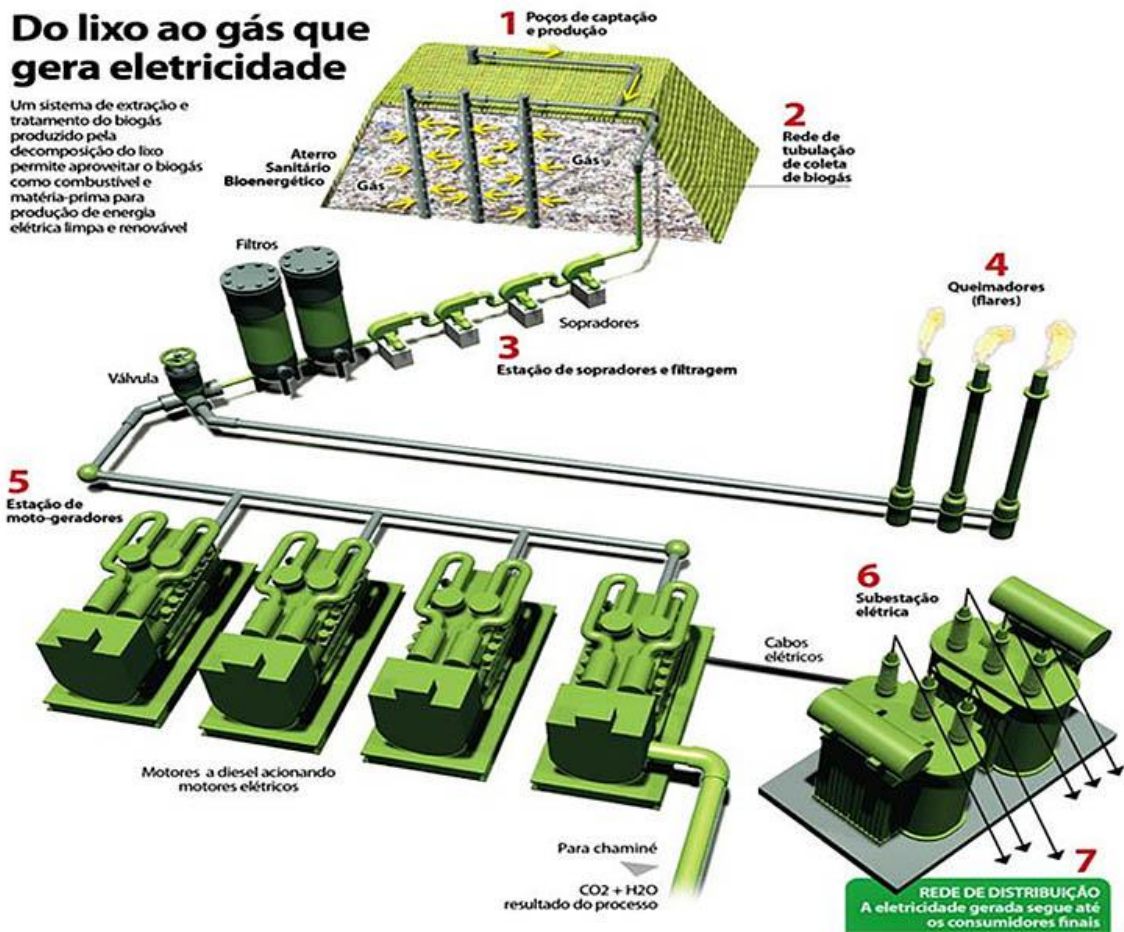
O processo de extração e utilização do gás metano é feito em passos: primeiramente, após os resíduos serem corretamente depositados nos aterros, começa a decomposição dos mesmos, que irá gerar o biogás. Após a coleta do biogás por dutos em contato com os resíduos, ele irá sofrer uma purificação, para a retirada de H₂ e CO₂ que estão presentes no biogás. A Figura 2.5 ilustra um esquema típico de um aterro com aproveitamento energético do biogás proveniente do lixo.

A coleta de gás normalmente começa após uma porção do aterro (chamada célula) ser fechada. Existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais e trincheiras

¹¹ Ciclo Brayton é um ciclo termodinâmico ideal no qual a adição de calor ocorre a pressão constante e reflete uma aproximação dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a gás.

¹² Granulometria é a caracterização, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, da percentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise.

horizontais, sendo que os poços verticais são o tipo mais usado de coleta. As trincheiras podem ser apropriadas para aterros sanitários profundos e podem ser usadas em áreas de aterro ativo. Independente do sistema de coleta usado, cada uma das pontas é conectada a uma tubulação lateral, que transporta o gás para um coletor principal. Preferencialmente, o sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás, quando necessário (OLIVEIRA, 2004).



Fonte: HAZTEC Tecnologia e Planejamento Ambiental. Disponível em <http://www.haztec.com.br/ambiental/images/stories/uge_sao_joao/do_lixo_ao_gas.jpg>. Acesso em 21 fevereiro 2013.

Figura 2.5 Sistema de extração e tratamento do biogás para produção de energia.

Depois de o GDL ser coletado e, antes de ser usado no processo de conversão de energia, é tratado para remover algum condensado que não foi coletado nos tanques de captura, assim como pequenas partículas e outras impurezas. As necessidades de tratamento dependem da aplicação de uso final. Um tratamento mínimo é requerido para o uso direto do gás em caldeiras, enquanto um extensivo tratamento é necessário para remover o CO₂ para injeção em um gasoduto. As aplicações de geração de energia incluem uma série de filtros para

remover impurezas, as quais podem danificar os componentes do motor ou turbina e, com isso, reduzir a eficiência do sistema (OLIVEIRA, 2004).

Na etapa de purificação, o biogás é captado e armazenado em filtros, onde fica retida toda a água que é condensada, passando assim por dois recipientes que contém peneiras, cada peneira é responsável pela retirada de algo, sendo a primeira responsável por retirar a umidade e a segunda pela retirada de H_2S , que já ocorre no segundo recipiente que contém o cavaco de ferro, responsável pela retirada de H_2S (PECORA, 2006). O Quadro 2.4 ilustra a composição química do biogás antes e depois do processo de purificação.

Quadro 2.4 *Composição química antes e depois da purificação do biogás.*

Compostos químicos	Antes da purificação	Depois da purificação
	%Vol ou ppm	%Vol ou ppm
O_2 – Oxigênio	1,23%	0,89%
N_2 – Nitrogênio	15,5%	13,2%
CO_2 – Dióxido de Carbono	4,75%	4,07%
CH_4 – Metano	75,8%	80,8%
H_2S – Sulfeto de Hidrogênio	649 ppm	< 1,0 ppm
H_2O – Água	2,62%	0,98%

Fonte: YAMASHITA, T. *Certificado de análise da composição do biogás – PUREFA*, 2004.

Ligada aos filtros se encontra uma válvula, que irá controlar a quantidade de gás que passa pelos dutos. Outro equipamento importante são os compressores, que têm além do papel de “puxar” o gás, a função de comprimi-lo antes que este passe para o sistema de recuperação energética. O gás segue então para os “flares” que são dispositivos que realizam a queima do gás, e são muito utilizados no início do processo, para queima do excesso de gás, ou para quando há manutenção do equipamento, potencializando a demanda energética. Os “flares” possuem filtros, assim após a queima do excesso de gás há uma omissão dos gases resultantes dessa queima (REIS, 2011).

O maior uso do GDL é como combustível para a geração de energia elétrica, com a venda da eletricidade para um consumidor próximo. A eficiência da geração elétrica isolada varia de 20 a 50% e com o uso da cogeração, obtêm-se eficiências mais altas pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração. Existem várias tecnologias para a geração de energia elétrica a partir do GDL: motores de combustão interna, turbinas de combustão e turbinas a gás com utilização do vapor (OLIVEIRA, 2004).

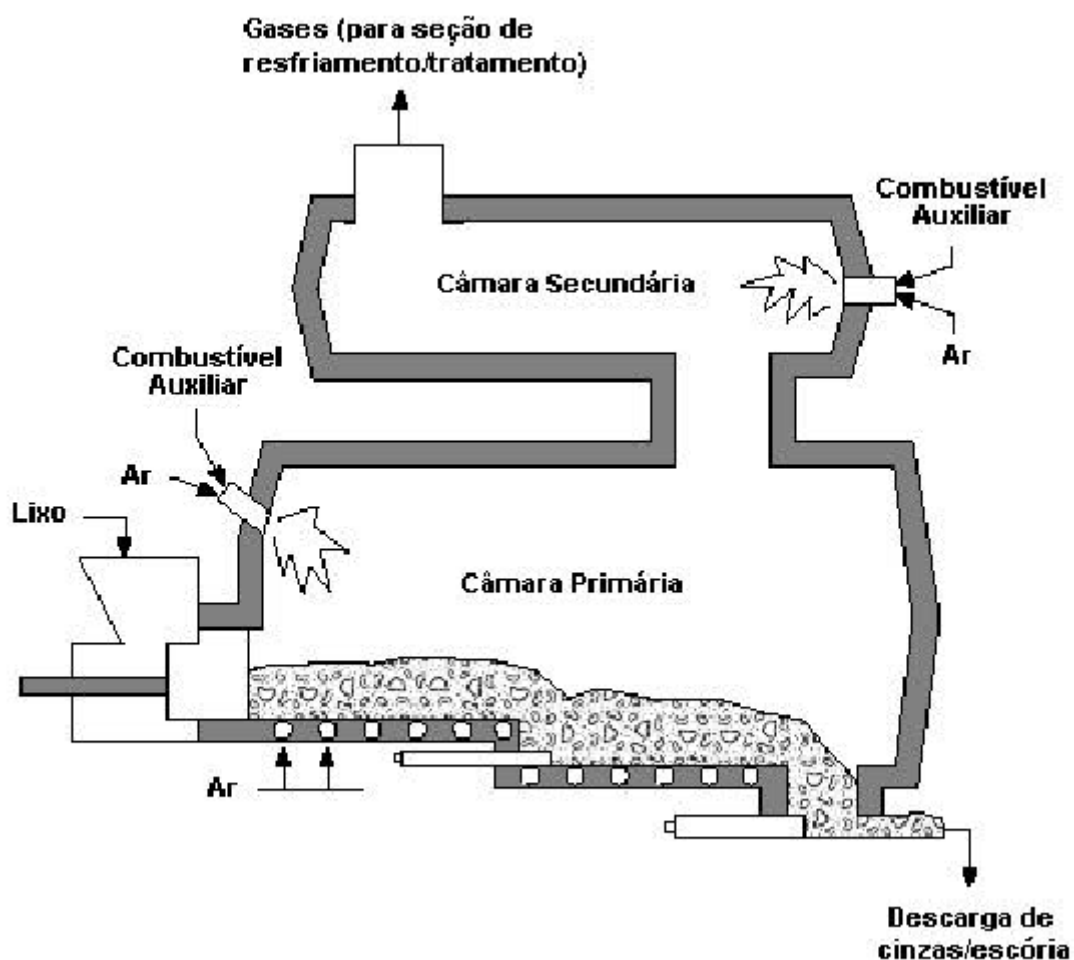
2.4.2 Tecnologia de incineração controlada do lixo

A tecnologia da incineração controlada do lixo se justifica entre uma das mais viáveis, pela existência de uma indústria consolidada, sobretudo no hemisfério norte, com sistemas de incineração de alta tecnologia e baixas emissões de poluentes, com larga utilização para tratamento do lixo doméstico, hospitalar e até mesmo do perigoso. Caracteriza-se pela recuperação dos gases de escape do processo, os quais normalmente atingem mais de 1.000 °C e são encaminhados para uma caldeira de recuperação de calor, onde é produzido vapor d'água para mover uma turbina (OLIVEIRA, 2004). De acordo com a *Confederation of European Waste-to-Energy Plants* (CEWEP), em 2007 já existiam na Europa mais de 400 unidades de geração de energia elétrica ou vapor para processo de aquecimento.

No Brasil, atualmente, o processo de incineração têm sido empregado prioritariamente no caso de resíduos de serviços de saúde e não dispõem de sistema de aproveitamento energético nesses processos. Como os projetos destes equipamentos geralmente são obsoletos e anteriores às atuais legislações ambientais, os sistemas de limpeza de gases existentes nessas instalações são muito elementares, restringindo-se a métodos primários de coleta de material particulado, sem capacidade de retenção de material particulado mais fino, gases ácidos e metais tóxicos (MENEZES et al., 2000).

Contrapondo a esses projetos obsoletos, tem-se hoje a concepção moderna de incineração de lixo como uma queima extremamente controlada que envolve tipicamente duas câmaras de combustão. A câmara primária é a receptora direta do lixo e sua temperatura de operação varia tipicamente entre 500 °C e 900 °C. Em todas as configurações, a alimentação de oxigênio nessa câmara é sub-estequiométrica, evitando-se assim gradientes elevados de temperatura. Nessas condições controladas, evita-se a volatilização de grandes quantidades de metais presentes no lixo, como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros. Além disso, minimiza-se a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais elevadas. Ao final da operação, a parte sólida é reduzida a cerca de 4 a 8 % do volume original e tem o aspecto de cinza, sendo um material totalmente esterilizado e apto para ser aterrado ou mesmo aplicado à construção civil. A fase gasosa gerada na câmara primária é então encaminhada para a câmara secundária. Nessa câmara, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura varia entre 1000 °C e 1250 °C, com isso, os diversos gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO₂ e

H₂O. Nessa temperatura, a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é praticamente zero. (OLIVEIRA, 2004). A Figura 2.6 mostra um esquema típico de sistema de incineração com dupla câmara de combustão.



Fonte: OLIVEIRA, Luciano Bastos. *Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil*. Rio de Janeiro, 2004.

Figura 2.6 Esquema representativo de dupla camada de combustão.

A composição dos RSU é um quesito de fundamental relevância quando se trata de incineração visando aproveitamento energético. Porém, essa composição é bastante variável e está atrelada ao nível de desenvolvimento do país. A determinação da composição e o conteúdo energético do resíduo a ser incinerado são necessários ainda para o dimensionamento correto da unidade de incineração e dos sistemas de limpeza de gases (PAVAN, 2010).

Vale dizer que os parâmetros de projeto e construção do forno tais como: material refratário, isolante térmico, interface refratário-aço, queimadores, sopradores e a sincronia entre as câmaras são pontos fundamentais para minimizar a quantidade necessária de combustível auxiliar injetado, muitas vezes utilizado somente para a partida do incinerador. Dependendo do poder calorífico do lixo é possível que nenhum combustível seja adicionado (OLIVEIRA, 2004).

No item 2.3.2 foi estudado a composição do lixo típico brasileiro com 51,4% de material orgânico, 13,1% de papel, 13,5% de plástico, 2,4% de vidro e 2,9% de metais. Interessa à incineração as frações de RSU que apresente elevado poder calorífico, como plásticos, papel, papelão e borrachas, conforme ilustrado no Quadro 2.5. Entretanto, os RSU no Brasil, possuem uma elevada fração de matéria orgânica a qual, devido à sua elevada umidade, apresenta baixo poder calorífico em relação a outros materiais. Essa composição pode resultar em resíduos misturados com carga térmica inferior à de projeto do forno de incineração, implicando no aumento do consumo de combustível auxiliar (FEAM, 2012).

Quadro 2.5 *Poder calorífico inferior de alguns resíduos sólidos urbanos.*

Resíduo sólido urbano	PCI (base seca)	Umidade	Cinzas	PCI (base úmida sem cinzas)
	kcal/kg	%	%	kcal/kg
Matéria orgânica	4.300	66	25	712
Papel e papelão	3.800	21	5	2.729
Têxteis e couro	4.200	36	10	1.921
Madeira	3.700	25	5	2.490
Plástico	10.300	17	3	8.193
Borracha	9.700	5	6	8.633

Fonte: CODESC, 2003 apud CEMIG GT e FEAM, 2011.

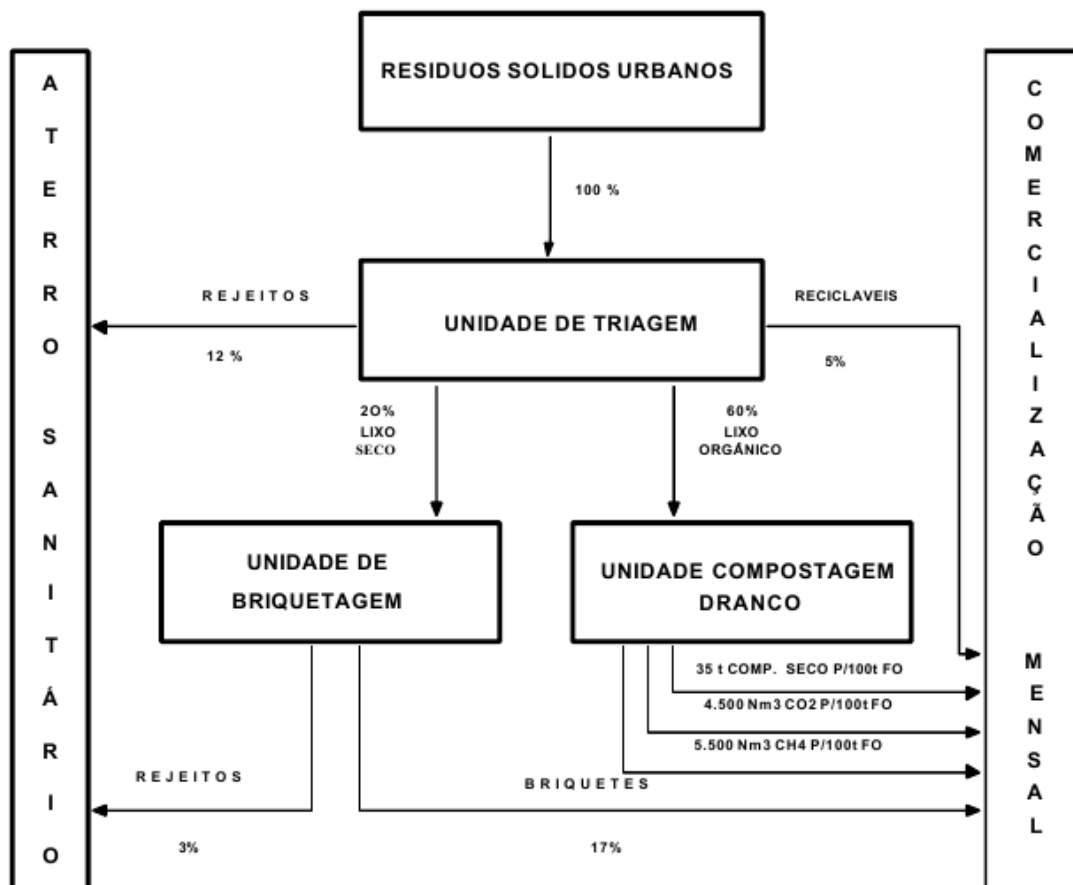
A análise da composição do lixo deve ser maior ainda segundo a CEWEP. A caracterização completa de um resíduo visando sua incineração englobaria os seguintes fatores: poder calorífico inferior (PCI), que indica a quantidade de energia útil que pode ser liberada durante a queima de resíduo; análise imediata, que determina os teores de água, cinzas e matéria volátil dos resíduos; análise elementar, que determina os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio; e teores de elementos tóxicos, pois a partir dos teores médios de elementos tóxicos presentes nos resíduos (mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, níquel, cloro, enxofre, etc) pode-se estimar o potencial de geração e de formação de

compostos tóxicos durante o processo de incineração e dimensionar adequadamente o sistema de limpeza de gases da unidade.

2.4.3 Tecnologia Dranco

A tecnologia Dranco, assim como a tecnologia do gás do lixo (GDL) também consiste na transformação da matéria orgânica em biogás. Porém, no caso da tecnologia Dranco, essa transformação ocorre com a compostagem acelerada de resíduos sólidos. O processo tem como insumo a matéria orgânica e como produto final obtém-se o biogás e o húmus, que pode ser utilizado como fertilizante orgânico na agricultura.

A diferença básica dos demais processos anaeróbios para o Dranco é que este trabalha com a fração orgânica em estado sólido (65% de umidade) e somente com fermentação termofílica (55 °C), enquanto os demais trabalham ambientes aquosos (95% de H₂O) necessitando de agitação interna e com fermentação criofílica e mesofílica (temperatura máxima de 37 °C). Estas fundamentais diferenças tornam os demais processos economicamente inviáveis, pelo grande investimento em reatores, necessidades de grandes áreas e de lagoas de tratamento de efluentes líquidos, além de necessitarem pasteurizar a massa pós-reator anaeróbio. Após o recolhimento do lixo, que é composto de cerca de 60% de matéria orgânica, é realizada uma separação e esta fração orgânica segue para um biodigestor com ausência de oxigênio, enquanto o restante (papéis, plásticos, vidros e metais) é encaminhado para outras formas de aproveitamento. Ocorre, então, a decomposição química que gera os seguintes produtos: adubo (húmus), metano (gás combustível) e CO₂ (dióxido de carbono). Da parte que foi separada anteriormente, os vidros, metais e cerâmicas seguem para a reciclagem, enquanto os plásticos, os papéis e papelão são transformados em briquetes. Este produto serve de combustível para fornos, complementando a geração elétrica dos restos alimentares, sem emanar odores e poluentes, já que sua combustão gera energia, CO₂ e H₂O. Devido à alta temperatura do processo, não há efluentes gasosos preocupantes. A Figura 2.7 apresenta o esquema simplificado do processo utilizado por esta tecnologia (OLIVEIRA, 2004).

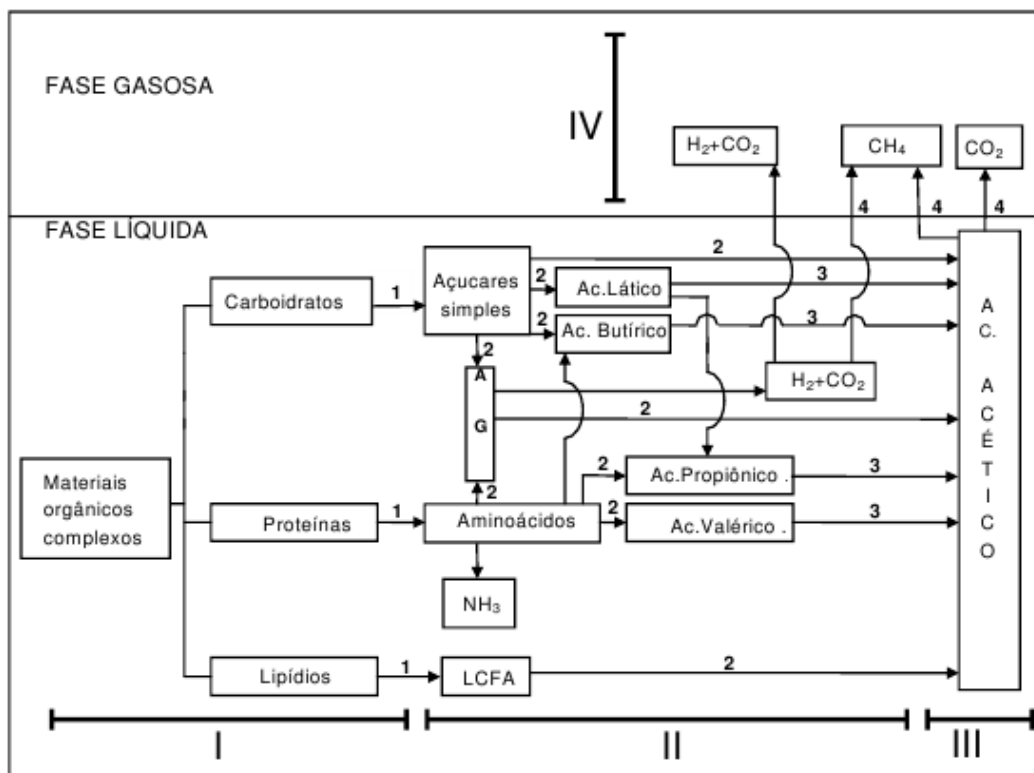


Fonte: OLIVEIRA, Luciano Bastos. *Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil*. Rio de Janeiro, 2004.

Figura 2.7 Esquema representativo do processo utilizado na tecnologia Dranco.

A unidade de triagem ilustrada na Figura 2.7 é responsável pela seleção manual do lixo, assim, a parte orgânica segue por um triturador e depois para uma peneira. Após ter sido peneirado vai para a unidade de dosagem. Em seguida, é acrescido vapor e bombeado para dentro do digestor. Passada esta fase do processo a mistura segue até a prensa desaguadora, onde a parte líquida é separada e é encaminhada para a unidade de tratamento de resíduos líquidos. A parte sólida vai para a maturação aeróbica e depois de peneirada segue para a comercialização como composto orgânico (húmus). A fase gasosa deste processo é o biogás que, além de estocado, pode ser usado para alimentar a caldeira, podendo ainda gerar energia em termelétricas e, depois de tratado (tendo como resultado abatimento de CO_2 , H_2S e vapor), pode ser utilizado como combustível em veículos automotores. Assim como na tecnologia do gás do lixo, utilizada em aterros, a queima dos excessos de gás na tecnologia Dranco também é feita no flare (OLIVEIRA, 2004).

O processo Dranco é, portanto, um sistema de digestão anaeróbica com estágio único e alto teor de sólidos (seco), podendo tratar os mais diferentes tipos de resíduos. A alimentação é feita continuamente pelo topo da câmara onde ocorre a reação e o material digerido é retirado pelo fundo, também continuamente. Além disso, contém também um sistema de retirada do excesso de água e compostagem final por um período de duas semanas. O processo de mistura ocorre pela descida por gravidade da massa de resíduos e pela recirculação de massa sólida. A Figura 2.8 ilustra as fases gasosa e líquida dessa digestão anaeróbica, indicando os quatro processos químicos que realizam as reações de biodigestão anaeróbica: hidrólise (I), acidogênese (II), acetogênese (III) e metanogênese (IV). A produção de biogás é da ordem de 100 a 200 m³ por tonelada de resíduo e pode ser utilizado como calor e eletricidade, podendo então gerar energia para a própria planta de produção ou para comércio (REICHERT, 2005).



Fonte: BALMANT, Wellington. *Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica*. Curitiba, 2009.

Figura 2.8 Processo de digestão anaeróbica.

Nos últimos 15 anos o estudo da digestão anaeróbica de RSU (tecnologia Dranco) foi retomada com mais intensidade, com grande número de plantas piloto e em escala sendo implantadas, principalmente na Europa. Neste continente, o grande crescimento na

utilização da digestão anaeróbica verificado nos recentes anos deve-se basicamente a dois fatores: os altos preços de energia e às restrições ambientais, especialmente ao controle e não permissão de matéria orgânica em aterros sanitários bem como as dificuldades para a implantação de novos aterros ou a expansão dos existentes. Na Suécia, 7% da energia para aquecimento e geração de energia vem dos resíduos sólidos (SÖDERMAN, 2003).

Mesmo sendo uma tecnologia já testada amplamente no mundo, a empresa NTA, representante desta tecnologia no Brasil, encontrou dificuldades para difundi-la em âmbito nacional. Essa tecnologia está implementada em duas cidades do Rio Grande do Sul (Farroupilha e Caxias do Sul), mas há negociações em andamento para que haja uma ampliação da sua aplicação. Os grandes entraves encontrados são, em sua maior parte, devidos à falta de informação o que leva aos tomadores de decisão nos municípios não entrarem em acordo sobre qual opção tecnológica deve ser utilizada. Nos municípios até agora beneficiados há um apoio quase unânime da população, visto a melhor gestão atribuída aos resíduos (OLIVEIRA, 2004). O Quadro 2.6 traz as principais plantas de geração de energia a partir de resíduos sólidos utilizando a tecnologia Dranco.

Quadro 2.6 *Principais plantas de geração de energia com a tecnologia Dranco.*

Planta/Local	Ano de início	Tipo de resíduo	Capacidade (t/ano)
Brecht, Bélgica	1992	RSU + papel	12.000
Salzburg, Áustria	1993	RSU + lodo de esgoto	13.500
Kaiserslautern, Alemanha	1998	Resíduos orgânicos	20.000
Brecht, Bélgica	1998	Resíduos orgânicos	35.000

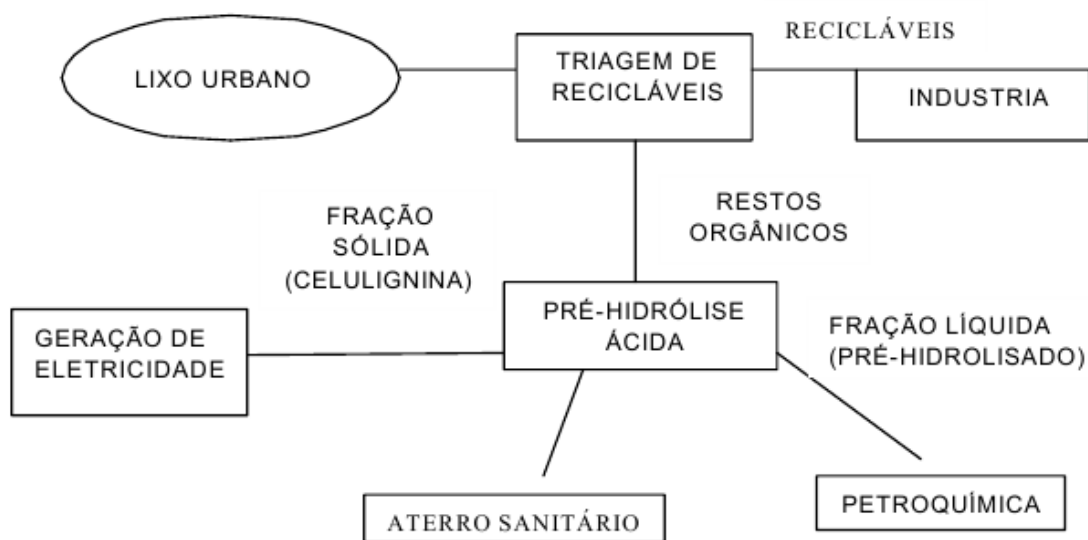
Fonte: REICHERT, Geraldo Antônio. *Aplicação da digestão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos: uma revisão*, 2005.

2.4.4 Tecnologia B.E.M.¹³

A sigla BEM significa Biomassa-Energia-Materiais e refere-se a uma tecnologia que está sendo desenvolvida desde o final da década de 80 por um grupo de trabalho no interior de São Paulo, liderado pelo professor Daltro Pinatti e pelo Grupo Peixoto de Castro. Os detentores da patente desta tecnologia são o Grupo Peixoto de Castro e o Professor Pinatti (PINATTI, 1996).

¹³ O item 2.4.4 tem como referência a tese de doutorado “Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil”. OLIVEIRA, L. B., Rio de Janeiro, 2004.

O Programa BEM tem por objetivo desenvolver as tecnologias dos materiais lignocelulósicos (madeira, bagaço de cana, capim, resíduos agrícolas, parte orgânica do lixo, etc.) e de digestão material (monazita, zirconita, etc.). Isto tem sido feito através de reatores de aço carbono revestidos com metais refratários e, neste programa, as biomassas são transformadas em duas commodities: a celulignina utilizada como combustível, ração animal e madeira sintética, entre outros produtos e o pré-hidrolisado (solução de açúcares) usado em produtos químicos tais como furfural, álcool, xilitol – $C_5H_{12}O_5$. A Figura 2.9 ilustra de forma simplificada como funciona o processo desde a coleta do lixo urbano até a obtenção dos produtos finais.



Fonte: OLIVEIRA, Luciano Bastos. *Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil*. Rio de Janeiro, 2004.

Figura 2.9 Esquema simplificado da tecnologia B.E.M.

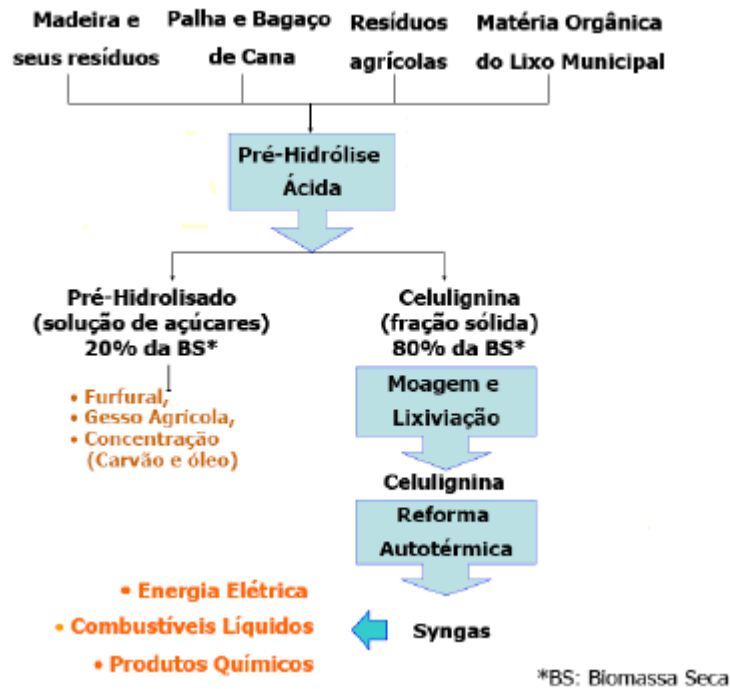
Nesta tecnologia, a biomassa presente nos resíduos sólidos é picada e compactada no silo. Uma rosca helicoidal comprime a biomassa dentro de um reator piloto (com cerca de 1 m³) e tem-se como produtos fundamentais desta reação uma parte hidrolisada sólida (a celulignina) e uma parte líquida pré-hidrolisada (solução de açúcares que foi digerida no processo).

O processo de fabricação da celulignina a partir de resíduos sólidos inicia-se com o enchimento do reator através de um alimentador helicoidal que compacta a biomassa até a

densidade de 300 kg/m³. Adiciona-se então ácido sulfúrico residual industrial diluído e então é feito um aquecimento direto, o reator fica girando para que a mistura aqueça de forma homogênea e melhore o processo. A reação dura cerca de 30 minutos, mas caso o reator for estático essa duração pode durar a 3 horas. Durante a operação o reator apresenta um movimento rotativo para a esquerda e para a direita num ângulo de 150° com frequência de 20 segundos. Tal oscilação afeta a cinética do processo de pré-hidrólise provocando a substituição das camadas de solução saturada de açúcar, diminuindo o tempo de hidrólise e aumentando o teor de açúcares (xilose e glicose) na solução de água (pré-hidrolisado). Nesse processo de produção da celulignina, o consumo de energia equivale a 6,3% da energia contida na celulignina produzida, indicando um valor 5 vezes menor do que os valores obtidos pelos reatores clássicos utilizados em processos de hidrólise ácida de biomassa.

Há duas características importantes em relação à celulignina. Uma delas é que há uma diminuição nos níveis de potássio e sódio em relação ao material original para a celulignina. Desta forma ela passa a ser um combustível possível de ser queimado em turbinas a gás de ciclo combinado. O outro aspecto é que o processo gera uma porosidade na parede celular do produto, pois o ácido penetra na parede celular e há uma ruptura das n-celuloses constituintes, gerando um gás que desencadeia um processo de erupção na parede celular e deixa o material todo poroso, facilitando, em muito, a difusão gasosa no processo de combustão. A celulignina sai do reator úmida, passa por um secador e é moída. Sua queima ocorre como se fosse gás, pois ela é pulverizada no combustor.

O pre-hidrolisado, outro produto da reação da fabricação de celulignina, segue para um segundo reator onde é aquecida a 220 °C e torna-se furfural. O furfural possui inúmeras aplicações, dentre elas o PHF, uma mistura combustível utilizada já na Califórnia por se tratar de um combustível limpo, composto por 20% de furfural, 50% de álcool e o restante de gasolina. O furfural segue para uma tancagem e depois de aquecido é feita uma destilação. O vinhoto da planta é transferido para unidade de tratamento de água onde é retirado o lodo. Este lodo depois de seco é tratado por um processo de conversão à baixa temperatura (LTC) que gera carvão e óleo que podem ser queimados. O processo leva de 2 a 2 horas e meia. A Figura 2.10 apresenta um esquema de uma biorrefinaria que utiliza a tecnologia B.E.M. para geração de energia elétrica.



Fonte: ROMÃO, Érica L. et al. *PROBEM: Programa biomassa-energia-materiais. Refinaria de biomassa*, 2011.

Figura 2.10 Representação de uma biorrefinaria utilizando a tecnologia B.E.M.

Cabe ressaltar que, para resíduos sólidos urbanos, a tecnologia B.E.M. está em fase de desenvolvimento, de forma que se alcancem os avanços tecnológicos significativos que viabilizariam a implantação em escala comercial.

2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.5.1 Aspectos gerais

A geração elétrica descentralizada, perto do consumidor, chegou a ser a regra na primeira metade do século, quando a energia industrial era praticamente toda gerada localmente. A partir da década de 40, no entanto, a geração em centrais de grande porte ficou mais barata, reduzindo o interesse dos consumidores pela geração distribuída e, como consequência, o desenvolvimento tecnológico para incentivar esse tipo de geração também parou (BURANI et al., 2004).

As crises do petróleo introduziram fatores perturbadores que mudaram irreversivelmente este panorama, revelando a importância, por exemplo, da economia de escopo obtida na

co-geração. A partir da década de 90, a reforma do setor elétrico brasileiro permitiu a competição no serviço de energia, criando a concorrência e estimulando todos os potenciais elétricos com custos competitivos. Com o fim do monopólio da geração elétrica, em meados dos anos 80, o desenvolvimento de tecnologias voltou a ser incentivado com visíveis resultados na redução de custos para a geração distribuída (BURANI et al., 2004).

2.5.1.1 Conceito de geração distribuída

O conceito de geração distribuída (GD) é complicado e depende de diversos fatores que, independentemente, são de importância fundamental para um bom entendimento da situação a que será estudada e por isso é exigido um detalhamento adequado para cada caso.

Dessa dificuldade e da diversidade de denominações que já se possui em toda literatura, a conceituação GD foi estudada profundamente por Mauro Moura Severino, Doutor em engenharia elétrica e professor na Universidade de Brasília. Sua tese de Doutorado trabalha minuciosamente as definições dadas desde a terminologia e expressões às definições e classificações pertinentes, analisando estudos de diversos autores com suas citações para GD, para dessa forma chegar numa conclusão plausível para cada situação. Considerando então o estudo feito por SEVERINO (2008), chega-se a uma proposta de definição:

GD é a denominação genérica de um tipo de geração de energia elétrica que se diferencia da realizada pela geração centralizada por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo para aumentar a distribuição geográfica da geração de energia elétrica em determinada região (SEVERINO, 2008).

A geração de energia elétrica a partir da biomassa que é apresentada nesse trabalho enquadra-se então na definição proposta acima, uma vez que a geração aqui proposta é de pequeno porte e de baixa potência utilizando o lixo gerado em pequenas áreas, onde não seria viável a construção de uma usina geradora convencional. Esta definição, portanto, será a definição adotada nesse trabalho.

2.5.1.2 Aspectos positivos e negativos da geração distribuída¹⁴

Entre as características da geração distribuída, destacam-se: (a) pode-se utilizar diversos tipos de fontes primárias, renováveis ou não-renováveis; (b) não se vincula a uma tecnologia específica, havendo diversas opções técnicas em operação e, ainda, várias em desenvolvimento; (c) em tese, qualquer interessado, consumidor ou companhia de eletricidade, pode ser proprietário de uma fonte de GD; (d) existem fontes de GD de diversas potências nominais, para atendimento dos diversos tipos de demanda; (e) as fontes de GD podem localizar-se em quase qualquer lugar do sistema elétrico de potência, e até mesmo fora dele.

A geração distribuída apresenta diversos benefícios, entre eles destacam-se:

Para o consumidor, o índice de confiabilidade de uma unidade de GD pode chegar a 100%, suprimindo assim o consumidor com energia de ótima qualidade no que se refere à tensão, frequência, conteúdo harmônico, entre outros indicadores. A GD pode ser a alternativa mais viável de suprimento elétrico e também pode chegar a ser a única solução para o atendimento a comunidades isoladas.

Para as concessionárias, a GD pode ser economicamente atraente em função das reduções de custos que ela possibilita, por reduzir perdas ativas e reativas nas linhas de transmissão e distribuição, visto que a proximidade a carga será maior. Proporciona-se maior confiabilidade e melhorias no fornecimento de energia em áreas congestionadas, chegando a aliviar o sistema de distribuição e transmissão em condições de sobrecarga ou mesmo congestionamento. Além disso, as fontes de GD apresentam maior modularidade e tempo de implantação reduzido e elas também estão sujeitas a menor burocracia devido a problemas políticos e ambientais relacionados às faixas de servidão.

Ao sistema elétrico interligado, a utilização da fonte GD proporciona redução do carregamento de redes e maior flexibilidade operativa, além de possibilitar uma melhoria no perfil de tensão dos ramais, redução das perdas e os consequentes aumentos da eficiência energética e da estabilidade do sistema.

¹⁴ O item 2.5.1.2 tem como referência a tese de doutorado “Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia”. SEVERINO, Mauro Moura. Distrito Federal, 2008.

Para a sociedade, as fontes GD trazem diversidade a matriz energética, aumentando a segurança de suprimento de energia e diminuindo a necessidade de importação de energia. A geração distribuída aumenta a competição tanto econômica como tecnológica, podendo causar a redução nas tarifas de energia, além de promover o desenvolvimento econômico local. Outro benefício que refletiria na sociedade é que a GD contribui para o atendimento de demandas crescentes evitando a construção de novas fontes de energia convencionais.

Contudo existem também alguns aspectos negativos, aqui serão apresentados alguns:

A grande complexidade, abrangendo a técnica, no nível de operação de despacho centralizado e os impactos nos procedimentos de operação e controle do sistema, visto que existe necessidade de integração e de gerenciamento da GD junto às redes de distribuição existentes. Deve-se ter em mente também que o sistema de proteção sofre impactos devido à existência de GD e devem ser adaptados para tal funcionamento. Adicionalmente pode-se citar a necessidade constante de monitoração da qualidade da energia, a dificuldade existente para se criar normas claras e abrangentes devido às especificidades de cada rede e da própria GD e os elevados custos envolvidos, apesar de decrescentes com o desenvolvimento das tecnologias GD.

[2.5.1.3 Influência da geração distribuída no sistema elétrico](#)

A conexão de GD quando bem planejada, pode trazer benefícios e desvantagens, como já foi dito anteriormente. No entanto a GD exerce influência sobre o sistema elétrico com impacto significativo no fluxo de potência, no perfil de tensão e, portanto, na qualidade da energia fornecida. Um dos obstáculos mais importantes da conexão de GD em sistemas de energia elétrica é o potencial que estas fontes possuem de impactar a segurança, a estabilidade e a qualidade da energia destes sistemas (KREITH; GOSWAMI, 2007).

O sistema elétrico de energia foi tradicionalmente desenhado e ainda é operado para transportar uma grande quantidade de energia de uma forma unidirecional a partir das fontes de geração, através das linhas de transmissão e sistemas de distribuição até chegar, finalmente, aos consumidores finais desta energia (THONG et al., 2005).

Os sistemas de distribuição são, por isso, passivos e projetados para operar desta forma com fluxo unidirecional de energia elétrica, diferentemente das linhas de transmissão que são, geralmente, projetadas para aceitar um fluxo bidirecional de energia. Todavia, com a injeção de energia elétrica diretamente nos sistemas de distribuição, em virtude da existência da GD, estes passam a ser sistemas ativos¹⁵. Dessa forma, portanto, podem vir a apresentar problemas com o crescimento da GD (LATHEEF et al, 2008).

A conexão da GD em sistemas de distribuição pode impactar diversos parâmetros destes sistemas, como, por exemplo, o fluxo de potência que agora passa a ser bidirecional, o perfil de tensão, a estabilidade da tensão, os sistemas de proteção e, por fim, como consequência destas mudanças, a qualidade da energia elétrica (THONG et al., 2005).

A inserção de poucas fontes de geração distribuída no sistema de distribuição praticamente não possui impactos, a não ser que o sistema em questão seja pequeno e “fraco”. Entretanto, a tendência é de que haja um grande crescimento da geração distribuída dentro dos próximos anos e esta parcela de geração passaria a ser significativa e seus efeitos sobre o sistema de energia elétrica não seriam mais desprezíveis (GUAN et al., 2009).

Existem basicamente nove diferentes problemas que a GD pode apresentar sobre um sistema de energia elétrica, relacionados à qualidade da energia desta rede: afundamentos de tensão, interrupções curtas, interrupções longas, picos de tensão, ondulações de tensão, distorção harmônicas, flutuações de tensão, ruídos e desequilíbrios de tensão (KREITH e GOSWAMI, 2007).

Afundamentos de tensão podem ocorrer devido a chaveamentos na rede, partidas de motores elétricos, em casos de curtos-circuitos e, também, durante o ligamento de uma fonte de GD fora da velocidade síncrona (THONG et al., 2005). Dentre as causas das interrupções curtas estão as aberturas e fechamentos automáticos de sistemas de proteção de ramificações com falhas do sistema. Estas aberturas e fechamentos são, por sua vez, em sua maioria, causados por falhas em isoladores e descargas atmosféricas. Como consequência de interrupções curtas, pode haver o mau funcionamento de sistemas de proteção, perdas de informações e mau funcionamento de processadores.

¹⁵ Sistemas ativos possuem o papel de consumo e de geração de energia simultaneamente.

Dentre as principais causas de interrupções longas, encontram-se as falhas de equipamentos no sistema de energia, tempestades, objetos (árvores, carros, dentre outros) que colidem com componentes da rede (como, por exemplo, cabos ou postes), fogo, falha humana e má coordenação do sistema. A principal consequência e característica das interrupções longas é a interrupção do funcionamento de todos os equipamentos conectados à rede atingida (TREVISAN, 2011).

Como causa dos picos de tensão estão, principalmente, o chaveamento de linhas e de bancos de capacitores para correção de fator de potência e, também, o desligamento de cargas pesadas. Os efeitos dos picos de tensão no sistema de energia elétrica podem ter desde consequências menos graves, como interferências eletromagnéticas, até outras gravíssimas, como, por exemplo, a completa queima de equipamentos e destruição de isoladores (TREVISAN, 2011).

Dentre as principais causas das ondulações de tensão estão o ligamento e o desligamento de cargas pesadas, fontes de energia e transformadores mal dimensionados. Ondulações de tensão também podem ter efeitos negativos no sistema de energia elétrica, dentre as quais se cita: perda de dados, flickers¹⁶ na luz e em monitores e até, no caso destes valores serem muito elevados de tensão, desligamento ou queima de equipamentos sensíveis (TREVISAN, 2011).

As causas típicas de distorções harmônicas podem ser divididas como clássicas e modernas. Como causas clássicas, pode-se citar: máquinas elétricas operando na região de saturação magnética, fornos elétricos de arco voltaico, retificadores e motores de corrente contínua com escovas. Por outro lado, cargas não lineares aparecem como as causas modernas das distorções harmônicas. Exemplos de cargas não lineares são: aparelhos eletrônicos, inversores, fontes chaveadas, equipamentos de processamento de dados e luzes de alta eficiência (KREITH e GOSWAMI, 2007). Com relação à geração distribuída, cita-se a utilização de inversores como a principal causa de distorções harmônicas na rede. O tipo de distorção e a severidade desta dependem da tecnologia utilizada pelo inversor e das configurações de interconexão da GD à rede (THONG et al., 2005).

¹⁶ O fenômeno designado por cintilação luminosa, em inglês “flicker” ou “lamp flicker” se refere à percepção, pelo olho humano, das variações luminosas provocadas pela flutuação da tensão de alimentação.

Os efeitos da distorção harmônica no sistema de energia elétrica podem ser diversos. Os principais e mais conhecidos são: probabilidade elevada da ocorrência de ressonâncias no sistema, sobrecarga do neutro em sistemas trifásicos, sobreaquecimento de cabos e equipamentos, perda de eficiência de máquinas elétricas, interferência eletromagnética com sistemas de comunicação e disparos de chaves de proteções térmicas. Entretanto, o problema das distorções harmônicas relacionadas à GD tende a diminuir com o avanço da tecnologia dos inversores (THONG et al., 2005).

Variações na geração de energia de fontes GD baseadas em fontes primárias de energia irregulares, como por exemplo, aerogeradores e painéis fotovoltaicos, podem causar flutuações de tensão. Fornos elétricos de arco voltaico e partidas e desligamentos de máquinas elétricas também aparecem dentre as principais causas deste problema. (THONG et al., 2005). Os efeitos das flutuações de tensão são, de acordo com KREITH e GOSWAMI (2007), semelhantes aos de subtensões, todavia, o principal efeito é a geração de flickers no sistema.

Os Ruídos, por sua vez, podem ser causados por interferências eletromagnéticas provenientes, por exemplo, de micro-ondas, difusões de sinais televisivos. No caso de GD no sistema de energia elétrica, pode ser causados pelos equipamentos de eletrônica de potência (retificadores e inversores) e também por aterramento impróprio de componentes do sistema. Os efeitos dos ruídos não são geralmente graves, sendo apenas, normalmente, fator de perturbação para equipamentos eletrônicos e sistemas de proteção (KREITH; GOSWAMI, 2007).

A inserção de fontes monofásicas de GD, como, por exemplo, painéis fotovoltaicos, pode gerar um desequilíbrio de tensão em sistemas trifásicos de energia elétrica (THONG et al., 2005). Como consequência desta operação não simétrica do sistema de energia elétrica, há a existência de componentes de sequência negativa que são prejudiciais a todos os tipos de cargas trifásicas, em especial aos motores de indução (KREITH; GOSWAMI, 2007).

2.5.2 Aspectos políticos e regulatórios

Neste ponto deseja-se fazer uma análise do atual cenário político e regulatório da geração distribuída no Brasil. Desta forma, serão abordados três principais conceitos envolvidos em

uma possível conexão de geração distribuída a partir da biomassa com a rede elétrica convencional e analisando a legislação e normas associadas.

2.5.2.1 Tarifa branca¹⁷

A ANEEL aprovou em 22 de novembro de 2011, durante reunião pública da diretoria, a alteração da estrutura tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia. Com as novas determinações, a energia seria cobrada com taxas diferentes dependendo do horário de consumo. Assim, o consumidor que utilizar a energia nos horários em que o sistema está menos carregado, pagaria um valor menor do que aquele que consome nos horários de pico. A principal mudança ficou a cargo da tarifação para os consumidores de baixa tensão (residenciais, comerciais, industriais e de áreas rurais), onde foi criada a modalidade tarifária branca que determina três diferentes níveis de tarifa de energia de acordo com os horários de consumo.

Essa atitude da ANEEL tem como objetivo evitar uma necessidade de expansão da rede de distribuição no horário de pico, além de reduzir o preço final da fatura de energia para o consumidor. Para isso, a tarifa branca espera a mudança de hábito do consumidor, estimulando-o a consumir em horários alternativos, fora do horário de pico, quando a energia fica com o preço inferior à tarifa convencional. Essa medida, porém, foi determinada como opcional, ou seja, o consumidor que preferir poderá continuar utilizando a tarifa convencional já existente.

Simplificadamente, uma tarifa mais barata será empregada na maioria das horas do dia de segunda a sexta-feira; outra mais cara, no horário em que o consumo de energia atinge o pico máximo, no início da noite; e a terceira, intermediária, será entre esses dois horários. Nos finais de semana e feriados, a tarifa mais barata será empregada para todas as horas do dia. Essa cobrança, entretanto, somente começará a valer quando as distribuidoras substituírem os medidores eletromecânicos de energia pelos eletrônicos, que serão detalhados adiante.

¹⁷ O item 2.5.2.1 tem como referência a notícia “Tarifa branca ao consumidor de baixa tensão valerá como novo medidor” publicada pela ANEEL de 23 de novembro de 2011 no endereço eletrônico <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4921&id_area=90>.

Outra mudança, válida a partir de janeiro de 2014, é a criação das Bandeiras Tarifárias Verde, Amarela e Vermelha, que funcionarão como um semáforo de trânsito e se refletirão em diferença de tarifa para o consumidor. A Bandeira Verde significa custos baixos para gerar a energia. A Bandeira Amarela indicará um sinal de atenção, pois os custos de geração estão aumentando. Por sua vez, a Bandeira Vermelha indicará que a situação anterior está se agravando e a oferta de energia para atender a demanda dos consumidores ocorre com maiores custos de geração, como por exemplo, o acionamento de grande quantidade de termelétricas para gerar energia, que é uma fonte mais cara do que as usinas hidrelétricas. O público alvo serão todos os consumidores do Sistema Interligado Nacional (SIN), de alta e baixa tensão.

2.5.2.2 Microgeração e minigeração distribuída

A ANEEL pulicou a Resolução Normativa nº 482 no dia 17 de abril de 2012 estabelecendo critérios e definições a respeito dos sistemas de geração distribuída de energia elétrica e o sistema de compensação de energia no Brasil. Além de definir o que é microgeração e o que é minigeração, a Resolução nº 482 definiu ainda o sistema de compensação de energia, conceito fundamental para a utilização da geração distribuída, onde o consumidor passa a depender menos da energia fornecida pela concessionária. Ficam então adotadas as seguintes definições:

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa.

É importante notar que a biomassa, objeto do presente estudo, está presente na definição adotada pela Resolução da ANEEL, assim, o modo de geração proposto neste trabalho se enquadraria como microgeração ou minigeração distribuída, dependendo da potência instalada que seria possível gerar a partir dos resíduos sólidos urbanos.

Essa Resolução determina, ainda, que as empresas distribuidoras de energia elétrica deverão se adequar seus sistemas comerciais e suas normas técnicas de forma a se adaptar à nova possibilidade de geração distribuída da qual essa norma se refere. O parágrafo primeiro do artigo número 3 determinou o prazo para as distribuidoras realizarem essas medidas como 240 dias a partir da data de publicação da Resolução, prazo este que venceu em 15 de dezembro de 2012.

As normas para o sistema de compensação de energia elétrica tratam de sistemas com geração distribuída onde, além do consumo usual de energia elétrica em uma unidade, exista geração de energia elétrica ativa que compense esse consumo e, caso exceda, injete essa energia no sistema de distribuição. Dentre outras providências, a Resolução determina que o consumo faturado da unidade consumidora deva ser a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto horário. Caso a geração de energia ativa em uma unidade seja superior ao seu consumo, a diferença deverá ser utilizada, preferencialmente, para compensação em outros postos horários dentro do mesmo ciclo de faturamento (ANEEL, 2012).

Em relação à energia excedente que venha a ser injetada pela unidade consumidora, a Resolução descreve ainda um sistema de crédito de energia, onde o consumidor ficaria com um saldo positivo de energia, informação contida na fatura, que poderia ser utilizado no ciclo subsequente, em quilowatt-hora (kWh). Os créditos de energia gerados a partir do sistema de compensação de energia poderiam então ser utilizados pelo consumidor no prazo de 36 meses, quando o consumidor perderia então o crédito de energia não utilizado.

2.5.2.3 Sistemas de medição de energia elétrica

A Resolução Normativa nº 502, publicado pela ANEEL em 7 de agosto de 2012, regulamenta os sistemas de medição de energia elétrica que são necessários para por em prática a tarifa branca e também permitir a geração distribuída, como citado nas Resoluções nº 482 e nº414, da ANEEL. Com essa Resolução, conforme seu primeiro parágrafo do Artigo 1º, as distribuidoras teriam 18 meses para adotar os sistemas de medição conforme determinado nessa Resolução.

O segundo artigo dessa resolução lista as características que os novos sistemas de medição de energia devem ter para estarem adaptados e prontos para trabalhar com a geração distribuída e a tarifa branca. Para isto, o sistema de medição das unidades consumidoras enquadradas na modalidade tarifária branca deve apurar o consumo de energia elétrica ativa em pelo menos quatro postos tarifários, devendo ser programáveis o início e o fim de cada posto. Os principais itens que o novo medidor de energia deve conter são:

§ 1º Em complemento aos requisitos metrológicos referentes à apresentação de informações ao consumidor, devem estar disponíveis por meio de mostrador existente no próprio medidor ou em dispositivo localizado internamente à unidade consumidora:

I – o valor de energia elétrica ativa consumida acumulada por posto tarifário; e

II – a identificação do posto tarifário corrente.

§ 2º A critério da distribuidora, as informações referenciadas no § 1º podem ser adicionalmente disponibilizadas por meios alternativos com vistas a facilitar o acesso às informações pelo consumidor.

§ 3º O sistema de medição deve ser instalado pela distribuidora conforme prazos e critérios estabelecidos em regulamento específico.

§ 4º Caso a unidade consumidora não faça adesão ao faturamento na modalidade tarifária branca, a instalação do sistema de medição referenciado no caput não é obrigatória.

Art. 3º Os titulares das unidades consumidoras abrangidas por esta Resolução, independentemente da adesão ao faturamento na modalidade tarifária branca, observando a regulamentação técnica metrológica específica, podem solicitar à distribuidora a disponibilização de um sistema de medição capaz de fornecer cumulativamente as seguintes informações:

I – valores de tensão e de corrente de cada fase;

II – valor de energia elétrica ativa consumida acumulada por posto tarifário;

III – identificação do posto tarifário corrente, se aplicável;

IV – data e horário de início e fim das interrupções de curta e de longa duração ocorridas nos últimos 3 (três) meses; e

V – últimos 12 (doze) valores calculados dos indicadores Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária – DRP e Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica – DRC.

Desta maneira as distribuidoras deveriam se adaptar de forma que o novo medidor de energia elétrica possa ter, no mínimo, essas características e requisitos fixados nessa Resolução. As aplicações e principais características do novo medidor para geração distribuída serão detalhadas adiante.

2.5.3 Smart grid

2.5.3.1 Conceitos básicos

O conceito de *smart grid* ou redes inteligentes difere de acordo com quem o define. Alguns especialistas focam o conceito mais na parte da automação da rede, outros na cadeia de fornecimento de energia, outros ainda na melhoria dos canais de interação e serviços para o consumidor. A razão disto é que tal definição varia de acordo com seu autor e com as necessidades, seja reduzir perdas, poluentes, custos operacionais e com a ótica financeira, ambiental, entre outras. *Smart grid* não é uma “coisa”, mas uma visão a ser completada e que deve ser construída de acordo com as necessidades do mercado no qual será implantado e tomando em conta múltiplas perspectivas, tais como tecnológica, ambiental, socioeconômica e político-regulatória (TOLEDO, 2012).

A ideia principal do *smart grid* é otimizar a rede elétrica de forma automática e inteligente, a partir de sistemas de medição, geração e armazenamento distribuídos de energia. Assim, a rede elétrica se basearia em análises e diagnósticos em tempo real para se reconfigurar e atender às necessidades que possam surgir no sistema durante a operação. A vantagem clara desse sistema é o aumento da confiabilidade da rede e a redução dos custos com a manutenção.

O conceito inclui ainda o gerenciamento pelo lado da demanda, que possibilita aos consumidores se beneficiar de tarifas diferenciadas, que variam de acordo com o horário que a energia é utilizada, conforme explicado no item 2.5.2.1. Bem entendido, para serem colocadas em prática, tais tarifas devem ser regulamentadas pela ANEEL ou autorizadas para utilização em projetos-piloto, em caráter experimental. Ao adequar seu comportamento de consumo de energia aos horários de tarifas menores, o cliente poderá se beneficiar reduzindo seus gastos com energia.

Tais benefícios podem ainda ser obtidos através da interação com fontes de geração e armazenamento distribuídos de energia, conectadas diretamente na rede ou nas unidades consumidoras. Assim ganhos sinérgicos serão alcançados através de interações entre diferentes elementos do sistema elétrico tais como: medição, dispositivos de rede, fontes de

geração e armazenamento de energia e carga. Isto se traduzirá na oferta de novas tarifas, produtos, serviços e canais de interação com o consumidor (TOLEDO, 2010).

2.5.3.2 Tipos de controle

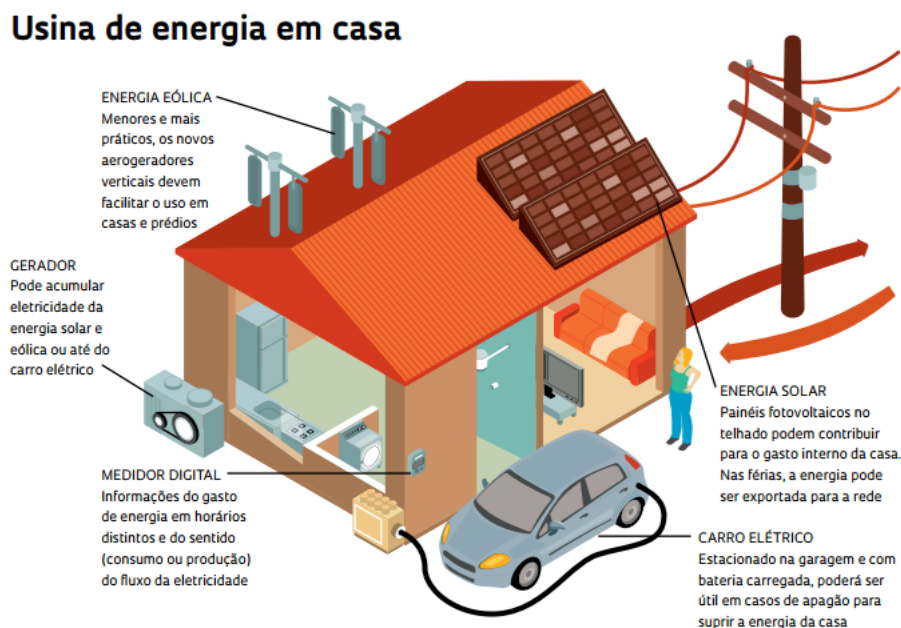
Conforme visto, o *smart grid* tem um intuito muito expansivo com o controle geral do sistema de energia elétrica. Os benefícios advindos de um controle dos aspectos em tempo real do sistema elétrico são inúmeros e pode evitar vários problemas e danos aos equipamentos utilizados na distribuição. Sendo assim, uma rede ligada e controlada (ou totalmente isolada, mas controlada) traria melhorias no fornecimento de energia e evitaria sobrecargas, sobrecorrentes entre outros problemas que podem afetar o sistema elétrico.

Os controles possíveis de um sistema inteligente como o *smart grid* são inúmeros e pode trabalhar tanto do lado da geração quanto do consumo, controlando a carga. Com o sistema em funcionamento, os dados chegariam a uma central de comando que, automaticamente ou manualmente, reconfiguraria o sistema para que possa operar da maneira mais adequada. Vários dados devem ser controlados e observados durante a operação, de forma a auxiliar a tomada de decisão de atuação na rede, alguns desses dados são: a tensão em regime permanente, o fator de potência, os harmônicos, o desequilíbrio de tensão, a flutuação de tensão, as variações de tensão de curta duração, a variação de frequência, a quantidade de reativo entre outros.

O *smart grid* possibilita ainda um controle da carga, podendo desligar ou reduzir a demanda de alguma unidade consumidora, caso necessário. Como o objetivo do *smart grid* é proteger a rede de eventuais desligamentos ou danos aos equipamentos, é conveniente pensar que o corte na carga de uma unidade consumidora pode prejudicar esta, mas beneficiar o sistema como um todo. Assim, o controle de carga atuaria sempre que o sistema estivesse em situação perigosa e, apesar de desligar alguma carga, protegeria o sistema de um dano pior ou de desligamento total.

Porém, esse total controle precisa de um grande investimento em equipamentos que proporcionem essa captura de dados e essa transferência de informação, desde as fontes de geração até os produtos utilizados como carga, além de equipamentos que permitam a reconfiguração do sistema, ou seja, a atuação do *smart grid*. O medidor digital de energia é

um destes equipamentos necessários para o funcionamento do *smart grid* e será explicado adiante. A Figura 2.11 ilustra esquematicamente o funcionamento do sistema com *smart grid* em uma residência com geração distribuída ligada à rede. É importante ressaltar a existência do medidor digital, capaz de calcular o fluxo de energia (consumo e geração), além de fornecer dados para o funcionamento do *smart grid*.



Fonte: OLIVEIRA, Marcos de. *Cidades do futuro*. Revista Pesquisa FAPESP, Dezembro, 2012.

Figura 2.11 *Representação de uma residência com smart grid*

2.5.3.3 Controle de carga

O controle de carga é uma das funções apresentados anteriormente para o *smart grid*, esse controle é de extrema importância para o êxito de uma rede inteligente para proteção dos equipamentos e dos consumidores de uma rede elétrica, já que a carga é uma das grandes variáveis aleatórias existentes no sistema elétrico. No sistema elétrico atual, não existe a possibilidade de se determinar quando a sociedade irá necessitar de mais energia e de quanto será essa necessidade. Uma das possibilidades dada pela implantação de um *smart grid* é proporcionar total controle da carga e determinar quando o usuário poderá usar a quantidade de energia que ele necessita e quando terá que abrir mão de alguma carga, caso o sistema não esteja suportando essa demanda. Sendo assim, controlar totalmente a carga

dos usuários é dizer quando será possível ou não a utilização do mesmo, sempre tendo como objetivo o bom funcionamento geral da rede de distribuição.

Esse controle total de carga seria uma evolução para a saúde do sistema evitando diversos tipos de problemas já citados. Além disso, o conceito promove ainda o uso racional da energia elétrica, já que apresenta mais ferramentas de controle, e, conseqüentemente, leva a uma redução do consumo de energia elétrica nos horários de pico e, para os consumidores, diminuição também da fatura de energia no fim do mês.

Outro aspecto a ser avaliado diz respeito ao fato da arquitetura *smart grid* facilitar a participação do consumidor no mercado de energia elétrica, a partir de uma maior interação com as concessionárias, tornando possível a disponibilização de uma nova era de serviços integrados, maior controle da demanda e da possibilidade de ele ser, também, um produtor (GUIMARÃES, 2010).

Os benefícios de um sistema com GD e um *smart grid* atuando são inúmeros e já foram discutidos em vários cenários, mas deve-se ter em mente que tudo isso irá afetar o tradicional fluxo de carga, que normalmente teve sempre um sentido e, com o novo sistema, passará a ter fluxo nas duas direções, o que pode afetar o sistema. A análise do fluxo de carga em uma rede de energia elétrica consiste em determinar os fluxos de potências ativa e reativa (seus valores e sentidos), as tensões nas barras (módulo e ângulo) e outras grandezas de interesse. No capítulo 3 serão apresentados com mais detalhes o fluxo de carga e como a geração distribuída e o *smart grid* podem afetar os resultados do fluxo de carga em um sistema típico de distribuição de energia.

2.5.3.4 Medidor digital de energia

O medidor digital ou eletrônico de energia é um equipamento de medição que irá substituir o antigo medidor mecânico ou eletromagnético, com ele será possível ter mais informações sobre o sistema em tempo real. Os medidores inteligentes são o alicerce do *smart grid*, necessário para todos os controles e aquisição de dados já citados. Com esses medidores será possível ter agregados ao fornecimento de eletricidade, novas tarifas, novos parâmetros de qualidade do serviço, controle de cargas e outras funcionalidades.

Novos serviços, como a comunicação de dados pela linha elétrica, hoje autorizada, mas desconhecida, serão amplamente difundidos. Novas soluções, como a geração distribuída, veículos elétricos e compartilhamento da telemedição, são promessas de hoje, viáveis em alguns anos. Quando a rede elétrica tiver que conviver com cargas pontuais não fixas, como os veículos elétricos, ou com consumidores que exportam eletricidade, as instalações atuais não serão suficientes. Só uma rede inteligente, com comunicação bidirecional, automação, controle e gestão de seus ativos, com supervisão integrada poderá suportar todos esses usos¹⁸.

Com esse medidor se torna possível a otimização de todo o sistema elétrico, gerando benefícios tanto para a concessionária como pro consumidor. O consumidor tem como incentivo a redução do valor da tarifa com a mudança no hábito de consumo, a capacidade de gerenciar o consumo em tempo real, o estímulo a equipamentos inteligentes que não desperdicem energia e a maior informação sobre o serviço e perfil de consumo, dentre outros. Já para as distribuidoras concessionárias, o interesse na implementação fica por conta da possibilidade de redução de custos operacionais, atendimento mais rápido ao consumidor por causa do controle remoto das redes, maior automatização das operações e redução de perdas técnicas e não-técnicas (HERNANES et al., 2011).

As funções existentes nesses medidores que definirão até que ponto o *smart grid* vai poder atuar e quais informações o centro de comando vai ter disponível para análise e reconfiguração do sistema. A companhia de energia elétrica do Rio de Janeiro, Light, por exemplo, já desenvolveu medidores inteligentes com certificação digital, assim como mais serviços e canais de interação com o consumidor. Tais equipamentos são interoperáveis e intercambiáveis, ou seja, medidores de diferentes fornecedores serão padronizados, o que tende a reduzir seu custo. O projeto utiliza ainda a certificação digital para assinar, eletronicamente, os dados que dão origem ao faturamento e outras operações relevantes e, desta forma, garantir o rastreamento de auditoria necessário para aumentar a segurança da transação. Com esses medidores, o cliente poderá acompanhar projeções, em tempo real, de quanto será seu consumo de energia no final do mês se não mudar seu hábito de consumo. Tal mostrador exibirá ainda mensagens de eficiência energética e agendamentos de eventos na rede de distribuição.

¹⁸ As informações contidas neste parágrafo têm como fonte o artigo “Smart Grid – Uma solução inteligente” publicado na Revista ABINEE, ano XII, nº 57, de julho de 2010.

Ainda com o intuito de alterar o hábito de consumo de energia dos usuários e obedecendo ao disposto na resolução da ANEEL, os novos medidores devem ainda informar ao consumidor o quão elevada é a tarifa no momento. Assim, o cliente poderá usufruir mais eficientemente da tarifa branca, tendo total consciência do preço que está pagando ao consumir a energia em cada hora do dia.

Os novos medidores eletrônicos de energia elétrica representam, portanto, um passo importante para a implantação das redes elétricas inteligentes no Brasil. De acordo com o diretor relator do processo de implementação da ANEEL, André Pepitone da Nóbrega, o *smart grid* transformará a rede elétrica existente numa verdadeira “internet de energia”, aliando transporte de elétrons e de informação. O diretor salientou que os fatores que impulsionaram o órgão regulador a estudar a implantação das redes inteligentes no Brasil foram a necessidade de melhorar a qualidade no serviço prestado de baixa tensão, bem como de reduzir as perdas no fornecimento de energia e os custos operacionais (ANEEL, 2012).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomassa é uma fonte renovável que vem crescendo em diversos campos de aplicação para reaproveitamento do material. A utilização dos RSU como essa fonte renovável de energia possibilitaria, além da descentralização da geração no sistema utilizando a GD, a melhoria no aproveitamento e utilização dos resíduos sólidos urbanos, ajudando assim a combater um problema de saúde pública e ambiental. Com isso, é possível criar um sistema GD seguro e mais eficiente que traga benefícios para todos os envolvidos, aliviando a rede elétrica no horário de pico e diminuindo a fatura do consumidor. O *smart grid* entraria nesse contexto como fundamental para a otimização do sistema, incrementando controle e agilidade aos problemas aparentes do sistema e dando mais segurança à rede elétrica. Assim, no capítulo 3 serão apresentadas as ferramentas computacionais e os métodos utilizados para uma análise baseada na GD, tendo como fonte renovável a biomassa a partir de RSU, utilizando a ideia de controle pelo *smart grid* para demonstrar como o sistema elétrico reagiria as situações propostas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O capítulo 2 mostrou que os resíduos sólidos urbanos possuem um grande potencial energético que, se devidamente aproveitado, pode ser utilizado para gerar energia elétrica de forma a suavizar um pouco o sistema elétrico dependente unicamente da concessionária. Porém, a inserção de energia elétrica gerada a partir da biomassa pode gerar alguns impactos na rede de distribuição, como a mudança das tensões nas barras e nas correntes nos ramos, entre outros distúrbios já citados. Para analisar estes efeitos da injeção de energia no sistema, foram feitas simulações de forma a observar as situações pertinentes que possam responder questões sobre como o sistema reagiria a determinadas combinações de geração distribuída e carga.

Nesse capítulo serão discutidos todos os critérios utilizados e as hipóteses consideradas para se desenvolver um modelo de geração distribuída utilizando resíduos sólidos urbanos. A partir das características da geração proposta e de curva de dados é possível então fazer um estudo do fluxo de carga em diversas situações para assim determinar os efeitos positivos e negativos dessa geração. Por meio do fluxo de carga podem-se determinar as correntes e as tensões presentes na rede e, com isso, encontrar limites e formatos de geração que possam ser inseridas ao sistema elétrico sem que tenha efeitos negativos.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Características do alimentador de distribuição

3.2.1.1 Modelo do alimentador

Sistemas de potência trifásicos consistem principalmente de interconexões de geradores, transformadores, linhas de transmissão e cargas. A modelagem matemática de seus elementos é relativamente simples, porém as redes a que estão ligados estão cada vez mais extensas e complexas, podendo ser citado como exemplo o enorme sistema interligado que o Brasil possui. Para auxiliar nos estudos de sistemas de distribuição, muitos modelos de alimentadores têm sido desenvolvidos, aplicando uma variedade de técnicas iterativas que

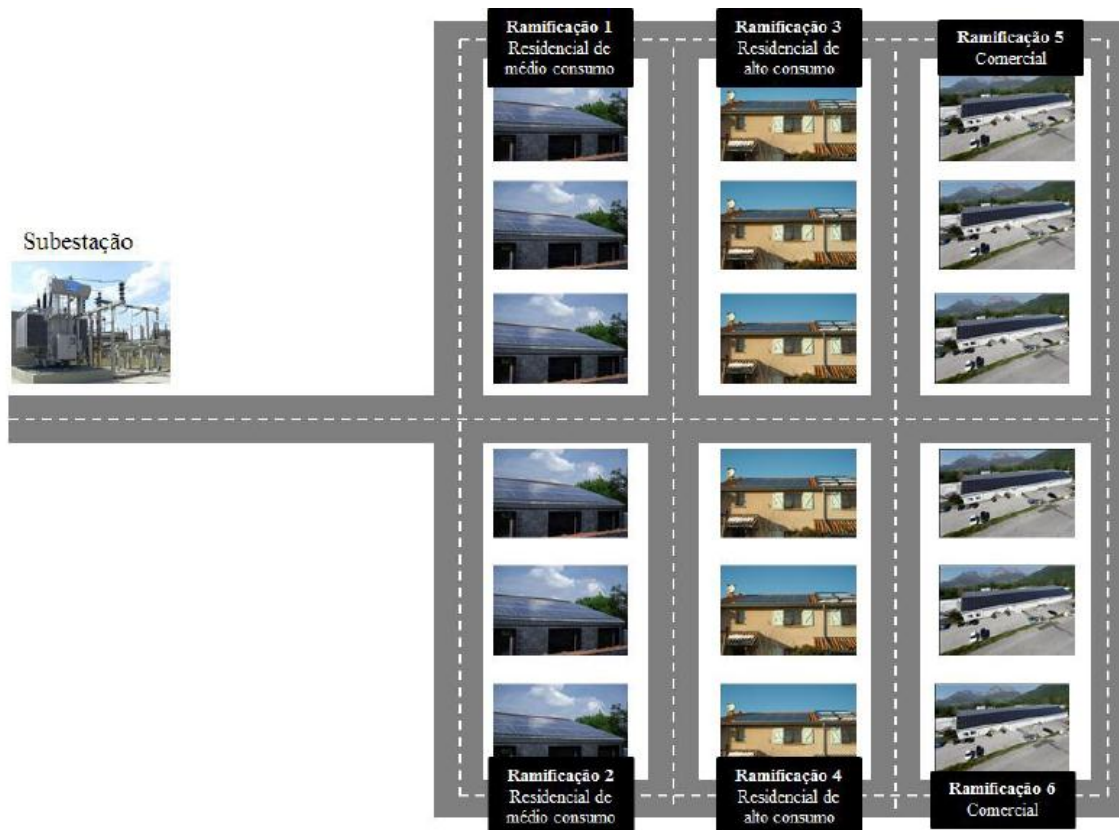
vão desde muito simples, assumindo muitas simplificações feitas com modelos de linhas e cargas até os mais sofisticados com pouca ou nenhuma simplificação (VIEIRA, 2010).

Pesquisadores de todo o mundo se propõem a desenvolver diversos tipos de alimentadores de forma a atender diversos tipos de demanda. Dependendo das variáveis consideradas e do propósito do modelo, a quantidade de barras existentes em cada alimentador varia significativamente. O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) dispõe em seu meio eletrônico diversos modelos que seus engenheiros associados disponibilizaram para que a comunidade científica tivesse acesso. O alimentador utilizado nesse trabalho foi desenvolvido por alunos da Universidade de Brasília (UnB) conjuntamente com o doutor em engenharia elétrica Rafael Amaral Shayani, professor da Universidade de Brasília.

O alimentador que será utilizado como base de estudo apresenta determinadas características que devem ser observadas, tais como ramificações com diferentes secções transversais de seus condutores, cargas com diferentes fatores de potência, distâncias entre trechos, entre outros. Esses fatores ajudam a observar a resposta do sistema elétrico a diversas condições e configurações.

A Figura 3.1 representa o alimentador que será utilizado no presente trabalho. São mostradas seis ramificações com ramos distintos de acordo com as características das unidades consumidoras e os perfis de consumo de cada uma, além do ramo principal de onde chega a alimentação da subestação.

É importante ressaltar que o alimentador proposto, bem como seus parâmetros e características, visam aproximar a simulação do caso real de distribuição de energia elétrica. Assim, a simulação com a inserção da geração distribuída a partir de resíduos sólidos urbanos pode dar respostas às perguntas de como o sistema reage ao fluxo de potência em sentido contrário, qual o limite de inserção de potência pela geração distribuída, qual a melhor configuração para a geração distribuída, como o *smart grid* pode ajudar o funcionamento do sistema, entre outras.



Fonte: LOPES, L. Z. (2011). *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica*. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Figura 3.1 Sistema representativo do alimentador de 40 barras.

3.2.1.1.1 Parâmetros elétricos dos condutores

Os parâmetros elétricos são fundamentais para o correto funcionamento do alimentador, pois os fatores como resistência e reatância devem refletir a realidade de forma que a simulação possa demonstrar como reagiria um sistema real com esses parâmetros.

No alimentador em estudo é possível observar 6 ramificações, além de um ramo principal. Dessas ramificações, 5 delas são formadas do mesmo tipo de cabo, portanto, mesma seção transversal, material e impedância. A ramificação remanescente e o tronco principal são formados por um tipo de cabo diferente dos demais com uma seção transversal maior. O condutor principal necessita dessa diferença, pois precisa suportar a corrente elétrica total do circuito, já a ramificação com o condutor de maior seção é utilizado para análise de situações distintas. O Quadro 3.1 mostra as características dos condutores do alimentador.

Quadro 3.1 *Características dos condutores do alimentador.*

Tamanho do condutor	Resistência a 50 °C e 60 Hz [Ω/km]	Reatância a 60 Hz [Ω/km]	Ampacidade [A]
#4 – alumínio reforçado com aço	1,584	0,489	140
#2 alumínio	0,956	0,453	156

Fonte: LOPES, L. Z. (2011). Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Os valores de resistência e ampacidade dos condutores de alumínio são fornecidos pelos alimentadores propostos pelo IEEE. Porém este não fornece as reatâncias dos condutores por unidade de comprimento. Para obter tais parâmetros, foi necessário recorrer a dados disponibilizados pela Companhia Energética de Brasília (CEB), em sua norma NTD 1.02 – Critérios para Projeto de Redes Aéreas Urbanas Convencionais, a qual especifica, para cada distância equivalente entre as cruzetas, a resistência elétrica a 50 °C e a reatância indutiva, ambos em ohm por quilômetro dos condutores de alumínio usados em sistemas de distribuição (CEB, 2002). Optou-se por uma distância equivalente entre as fases de 1.089 mm por se tratar de um arranjo normal em cruzetas de 2 metros. O Quadro 3.2 mostra os parâmetros dos condutores de acordo com a CEB (LOPES, 2011).

Quadro 3.2 *Parâmetros dos condutores elétricos com 1.089 mm entre as fases*

Tamanho do condutor em AWG ou kcmil	Reatância indutiva a 60 Hz [ohm/km]	Razão reatância e resistência [X/R]
336,4	0,387	2,04
#4/0	0,409	1,36
#1/0	0,435	0,72
#2	0,453	0,47
#4	0,470	0,31

Fonte: LOPES, L. Z. (2011). Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

3.2.1.1.2 Bases do sistema em pu

O sistema por unidade (pu) expressa grandezas elétricas de um circuito de modo normalizado, com base em valores determinados. Sistemas em pu são baseados em uma

potência de base S_{base} e em uma tensão base V_{base} , que pode ser a tensão encontrada em cada barramento. Feito isso, o circuito pode ser expresso sem transformadores (sem diferentes níveis de tensão), haja vista que a tensão ficará normalizada. Todas as outras bases do sistema relativas à corrente e à impedância são derivadas das bases de tensão e potência (ALMEIDA e FREITAS, 1995).

A base de potência S_{base} aqui escolhida foi de 2 MVA, um valor bem próximo à soma das potências nominais dos transformadores, isto é, 1,9125 MVA. Já a base de tensão V_{base} é a tensão de linha de distribuição, no caso analisado 13,8 kV. O Quadro 3.3 abaixo resume todas as bases utilizadas nos problemas de fluxo de carga abordados nesse trabalho:

Quadro 3.3 *Bases do sistema em pu.*

Base	Valor
Potência	$S_{base} = 2 \text{ MVA}$
Tensão	$V_{base} = 13,8 \text{ kV}$
Impedância	$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 95,22\Omega$
Corrente	$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * V_{base}} = 83,67 \text{ A}$

Fonte: LOPES, L. Z. (2011). *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica*. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

3.2.1.1.3 Parâmetros elétricos dos transformadores¹⁹

Os transformadores adotados pelos alimentadores radiais do IEEE não são utilizados na modelagem do novo alimentador aqui proposto. Tais transformadores têm potências na faixa de 250, 500 e 5.000 kVA, considerados de potência muito elevada para uma rede típica de distribuição. Além disso, as tensões que estes transformadores operam são bem distintas às do regime de distribuição do território nacional, tipicamente de 13,8 kV. O Quadro 3.4 representa os parâmetros de transformadores trifásicos em um sistema de distribuição.

¹⁹ O item 3.2.1.1.3 tem como referência de seu texto o trabalho de LOPES (2011) por se tratar do trabalho base do modelo do alimentador proposto.

Quadro 3.4 Parâmetros dos transformadores trifásicos – classe 15 kV e 60 Hz

Potência (kVA)	Tensão (V)	Perda a vazio (W)	Perda no cobre (W)	Rendimento (%)	Regulação (%)	Impedância (%)
30	220 a 440	200	570	96,85	3,29	3,5
45	220 a 440	260	750	97,09	3,19	3,5
75	220 a 440	390	1.200	97,32	3,15	3,5
112,5	220 a 440	520	1.650	97,51	3,09	3,5
150	220 a 440	640	2.050	97,68	3,02	3,5
225	380 ou 440	900	2.800	97,96	3,63	4,5

Fonte: MAMEDE FILHO, J. *Instalações elétricas industriais*. 7ª edição, Editora LTC, 2007.

Como propõe SHAYANI (2010), os valores referentes às impedâncias dos transformadores estão na base de potência do próprio equipamento, ou seja, devem ter seus valores modificados para a base de potência adotada para o sistema a fim de poderem ser equacionados no problema de fluxo de carga. Ainda, é necessário separar a impedância dos transformadores em resistência e reatância.

Para se encontrar a parte real da impedância dos transformadores (resistência) de forma aproximada, divide-se a perda no cobre pela potência nominal de cada transformador e, por fim, multiplica-se o resultado por cem a fim de deixá-lo em percentagem. Para se encontrar a parte imaginária da impedância dos transformadores (reatância), como já se possuem os valores da impedância Z e da resistência R, é usada a seguinte relação matemática:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Assim, resta apenas deixar essas impedâncias em pu e na base de potência do sistema, conforme a seguinte equação.

$$Z_{\text{basenova}} = Z_{\text{baseantiga}} * \frac{S_{\text{basenova}}}{S_{\text{baseantiga}}}$$

O quadro 3.5 demonstra a impedância dos transformadores com as bases do sistema, sendo observada a conversão dos transformadores em bases compatíveis com o restante do sistema.

Quadro 3.5 *Impedância dos transformadores com as bases do alimentador*

Potência do transformador (kVA)	Resistência (Ω)	Resistência (pu)	Reatância (Ω)	Reatância (pu)
75	40,94	0,43	79,03	0,83
112,5	24,76	0,26	53,32	0,56
150	17,14	0,18	40,94	0,43

Fonte: LOPES, L. Z. (2011). *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica*. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

3.2.1.2 Tipos de unidades consumidoras

Na representação do alimentador da Figura 3.1 é possível notar a diferença na representação das unidades consumidoras. As unidades foram divididas em três tipos: unidades residências de médio consumo, unidades residenciais de alto consumo e unidades comerciais. Esses 3 tipos de unidades são típicos em um sistema de distribuição sendo importante destacar essa diferença pois cada unidade consumidora tem um padrão de curva de carga, podendo responder de maneiras distintas às situações propostas pela simulação.

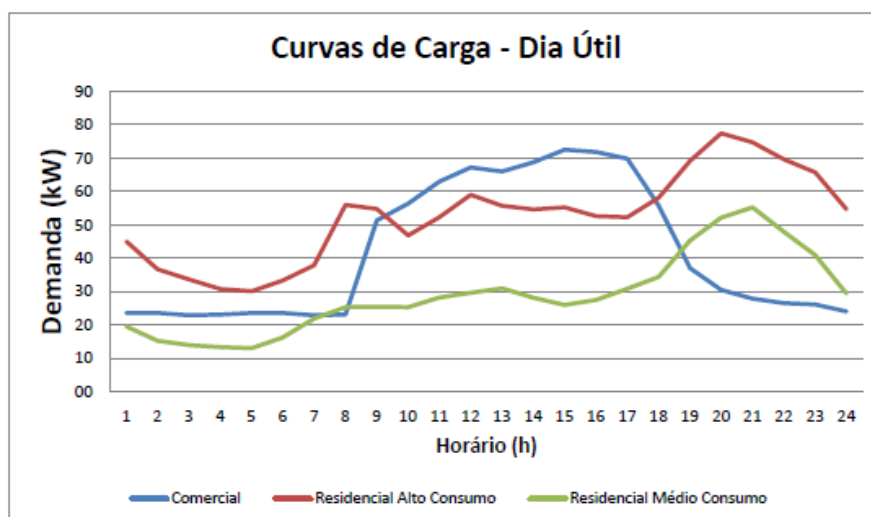
3.2.1.3 Curvas de carga típicas

Para representar a realidade fez-se necessário utilizar uma curva de carga para cada tipo de unidade consumidora definidas no item anterior. A demanda de energia elétrica em situações reais variam inúmeras vezes ao longo do dia e, por isso, a análise deve levar em consideração esse perfil de consumo das unidades residenciais e comerciais. Para isso, utilizaram-se valores resultantes de uma longa pesquisa e campanha de medição que ainda contou com um forte tratamento estatístico dos mesmos (FIGUEIREDO, 2009). As divisões das unidades consumidoras foram propostas desta forma para que fosse possível observar a resposta do sistema para cada tipo de consumo, além de aproximar mais da realidade, onde cada tipo de unidade consumidora tem a sua curva carga típica média.

Os dados foram coletados de unidades consumidoras alimentadas em baixa tensão (380 V), em dias úteis, sábados e domingos. Os registros foram feitos na frequência de quatro medições por hora, porém, neste trabalho, a média aritmética dessas quatro medições em um período de uma hora cederá o consumo de energia equivalente do período analisado.

Todos esses dados utilizados para a determinação da curva de carga de cada uma das unidades consumidoras estão presentes no anexo I.

Como exemplo, tem-se o Gráfico 3.1 que ilustra a curva de carga das três unidades consumidoras estudadas em um dia útil.



Fonte: LOPES, L. Z. (2011). *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica*. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

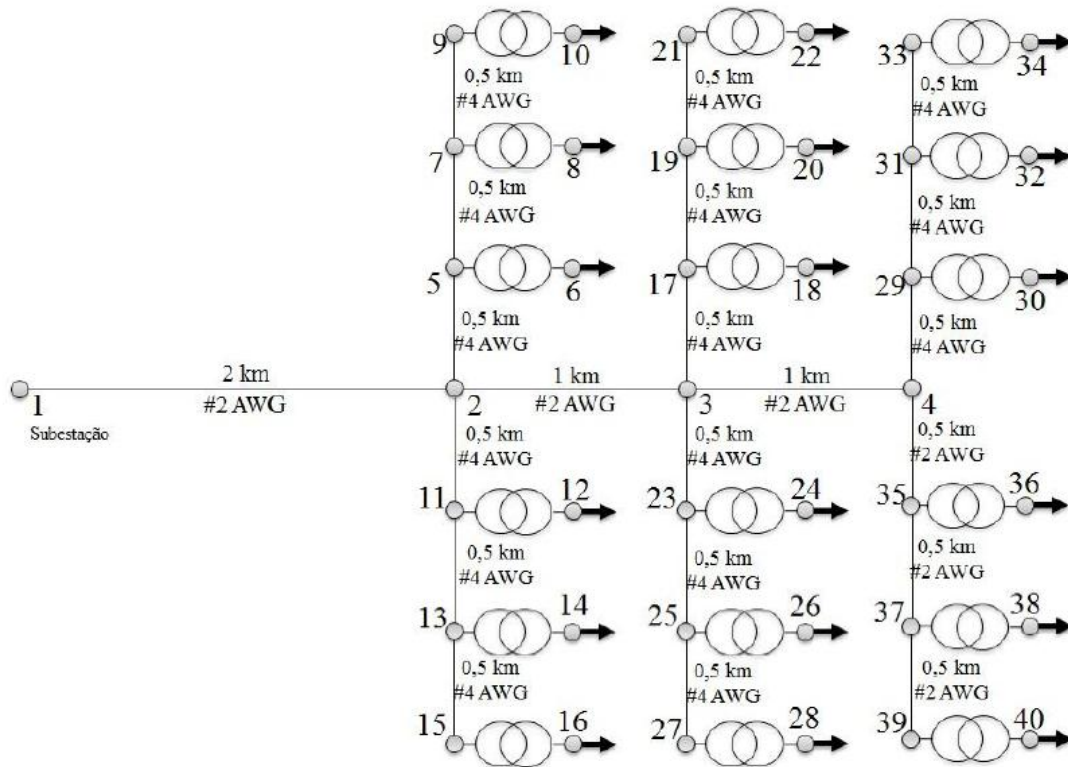
Gráfico 3.1 Curva de carga típica para um dia útil.

Pelo Gráfico 3.1 observa-se a importância do estudo com diferenciação das curvas de carga das unidades consumidoras. A curva em azul, demanda das unidades comerciais e a curva em vermelho, demanda das unidades residenciais de alto consumo, têm padrões distintos e, portanto, a injeção de potência pela geração distribuída pode responder de maneira diferente para cada um destes perfis de consumo. As demais curvas de carga para os outros tipos de unidade consumidora estão detalhadas no anexo I.

3.2.1.4 Ramos e ramificações

O alimentador estudado possui, além do ramo principal, seis ramificações, cada uma com características distintas que permite assim a comparação de dados para cada uma dessas ramificações. Novamente enfatiza-se a importância das ramificações para o estudo, uma vez que esta distribuição se aproxima da realidade, fortalecendo assim a relevância do

presente estudo. A Figura 3.2 ilustra novamente o modelo de alimentador utilizado, porém essa figura traz agora o esquema das barras do sistema.



Fonte: LOPES, L. Z. (2011). *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica*. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Figura 3.2 Alimentador com dimensões, cabos e numeração das barras.

Como se observa na Figura 3.2, o sistema é composto por 40 barras e em 18 delas existe a carga referente ao grupo de 72 residências alimentadas por aquela barra. Além disso, a figura trás as características de cada um dos ramos como a extensão dos condutores e o tipo de condutor utilizado.

O ramo principal corresponde à barra principal que sai da subestação, no modelo é representada pela barra número 1. Da subestação sai a corrente necessária para abastecer todas as cargas do sistema, desta forma, o ramo principal, representado no modelo como as ligações da barra 1 até a barra 4, deve ter a maior seção transversal do sistema, para suportar essa corrente total. A partir deste ramo principal existem seis ramificações para as cargas residenciais e comerciais que serão listadas a seguir:

A ramificação 1 apresenta três conjuntos de residências com médio consumo energético e por isso são atendidos por um transformador de 75 kVA. Cada conjunto é composto por 72 lotes e considera-se que todos podem ser representados pela curva de carga típica desse tipo de residência. A carga resultante de cada transformador possui fator de potência igual a 0,92.

A ramificação 2 contém o mesmo número de lotes da ramificação 1, contudo o fator de potência de suas cargas é considerado igual a 0,80 para fins de comparação.

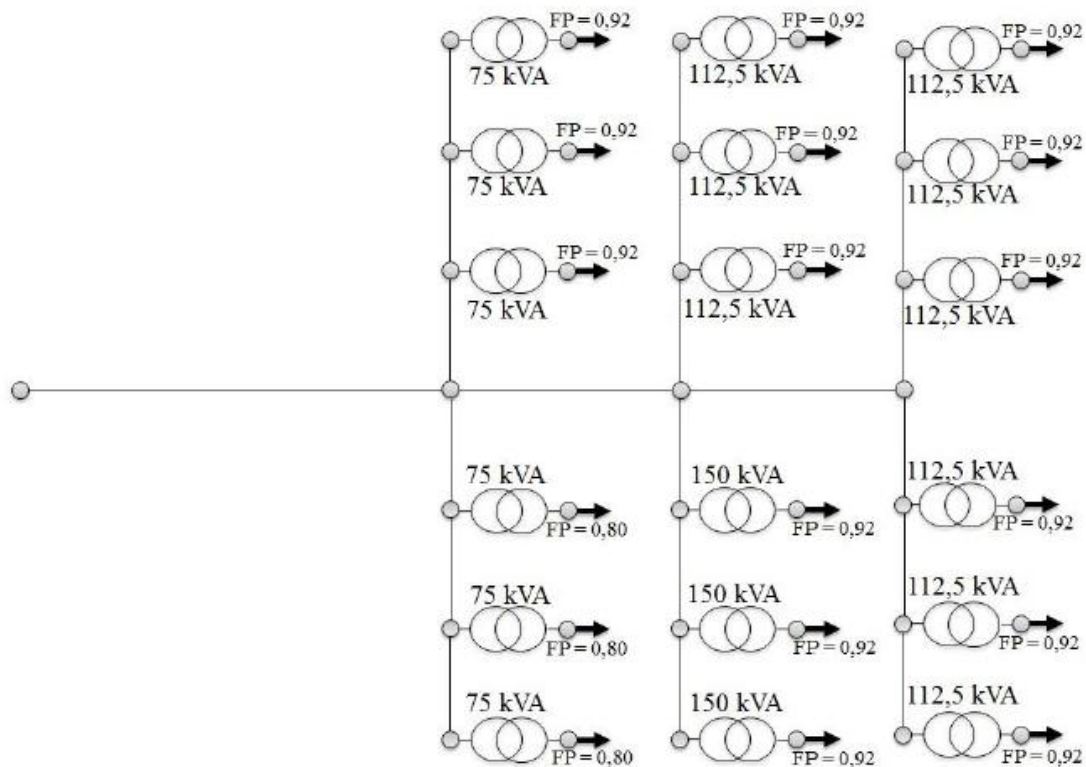
A ramificação 3 também possui três conjuntos residenciais, mas que demandam mais carga do que as unidades das ramificações anteriores, sendo consideradas portanto como residenciais de alto consumo. Novamente esses conjuntos têm 72 lotes em cada e estes apresentam o mesmo fator de potência da ramificação 1 (0,92). Os três transformadores presentes nessa parte do alimentador são de 112,5 kVA, uma vez que as cargas são maiores.

A ramificação 4 possuem as mesmas características da ramificação 3 (número de lote, fator de potência e curva de carga típica), porém apresentam transformadores de maior potência nominal.

A ramificação 5 também possui 72 lotes, porém desta vez as unidades consumidoras são comerciais, com a curva de carga bem distinta dos outros ramos. O transformador que alimenta cada conjunto tem potência nominal de 112,5 kVA e o fator de potência das cargas vale 0,92.

Finalmente, a ramificação 6 se comporta igualmente à ramificação 5, mas se difere por um pequeno detalhe: a seção transversal de seu condutor é mais robusta, isto é, apresenta menor impedância e maior ampacidade do que os condutores da ramificação 5.

A Figura 3.3 ilustra as características conforme listadas acima para cada um dos grupos de lotes.



Fonte: LOPES, L. Z. (2011). *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica*. Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Figura 3.3 Potência dos transformadores e fator de potência das cargas.

3.2.1.5 Hipóteses adotadas para o transformador

O alimentador aqui estudado servirá de base para os estudos computacionais da inserção de geração distribuída no sistema elétrico a partir da carga energética presente nos resíduos sólidos urbanos. Para tal, faz-se necessário a determinação de algumas hipóteses de forma a simplificar o modelo utilizado. Estas hipóteses, porém não afetam a veracidade e o valor dos resultados obtidos na simulação, uma vez que retratam situações reais que viabilizam uma visualização melhor e mais clara das situações propostas. Essas hipóteses foram consideradas quando da criação do modelo de alimentador LOPES (2011) e serão adotadas no presente estudo por se tratar do mesmo alimentador. Além disso, serão exploradas também hipóteses adicionais aplicáveis ao caso específico da geração a partir da biomassa.

3.2.1.5.1 Alimentador trifásico e simétrico

Nas simulações, os alimentadores são considerados trifásicos e equilibrados.

3.2.1.5.2 Tipos de carga

As cargas aqui estudadas são consideradas tipo PQ e concentrada, isto é, estão conectadas diretamente nas barras do alimentador. Essa hipótese não traz problemas ao sistema e mantém a importância dos resultados obtidos, além de reduzir a quantidade de barras, gerando resultados mais claros e mais facilmente analisados.

3.2.1.5.3 Balanceamento das cargas

O balanceamento de cargas também é uma hipótese adotada de forma a simplificar a análise do sistema, uma vez que apenas os componentes de sequência positiva serão considerados para os cálculos de fluxo de potência.

Nas simulações computacionais, as cargas serão consideradas como tendo o mesmo perfil nas três fases, diferentemente dos diversos alimentadores propostos pelo IEEE. Tal simplificação não acarreta grandes erros, e tal medida pode ser tomada sem interferir nos resultados (MWAKABUTA e SEKAR, 2007).

Em sistemas de potência que as cargas estão desbalanceadas, é preciso ajustá-las. Uma possibilidade é fazer a média aritmética das mesmas (MACIEL, 2009). Como as cargas têm o mesmo perfil nas três fases e o sistema é equilibrado, não se faz necessária a análise das componentes de sequência zero e negativa.

3.2.1.5.4 Resistência, reatância e distância entre fases

Em um sistema de distribuição é de fundamental importância observar a resistência, reatância e a distância entre as fases dos condutores que compõe esse sistema. Esses parâmetros são determinantes para as perdas no sistema, o aquecimento dos condutores, a determinação dos cabos utilizados, entre outros aspectos. Os parágrafos que seguem têm como base LOPES (2011) e indicam como foram determinados os valores destes parâmetros para obter o modelo de alimentador aqui utilizado.

Um modelo de alimentador deve retratar a realidade a fim de que seus resultados possam ser utilizados na prática. Uma característica que não pode ser desconsiderada é o comprimento dos condutores que formam esse alimentador. É esse comprimento que, de fato, fornece a resistência dos vários trechos da rede de distribuição, já que esta resistência é fornecida pelos fabricantes de cabos e são dadas em ohm por uma unidade de comprimento pré-estabelecida a uma dada temperatura (graus Celsius, por exemplo). Assim, calcula-se a resistência de cada trecho, simplesmente multiplicando-se o comprimento (L) desse pela resistência do cabo.

$$R(\text{ohm}) = r \left(\frac{\text{ohm}}{\text{km}} \right) * L(\text{km})$$

Ainda segundo LOPES (2011), devido os arranjos e como são transpostas as fases do sistema de distribuição são imprescindíveis os cálculos mais precisos da indutância mútua entre esses condutores. Todavia, no trabalho de caracterização do alimentador, as reatâncias das linhas de distribuição são calculadas de maneira análoga aos das resistências, como mostra a equação abaixo.

$$X(\text{ohm}) = x \left(\frac{\text{ohm}}{\text{km}} \right) * L(\text{km})$$

Essa simplificação é largamente utilizada em livros e artigos científicos que tratam do assunto, até porque a hipótese de sistema elétrico trifásico, simétrico e equilibrado permite sua resolução por fase e apenas com as componentes de sequência positiva. Além disso, nesses cálculos, já estão inclusas as indutâncias própria e a mútua entre os condutores.

3.2.1.5.5 Demais hipóteses

Além das hipóteses acima adotadas, fazem-se necessárias algumas hipóteses adicionais para que os cálculos e o código utilizado se apliquem às situações propostas sem que fuja da realidade e possa levar a resultados pertinentes e conclusões significativas. Essas hipóteses são listadas a seguir:

- Todo o lixo gerado pelos moradores de todas as residências em estudo é coletado e destinado à geração de energia elétrica a partir da biomassa desses resíduos;
- O lixo coletado com o fim de geração de energia tem a composição química típica, conforme mostrado no capítulo 2.
- Para fins de estudo da atuação do *smart grid*, considera-se ainda que todas as residências estejam equipadas com o novo medidor digital, permitindo a atuação com disjuntores para desligar parcialmente ou totalmente as cargas;
- A tensão da rede de distribuição é de 13,8 kV, valor padronizado no sistema elétrico brasileiro;
- Todo o estudo feito para o sistema proposto consideram que os equipamentos operam em regime permanente e a rede não apresenta chaveamentos;
- Há transformadores específicos para residências assim como para comércios, cada um com sua curva de carga;
- Os transformadores são modelados considerando-se suas impedâncias série, visto que, sendo o alimentador curto e nesse nível de tensão, a susceptância shunt pode ser desprezada;
- As cargas são do tipo potência constante.

3.2.2 Ferramenta computacional

3.2.2.1 MatPower

A resposta do sistema elétrico à inserção de potência gerada de forma distribuída deve ser analisada a partir do fluxo de carga do sistema antes e depois da geração. O fluxo de carga, conforme já enunciado no capítulo 2, dá como saída os valores de tensão e ângulo nas barras e os fluxos de potência ativa e reativa no sistema. Porém, esse cálculo do fluxo de carga deve ser realizado várias vezes para cada uma das horas, uma vez que existem rotinas para obterem-se os resultados máximos ou adequados para o sistema. Deste modo,

surge à necessidade de um programa que realize esse cálculo de forma rápida e que forneça os resultados de maneira clara e prática. Para isso, utilizou-se o programa MatLab (*Matrix Laboratory*) e o pacote de ferramentas MatPower.

Para gerar os diversos casos de fluxo de potência utilizou-se o pacote MATPOWER, distribuído de maneira livre e desenvolvido especialmente para esta função. Como ele foi projetado para ser utilizado por pesquisadores e educadores, o emprego desta ferramenta aconteceu de maneira prática, pois seus códigos são fáceis de usar e modificar. (ZIMMERMAN, MURILLO-SÁNCHEZ e THOMAS, 2011).

O MatPower roda o fluxo de carga a partir de pelo menos três dados de entrada: a matriz *bus*, a matriz *generator* e a matriz *branch*. A matriz *bus* é a matriz das barras do sistema, 40 no caso estudado. Ela contém várias informações como o tipo de cada barra e a carga presente nela. A matriz *generator* diz respeito às barras onde há geração. Nesta matriz são determinadas informações de cada barra de geração, como a tensão máxima e mínima e as potências geradas. A matriz *branch*, por sua vez, indica todas as ligações entre barras no sistema, informando ainda parâmetros dos condutores que realizam essas ligações.

Como resultado do fluxo de carga o MatPower fornece as tensões e seus respectivos ângulos em cada uma das barras do sistema, além da carga em cada um desses pontos. Fornece ainda uma outra matriz com os fluxos de potência ativa e reativa para cada uma das ligações entre as barras fornecidas na matriz *branch*.

3.2.2.2 Dados de entrada do programa

O código foi construído no MatLab e utilizando a ferramenta MatPower diversas vezes durante sua realização de forma a obter a análise desejada. Várias situações serão discutidas, para determinados arranjos e valores de geração distribuída, assim, alguns parâmetros de entrada foram necessários para que o programa possa realizar diversas simulações utilizando o mesmo código. Os parâmetros de entrada necessários para as simulações estão listados abaixo:

- Barras com geração – Esse parâmetro de entrada é utilizado na determinação de quais barras terão geração distribuída. Consiste em uma matriz que contém a

informação de existência de geração na barra k. Ocorrendo geração o elemento [1,k] da matriz deve ser igual a “1”, caso contrário, deve ser “0”;

- Concentração de metano – Este parâmetro pode variar de acordo com o processo de obtenção e de purificação do biogás. Nas simulações aqui estudadas este valor será igual a 80%;
- Poder calorífico inferior – Assim como a concentração de metano, esse parâmetro também pode variar de acordo com o biogás produzido, sua unidade é kcal/m³;
- Fator de conversão – O fator de conversão consiste na vazão de biogás que se tem para cada quantidade de lixo disponível. Sua unidade é $\frac{m^3}{h*kg}$;
- Número de lotes – Número de casas ou comércios contidos em cada uma das barras de carga, igual a 72;
- Quantidade de lixo por pessoa – Esta variável indica a quantidade de lixo por pessoa por dia, 2,45 kg. Porém pode ser alterada caso queira considerar que o lixo gerado por uma pessoa será acrescido pelo lixo gerado por pessoas dos grupos residenciais ou comerciais vizinhos;
- Eficiência do gerador – Eficiência do grupo motor-gerador utilizado, tem o seu valor definido pelo fabricante;
- Número de pessoas – Indica o número de pessoas considerado para cada um dos 72 lotes de cada grupo consumidor.

3.2.2.3 Limites utilizados

Para a realização da simulação, foi necessário estabelecer padrões de qualidade na distribuição da energia elétrica, pois a inserção de potência na rede elétrica pode gerar problemas como a sobrecorrente e sobtensão. Desta forma, deve-se respeitar limites para esses dados para que o sistema garanta um bom funcionamento.

Para a corrente o fator limitante foi de 1 pu, já que refletem a ultrapassagem da corrente nominal nos transformadores. O algoritmo calcula a corrente e com ela um percentual em relação à sua corrente nominal, assim, caso o valor seja superior a 1 pu, o programa interpreta isso como um valor crítico e utiliza o *smart grid* para corrigi-lo.

Para o critério da faixa de tensão em 380 V foi utilizada a margem estabelecida pela CEB em sua norma NTD 6.01 de dezembro de 2005, que determina que a tensão aceitável é entre 348 e 396 V. Já para a faixa de tensão em 13,8 kV, utilizou-se um conjunto de normas disponibilizado pela ANEEL com diretrizes para o bom relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradores) conectados aos sistemas de distribuição.²⁰ O Quadro 3.6 mostra as faixas de tensões adequadas para sistemas de distribuição. É importante ressaltar ainda que os valores limites de tensão apresentados no Quadro 3.6 representam aproximações dos resultados exatos para a conversão da faixa aceitável para a tensão para pu.

Quadro 3.6 *Faixas aceitáveis para a variação da tensão.*

Tensão de referência (TR)	Faixa aceitável de variação da tensão	Faixa aceitável de variação da tensão (pu)
13,8 kV	$12,83 \text{ kV} \leq \text{Tensão} \leq 14,49 \text{ kV}$	$0,930 \text{ TR} \leq \text{Tensão} \leq 1,050 \text{ TR}$
380 V	$348 \text{ V} \leq \text{Tensão} \leq 396 \text{ V}$	$0,915 \text{ TR} \leq \text{Tensão} \leq 1,040 \text{ TR}$

Fonte: ANEEL (2008) e CEB (2005).

Desta forma, para o presente trabalho será considerado como dentro da faixa de tensão adequada as tensões entre 0,915 e 1,05 pu.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Determinação da geração a partir de RSU

3.3.1.1 Quantidade de lixo gerada

Conforme estudado no capítulo 2, os resíduos sólidos urbanos têm uma carga energética que depende dos materiais que os compõe e da quantidade de resíduos que se pode obter. Assim, para encontrar uma estimativa da geração distribuída, faz-se necessário um levantamento da quantidade de lixo que é gerada diariamente no Brasil. Foi explicitado ainda o panorama dos resíduos sólidos no Brasil, mostrando as médias nacionais e a do Distrito Federal para a geração de lixo e sua coleta. Nesse ponto, adicionalmente, propõe-se um terceiro dado de geração de resíduos sólidos como base de cálculo para os estudos seguintes, a quantidade de geração na cidade de Brasília.

²⁰ Os valores foram retirados do documento “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, módulo 8 – Qualidade da energia elétrica, 2008”.

A proposta se baseia no fato que nos últimos anos a quantidade de lixo gerada nas capitais brasileiras se aproximou da média dos norte-americanos. Conforme matéria no jornal Estadão, este aumento se deu devido à melhoria do poder de compra do brasileiro, que reflete diretamente na geração de lixo da população. Segundo Carlos Roberto da Silva Filho, diretor executivo da ABRELPE, a produção de lixo em capitais como Brasília caminha para se tornar próxima aos 2,8 kg por habitante/dia. Reportagem da Rede Bandeirantes, de outubro de 2012, afirma que dados recolhidos do Ministério das Cidades mostram que são gerados 2,2 kg por habitante/dia em Brasília, média também superior à apresentada a nível nacional. Ainda confirmando a tendência de geração na cidade de Brasília, reportagem do Correio Braziliense de 2010, afirma que cada morador da capital produziu, em média, 2,4 kg por habitante/dia de resíduos sólidos urbanos, média ainda superior quando analisados os bairros Asa Sul, Asa Norte e Sudoeste.

Para este estudo, portanto, considerou-se que a média da capital federal pode refletir melhor a realidade da geração proposta, uma vez que sua aplicação mais eficiente se daria exatamente em condomínios ou quadras de cidades onde a geração de lixo habitualmente é maior e a média aqui apresentada representaria melhor essa realidade. Devido à existência de três valores próximos, porém divergentes, adotou-se a média desses valores como suficiente para representar a geração de lixo para a simulação da geração distribuída. Assim, para o cálculo da geração de biogás e, conseqüentemente, da potência gerada com biomassa, será utilizado o valor de 2,45 kg de lixo por habitante/dia.

[3.3.1.2 Produção de biogás a partir de RSU](#)

O capítulo 2 discorreu a respeito das técnicas mais apropriadas para a conversão da biomassa em energia elétrica, citando as quatro mais desenvolvidas e viáveis no cenário atual. Para a simulação aqui proposta, porém, deve-se determinar precisamente qual o método utilizado para a geração de forma a se obter uma formulação matemática da quantidade de potência gerada pelo sistema. Sendo assim, a tecnologia escolhida para simular sua inserção no sistema de geração distribuída foi a Tecnologia Dranco, uma vez que essa tecnologia pode ser utilizada em pequena escala e não precisa de aterros sanitários ou controlados, pois a produção do biogás é realizada no biodigestor, equipamento com dimensões viáveis com o sistema aqui proposto. Adicionalmente, a Tecnologia Dranco tem como grande vantagem à questão ambiental, pois evita a emissão de metano, entre outros

gases poluentes, possibilitando a comercialização dos créditos de carbono provenientes da transformação do metano em dióxido de carbono durante a queima do biogás. O Quadro 3.7 faz uma comparação das quatro tecnologias apresentadas, refletindo a vantagem ambiental e a quantidade de lixo necessária para gerar 1 MWh para cada um dos casos.

Quadro 3.7 Comparativo entre as tecnologias para conversão da biomassa.

	Gás do lixo (GDL)	Incineração	DRANCO	Biomassa-energia-materiais (B.E.M.)
Tonelada de lixo para gerar 1 MWh	4,2	1,3	2,8	2,1
Emissão evitada pelo consumo do lixo (tCO ₂ eq/MWh)	5,41	1,50	3,61	0,55
Emissão evitada pela substituição do gás natural (tCO ₂ eq/MWh)	0,449	0,449	0,449	0,449
Emissão evitada de (tCO ₂ eq/MWh) total	5,87	1,95	4,06	1,0

Fonte: TOLMASQUIM, M. T. 2003. *Fontes renováveis de energia no Brasil*.

Sendo assim, se torna necessário definir uma formulação matemática de forma a obter a quantidade de biogás que é gerado a partir de determinada quantidade de lixo, pois a quantidade e a vazão de biogás obtido no biodigestor é o que será determinante para a potência gerada no conjunto motor-gerador.

Utiliza-se nesse trabalho a taxa citada na dissertação de mestrado de Izabel Cristina Galbiatti Vespa com o título “Características minerais e energéticas do lixo urbano em processos de compostagem e biodigestão anaeróbica”. VESPA (2006) utilizou-se dos resíduos sólidos do município de São José do Rio Preto, no estado de São Paulo, para fazer um estudo na capacidade do lixo em gerar biogás. Como conclusão, chegou-se na relação que para se gerar um metro cúbico de biogás são necessários 7,692 kg de resíduos sólidos urbanos, ou seja, 0,13 m³ de biogás por kg de lixo. Esta relação aqui discutida servirá, então, para determinar a quantidade de biogás disponível para a geração na simulação. Cabe ressaltar que esse biogás gerado deverá ser armazenado e, a partir de uma torneira reguladora, sairá da câmara de armazenamento com uma vazão pré-determinada, para ser queimado, gerando energia.

3.3.1.3 Poder calorífico do biogás

Uma das características mais importante de um gás é que apresenta a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa ou volume no caso de gases é denominada de poder calorífico, também conhecido como poder de queima, calor de combustão ou potência calorífica. Quando se determina a composição de um combustível, verifica-se que o mesmo é geralmente composto por carbono, hidrogênio e oxigênio. Quando há a combustão do mesmo, existe a formação de água como produto dessa reação devido à presença de hidrogênio. Essa água pode estar no estado líquido, gasoso ou ainda em ambos. Caso a água formada na combustão se condense é obtido o poder calorífico do combustível superior (PCS), mas se a água estiver no estado gasoso é obtido o poder calorífico inferior (PCI), em consequência disso o biogás também terá ambos os poderes caloríficos. De acordo com a concentração de metano no biogás o poder calorífico pode variar entre 4,95 a 7,92 kWh/m³ para o poder calorífico inferior e superior. Porém, após o devido tratamento, o biogás pode atingir um poder calorífico próximo a 10.000 kcal/m³ (COSTA, 2006).

Quadro 3.8 *Poder calorífico de diversos gases.*

Gás	Poder Calorífico (kcal/m ³)
Gás canalizado (RJ)	3.900
Gás canalizado (SP)	4.700
Gás de refinaria	8.800
Gás natural úmido	10.454
Gás Natural seco	9.256
GLP	11.750
Biogás (60% de CH ₄)	5.140
Biogás (95% de CH ₄)	8.130

Fonte: MME, 2001 e AVELLAR, 2001.

O poder calorífico encontrado na literatura varia muito, principalmente com a concentração de metano na sua composição e encontram-se variações enormes, com uma maior incidência de valores na faixa de 5.000 até 8.500 kcal/m³. No capítulo 2, foi mostrada a diferença entre a composição do biogás antes e depois do processo de purificação, chegando a até 80% de metano depois do processo, aumentando assim o seu poder calorífico razoavelmente, já que o metano tem participação enorme nessa característica do

gás. O Quadro 3.8 apresenta o poder calorífico de diversos gases, entre eles o biogás com 60% e com 95% de metano.

Para utilização na simulação, foi considerado o biogás com um sistema de pré-tratamento de forma a elevar o seu poder calorífico, e assim, tomou-se dentro da faixa de poder calorífico encontrada, valores otimistas de forma a obter uma geração mais eficiente e resultados mais significativos na resposta do sistema à inserção de geração distribuída dessa natureza. SANTOS (2011) utiliza, em artigo apresentado no II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, o valor do poder calorífico do biogás como 7.000 kcal/m³, e este será o valor adotado para fins de cálculo de geração de energia elétrica nesse trabalho, uma vez que pertence à faixa de valores encontrados e, portanto, considerou-se confiável para a análise proposta.

3.3.1.4 Potência gerada a partir dos resíduos sólidos urbanos

Para o estudo da quantidade de potência gerada nas diversas situações, tomou-se como base o estudo feito por PECORA (2008), pesquisadora do Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) da Universidade de São Paulo (USP). O estudo tem como título “Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário” e, apesar do estudo de caso se referir a aplicações em aterros, a determinação da potência gerada se aplica ao caso aqui proposto uma vez que se distingue apenas na maneira de se obter o biogás. Desta forma, serão utilizadas as formulações presentes no trabalho acima citado, porém com as devidas adaptações para o biogás gerado no biodigestor a partir da tecnologia DRANCO.

Será então adotado o grupo motor gerador de ciclo Otto, visto a possibilidade de rápida instalação e facilidade de manutenção, por ser uma tecnologia já existente no país. Este motor teria então a potência nominal determinada pela quantidade e composição dos resíduos sólidos coletados, da eficiência do biodigestor em produzir o biogás a partir do lixo e da vazão determinada para esse biogás.

A Figura 3.4 ilustra, como exemplo, um motor ciclo Otto adaptado de potência nominal de 200 kW para realização de testes na Central de Tratamento de Resíduos de Caieiras, no

estado de São Paulo, onde seria utilizado para gerar energia elétrica a partir do biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos.

A determinação da potência final utilizada para cada simulação será distinta para cada caso de interesse. Isso será possível graças à câmara de armazenamento do biogás. Depois de o resíduo sólido gerar o biogás, a vazão será escolhida de forma que possa gerar o dia inteiro ou apenas em alguns períodos do dia, e alterando essa vazão, haverá mudança na potência gerada no motor gerador.



Fonte: FIGUEIREDO, N. J. V., Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso. São Paulo, 2007.

Figura 3.4 *Grupo motor gerador utilizado para conversão de biogás em energia.*

A formulação matemática para a potência gerada foi a utilizada em PECORA (2008) e considerando todos os fatores já analisados nesse trabalho, como o poder calorífico do biogás, o rendimento do motor, a concentração de metano no biogás, entre outros aspectos. A fórmula a seguir, retirada do mesmo trabalho, indica a potência final fornecida pelo grupo motor gerador utilizado nesta simulação.

$$Pot_{Gerada} = \frac{\dot{Q}_{Biogás} * \%_{Metano} * PCI}{860} * \eta \quad (1)$$

Nessa fórmula, $\dot{Q}_{\text{Biogás}}$ indica a vazão de biogás que será disponibilizada para o motor gerador de forma que a sua queima possa gerar a energia elétrica. A variável $\%_{\text{Metano}}$ reflete a concentração de metano no biogás utilizado e, conforme estudado no capítulo 2, terá o valor de 80% para as simulações realizadas no presente estudo. Esta concentração toma como hipótese a purificação do biogás por unidades filtradoras, procedimento já estudado anteriormente. Em relação ao poder calorífico inferior (PCI), o valor utilizado será o de 7000 kcal/m³ de biogás, parâmetro que foi definido no item 3.3.1.3 (Poder calorífico do biogás) e servirá de base para a determinação da potência gerada. Para a variável η , o valor utilizado foi de 28% e reflete a eficiência do gerador utilizado, tem como base os dados do fabricante (LANDSET). Finalmente, a constante 860 na fórmula diz respeito à conversão da unidade kcal, presente na vazão do biogás, para kW.

A fórmula (1), apesar de ser válida, necessita de adaptação para o caso proposto nesse trabalho, de forma que relacione a quantidade de resíduos com a potência final gerada, abrangendo todas as variáveis relacionadas. Apresenta-se agora a fórmula utilizada para determinar a quantidade de lixo gerada em um dia que será utilizada em cada gerador.

$$\text{Quantidade}_{\text{lixo}} = N_{\text{Pessoas}} * N_{\text{Lotes}} * \text{Quantidade}_{\text{lixo/pessoa}} \quad (2)$$

A fórmula (2) considera todo o lixo gerado em um condomínio, bloco ou qualquer conjunto habitacional ou comercial que terá o lixo utilizado para geração de energia elétrica. Assim, N_{Pessoas} , presente na fórmula, indica o número de pessoas por lote e N_{Lotes} reflete o número de lotes participantes deste grupo habitacional ou comercial. A variável $\text{Quantidade}_{\text{lixo/pessoa}}$ é a quantidade média de lixo gerada por um habitante em cada dia, em kg. Quando multiplicados diretamente esses fatores, tem-se como resultado a quantidade de lixo gerada por todo aquele conjunto de lotes em um dia, que será disponibilizado para o biodigestor para a produção de biogás.

Com a quantidade de lixo gerada já determinada, é possível então fazer a formulação matemática da potência gerada, utilizando como base a fórmula já citada presente em PECORA (2008). Com as devidas adaptações e os parâmetros citados no presente capítulo, chega-se a seguinte fórmula:

$$Pot_{Gerada} = \frac{Quantidade_{lixo} * Fator_{convers\~{a}o} * \%Metano * PCI}{860} * \eta \quad (3)$$

A fórmula (3) mantém a mesma forma da apresentada anteriormente, porém a vazão do biogás $\dot{Q}_{Biog\acute{a}s}$ foi substituída por $Quantidade_{lixo} * Fator_{convers\~{a}o}$ de forma a se adaptar melhor aos dados obtidos nesse estudo. O fator de conversão utilizado é responsável por transformar a quantidade de lixo, em kg, na vazão em m³/h. Como já elucidado no item 3.3.1.2, são gerados 0,13 metros cúbicos de biogás a partir de 1 kg de resíduos sólidos urbanos. Portanto, em um dia, para essa quantidade de lixo, tem-se uma vazão de $\frac{0,13}{24}$ m³/h. Desta forma, a vazão base a ser utilizada será de $\frac{0,13}{24}$ m³/h e a quantidade base será de 1 kg, gerando um fator de conversão determinado pela seguinte fórmula.

$$Fator_{convers\~{a}o} = \frac{Vaz\~{a}o_{base}}{Quantidade_{base}} = \frac{\frac{0,13}{24}}{1} = 0,0054167 \frac{m^3}{h * kg} \quad (4)$$

Os outros parâmetros utilizados na fórmula (3) serão mantidos com os valores citados anteriormente: concentração de metano igual 80%, poder calorífico inferior do biogás igual a 7000 kcal/m³ e rendimento do motor igual a 28%.

Além da análise quantitativa proposta acima, deve-se levar em consideração a característica do motor utilizado para determinar a potência reativa gerada também no sistema. Para essa finalidade foi utilizado uma análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução para aplicação em geração distribuída realizada pelo Departamento de Sistemas de Energia Elétrica e o Departamento de Controle e Sistemas de Energia, da Universidade Estadual de Campinas, com o intuito de verificar os impactos desses geradores no desempenho de redes de distribuição.

Nesse trabalho, algumas questões técnicas foram analisadas, como o perfil de tensão de regime permanente, perdas elétricas, estabilidade de tensão, estabilidade transitória, afundamento de tensão devido às faltas desequilibradas e correntes de curto-circuito. Os resultados dessa análise mostraram que a melhor decisão do ponto de vista técnico deve ser tomada baseada nas características da rede e dependerá da maior restrição operativa da rede referente ao aumento da capacidade de geração distribuída (FREITAS et al., 2005).

É afirmado que, no caso de geradores síncronos conectados em redes de distribuição, não há consenso entre diferentes guias e práticas adotadas por concessionárias distintas sobre qual é a melhor filosofia de controle a ser adotada para o sistema de excitação. Tipicamente, há duas formas de controle que podem ser empregadas: tensão constante ou fator de potência (potência reativa) constante (FREITAS et al., 2005).

No caso de geradores distribuídos, é adotada uma estratégia de controle de fator de potência por produtores independentes para evitar o pagamento de penalidades devido ao consumo de potência reativa ou para maximizar a geração de potência ativa. Neste caso, usualmente, a operação com fator de potência unitário é adotada.

Como conclusão desse estudo, chegou-se que do ponto de vista de perfil de tensão de regime permanente, estabilidade de tensão e estabilidade transitória, o uso de geradores síncronos controlados por tensão leva a um melhor desempenho da rede e permite que a capacidade máxima permissível de geração distribuída seja mais elevada. Porém, caso seja de interesse do governo e/ou concessionárias, as penalidades impostas a este tipo de geradores durante operação indutiva devem ser eliminadas. De maneira geral, o uso de geradores síncronos com fator de potência constante não é a pior opção do ponto de vista do desempenho global do sistema (FREITAS et al., 2005).

Assim para este trabalho, utilizando-se então das afirmações sobre gerador em uma geração distribuída e considerando a decisão de adotar um motor síncrono para a geração, adotou-se o fator de potência constante e equivalente a 1. Com essa medida, a geração constitui-se somente de potência ativa em um regime permanente. Dessa maneira, essa colocação será utilizada como instrumento de geração para o estudo do alimentador e do fluxo de potência.

3.3.2 Simulação da inserção de GD a partir de resíduos sólidos urbanos

3.3.2.1 Dados de saída do programa

O código utilizado nas simulações roda o fluxo de carga para todas as horas do dia e, caso algum dos limites seja alcançado em alguma hora, utiliza-se do *smart grid* para diminuir a carga e eliminar o problema. A cada hora, portanto, o programa gera uma linha em uma

matriz que demonstra a situação do sistema elétrico antes e depois da atuação do *smart grid*. Ao finalizar o programa, o código gera uma matriz com 24 linhas que informa qual era a situação naquela hora e como foi a atuação do *smart grid*. Abaixo são listadas todas as saídas do programa:

- Hora (24h) – Informa em que hora do dia as informações foram obtidas;
- Valor máximo da corrente sem SG – informa a maior corrente obtida para a situação daquela hora, antes do *smart grid* atuar;
- Barra inicial – Informa de que barra essa maior corrente partiu;
- Barra final – Informa de que barra essa maior corrente partiu;
- Valor mínimo da tensão sem SG – informa a menor tensão obtida para a situação daquela hora, antes do *smart grid* atuar;
- Valor máximo da corrente com SG – informa a maior corrente obtida para a situação daquela hora, depois do *smart grid* atuar;
- Valor mínimo da tensão com SG – informa a menor tensão obtida para a situação daquela hora, depois do *smart grid* atuar;
- Limite alcançado – Informa qual limite foi alcançado: “0” se nenhum limite foi alcançado, “1” se foi algum dos limites de tensão e “2” se houve sobrecorrente;
- Carga antes do SG – Informa qual era a carga ativa na barra em que o limite foi alcançado antes da atuação do *smart grid*;
- Carga após o SG – Informa qual a carga ativa na barra após a atuação do *smart grid*. Se houve algum limite alcançado e o *smart grid* atuou, nessa variável será possível observar quanto da carga foi desligada para que o sistema voltasse ao funcionamento normal.

3.3.2.2 Rotinas e algoritmo

As rotinas utilizadas serão divididas em três, pois, apesar de o número de simulações realizadas serem bem superior, a maioria das simulações partiu do mesmo código, porém algumas utilizaram uma rotina distinta. Assim, dividiu-se em três rotinas diferentes que

abrangem todas as simulações realizadas. Para cada hora do dia é realizada a mesma rotina e assim geram-se 24 resultados distintos, para cada tipo de unidade consumidora.

3.3.2.2.1 Rotina 1 – Determinação da quantidade máxima de lixo

Para esta simulação foi utilizado um algoritmo que calcula a quantidade máxima de lixo (por pessoa por dia) que pode ser empregada para geração de energia elétrica sem que o sistema tenha problemas de níveis de tensão e corrente, conforme ilustra a Figura 3.5.

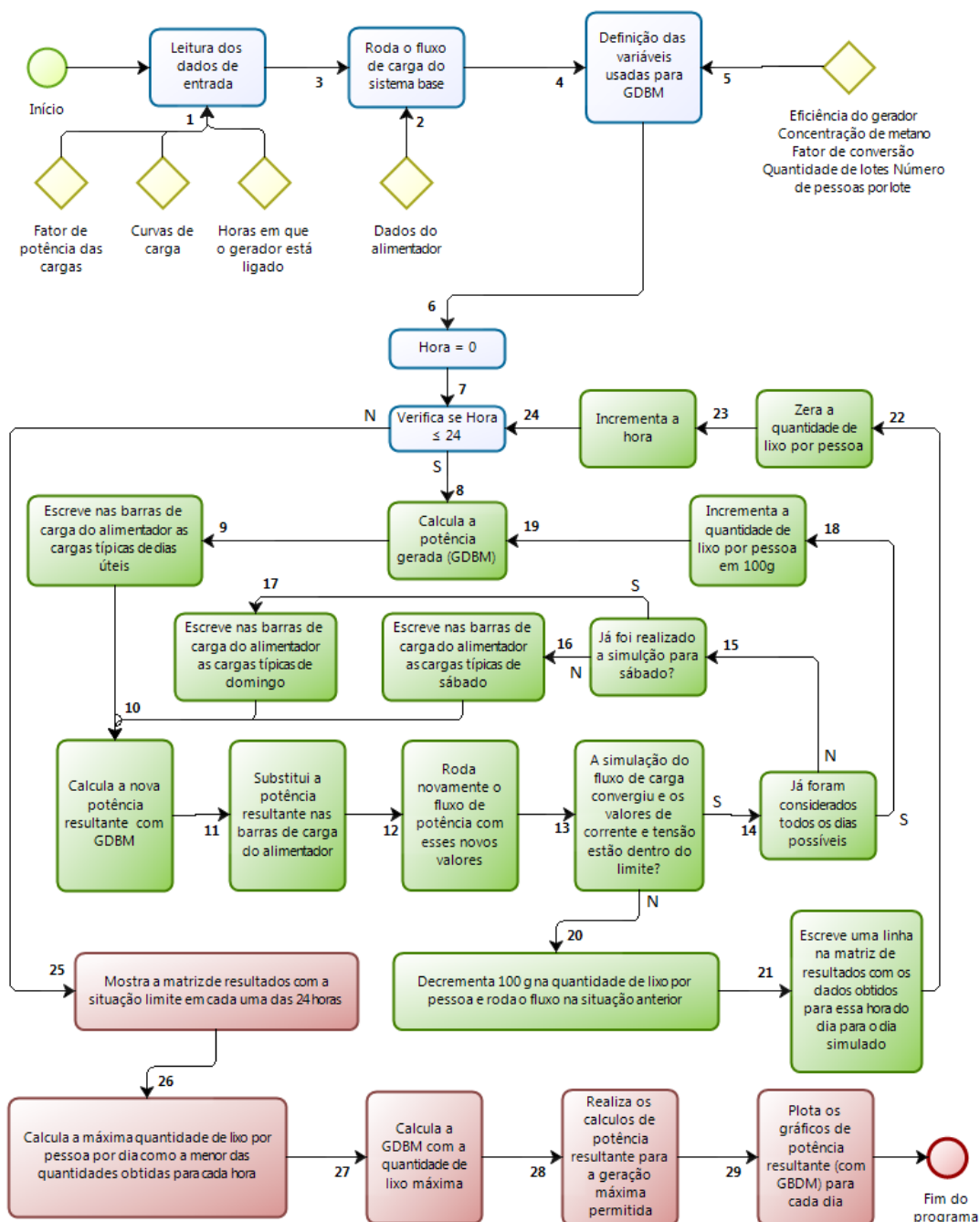


Figura 3.5 Rotina para determinar a quantidade máxima de lixo.

A Figura 3.6 a seguir apresenta a legenda do fluxograma mostrado na Figura 3.5. Para o fluxograma em estudo foram utilizadas quatro cores de forma a dividir a função de cada etapa do processo.

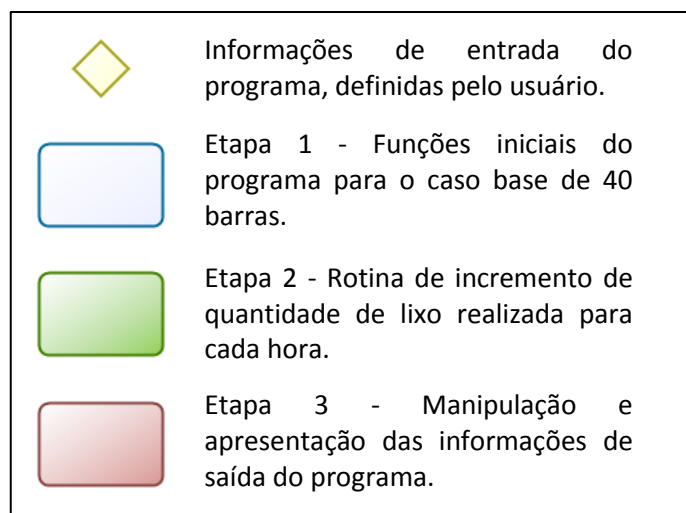


Figura 3.6 *Legenda utilizada no fluxograma da Figura 3.5.*

Utiliza-se agora da numeração associada a cada ligação de blocos para se explicar o funcionamento do algoritmo desenvolvido.

- ❖ Etapa 1 – Nessa etapa é realizada a leitura dos dados de entrada do programa, a seta (1) indica a leitura pelo programa das variáveis “fator de potência das cargas”, “curvas de carga” e “horas em que o gerador está ligado”. Após essa leitura o programa chama o caso base do alimentador estudado (2) e realiza o fluxo de carga a partir dos dados lidos (3). O caso base, conforme já estudado, contém as informações das cargas em cada uma das 40 barras, além das informações de geração e os dados de cada um dos condutores associados ao desenho do alimentador. Após rodar o fluxo de carga para o caso base, é feita a declaração de todas as variáveis utilizadas para se determinar a potência da geração distribuída a partir de biomassa (resíduos sólidos urbanos). A seta (4) indica a declaração dos seguintes parâmetros, que são fornecidos pelo usuário: eficiência do gerador, concentração de metano, fator de conversão, quantidade de lotes e número de pessoas por lote (5). Feitas todas as leituras de dados e realização do fluxo de potência do caso base, zera-se o contador das horas (6) e então o programa entra na rotina a ser realizada para todas as horas do dia (7).

- ❖ Etapa 2 – Nessa segunda etapa é realizada toda a rotina de incremento e verificação da validade dos dados para o incremento de quantidade de lixo a ser gerada. A segunda etapa inicia-se verificando se o cálculo já foi feito para todas as 24 horas do dia, se não foi feito começa a rotina de determinação da quantidade máxima de lixo permitida. Para cada hora é realizado então o procedimento que segue: calcula-se a potência da geração a partir da biomassa (8) e, a partir das leituras realizadas na etapa 1, escreve-se nas barras de carga a demanda típica para dias úteis para cada tipo de unidade consumidora (9). Faz-se então a potência resultante como a diferença entre a demanda para aquele horário e a geração calculada (10) e reescreve-se a carga em cada barra como essa potência resultante (11). Neste ponto, a carga constante em cada barra é a demanda menos a geração, ou seja, a geração entra como uma carga negativa, sendo esta a melhor forma para o programa MatPower simular a geração distribuída aqui estudada. Agora considerando a geração distribuída, é realizado o novo fluxo de potência (12) e verificado se algum dos limites estipulados para tensão e corrente foi atingido (13).

Caso nenhum desses limites seja atingido, ocorre a checagem para determinar se ainda falta realizar a simulação para os outros dias estudados (14). Se positivo, o programa segue para a realização dos outros dias (15). Caso o próximo dia a ser considerado é o sábado, realiza-se a substituição das cargas nas barras para a demanda típica do sábado (16), caso já tenha sido feito a rotina para sábado, a demanda é substituída pela demanda típica do domingo (17). Assim, tanto para o sábado quanto para o domingo, os passos (10) a (14) são repetidos de forma a determinar o limite para cada dia da semana. Após a realização do fluxo de carga para os três tipos de dias possíveis e nenhum deles tendo atingido os limites, é feito o incremento de 100 g na quantidade de lixo (18) e o procedimento volta a se repetir para o novo valor de quantidade de lixo (19).

Por outro lado, porém, se algum dos limites for atingido, é feito um decremento de 100 g na quantidade de lixo gerada de forma a voltar à situação anterior, ou seja, a situação limite onde se pode gerar a partir da quantidade de lixo obtida sem que o sistema tenha valores fora dos limites estabelecidos. Após o decremento é realizado novamente o fluxo de carga para essa nova situação (20) e os dados referente a esse limite atingido para a hora em curso são escritos na matriz de saída do sistema (21). Com isso,

encontra-se o valor limite para essa hora e pode-se partir para a próxima hora a ser considerada. Para isso deve-se zerar o valor da quantidade de lixo por pessoa por dia (22) e fazer o incremento da hora (23), para então verificar novamente se já foram realizadas todas as horas possíveis (24).

- ❖ Etapa 3 – A terceira etapa acontece quando a rotina de incremento já foi realizada para as 24 horas do dia, fornecendo em cada hora o resultado limite para que a geração distribuída aconteça sem prejudicar o sistema. Assim, verificado que todas as horas já foram consideradas, o resultado final é fornecido ao usuário em forma de matriz, com 24 linhas, indicando informações sobre o limite alcançado para cada uma das horas (25). Cada hora tem então uma quantidade de lixo que pode ser utilizada para geração sem comprometer o sistema, porém deve-se tomar o mínimo desses valores como a quantidade de lixo final determinada (26), uma vez que essa é a única quantidade que garante que não haverá problemas no sistema em nenhuma hora do dia. Determinado esse valor, pode-se calcular então o valor da geração para todo o dia (27). Finalizando, são realizados todos os cálculos de potência resultante, geração durante todo o dia, suprimento da carga pela geração distribuída, entre outros (28) e os resultados, já com a geração distribuída máxima, são plotados e fornecidos ao usuário para cada um dos dias (29), encerrando assim o programa.

3.3.2.2.2 Rotina 2 – Impactos da geração distribuída

Nessa simulação foram utilizados os valores reais para a quantidade de lixo gerada para verificar como o sistema de distribuição reage a essa geração. Nessa rotina estão contempladas todas as simulações onde são consideradas barras diferentes gerando energia, geração em apenas algumas horas do dia, geração com o sistema em sobrecarga, sistema sem geração distribuída, entre outras.

Nessa rotina já está inclusa a atuação do *smart grid* de forma a corrigir fatores que eventualmente não estejam de acordo com os limites pré-estabelecidos. A Figura 3.7 traz o fluxograma do funcionamento da rotina básica comum para todas as simulações dessa etapa.

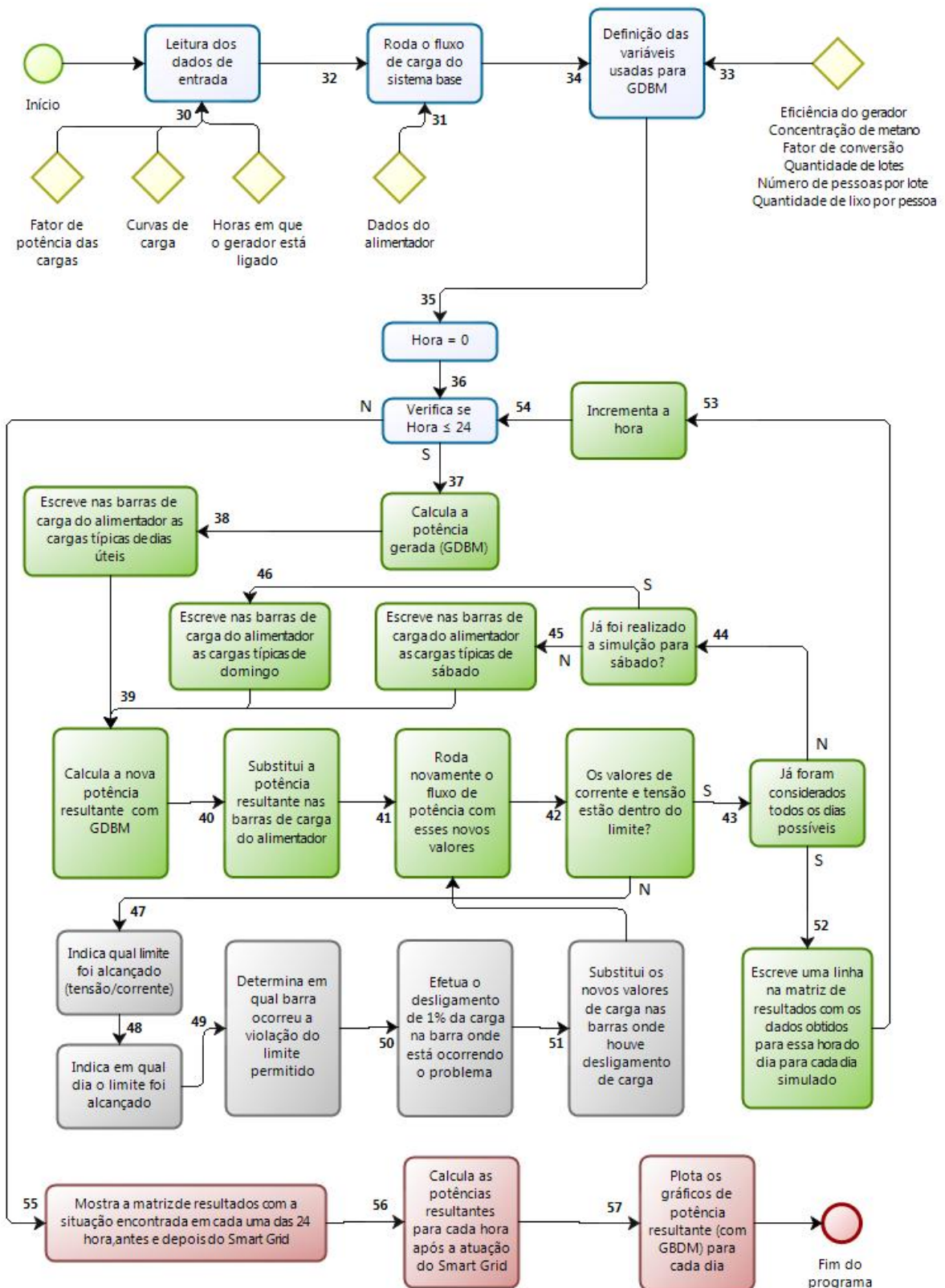


Figura 3.7 Rotina para simular o impacto da GD na rede de distribuição.

Novamente utiliza-se a Figura 3.8 para apresentar a legenda da Figura 3.7 para cada um dos blocos apresentados de acordo com as etapas de processamento do algoritmo e

posteriormente é feita a explicação da rotina utilizada a partir na numeração das setas de ligação dos blocos.

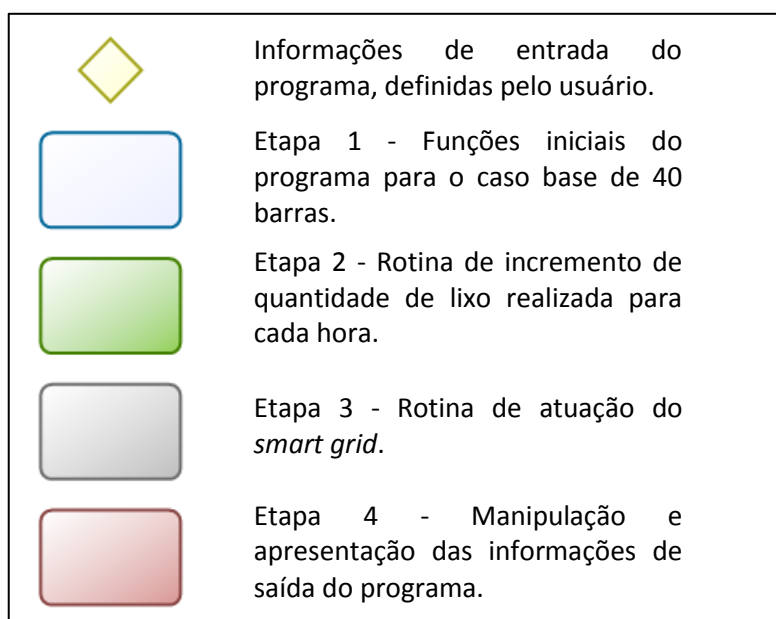


Figura 3.8 *Legenda utilizada no fluxograma da Figura 3.7.*

- ❖ Etapa 1 – Essa etapa é semelhante à etapa 1 descrita no item 3.3.2.2.1 para a simulação, sendo assim, a descrição das funções de (30) a (36) são exatamente iguais às funções de (1) a (7), se diferem apenas pela declaração de uma variável a mais. No passo (34), quando é feita a declaração das variáveis para o cálculo da potência total gerada a partir de RSU, nessa simulação é declarada a quantidade de lixo por pessoa por dia como sendo 2,45 kg. Essa definição é a quantização real da produção de lixo e será utilizada nas simulações de forma a obter a resposta do sistema de acordo com a realidade.
- ❖ Etapa 2 – Nessa etapa não há incremento de quantidade de lixo, assim, as simulações que utilizam esse algoritmo partem do princípio que a quantidade de lixo por pessoa gerada em um dia é fixa e igual a 2,45 kg. A segunda etapa inicia-se verificando se o cálculo já foi feito para todas as 24 horas do dia, se não foi feito começa a rotina para observar a resposta do sistema à geração distribuída. Para cada hora é realizado então o procedimento que segue: calcula-se a potência da geração a partir da biomassa (37) e, a partir das leituras realizadas na etapa 1, escreve-se nas barras de carga a demanda típica para dias úteis para cada tipo de unidade consumidora (38). Faz-se então a potência resultante como a diferença entre a demanda para aquele horário e a geração calculada

(39) e reescreve-se a carga em cada barra como essa potência resultante (40). Neste ponto, a carga constante em cada barra é a demanda menos a geração, ou seja, a geração entra como uma carga negativa, sendo esta a melhor forma para o programa MatPower simular a geração distribuída aqui estudada. Agora considerando a geração distribuída, é realizado o novo fluxo de potência (41) e verificado se algum dos limites estipulados para tensão e corrente foi atingido (42).

Caso nenhum desses limites seja atingido, ocorre a checagem para determinar se ainda falta realizar a simulação para os outros dias estudados (43). Se positivo, o programa segue para a realização dos outros dias (44). Caso o próximo dia a ser considerado é o sábado, realiza-se a substituição das cargas nas barras para a demanda típica do sábado (45), caso já tenha sido feito a rotina para sábado, a demanda é substituída pela demanda típica do domingo (46). Assim, tanto para o sábado quanto para o domingo, os passos (39) a (43) são repetidos de forma a determinar a resposta do sistema para todos os dias da semana. Após a realização do fluxo de carga para os três tipos de dias possíveis e nenhum deles tendo atingido os limites, é escrita uma linha na matriz de saída do sistema para cada um dos dias estudados informando as tensões e correntes na situação simulada (52) e então posteriormente realiza-se o incremento da hora (53) e a verificação se todas as horas do dia já foram simuladas (54).

- ❖ Etapa 3 – Caso um dos limites seja alcançado, porém, o *smart grid* é chamado a atuar corrigindo o sistema de forma que ele continue funcionando sem o problema, para isso é necessário que alguma carga seja cortada, prejudicando um consumidor, mas preservando o sistema ligado, uma vez que poderia ser desligado pela proteção devido a tensões e correntes fora do padrão. Quando o *smart grid* recebe a informação de que um dos limites foi alcançado, ele informa qual foi o limite violado (47) e em que dia aconteceu o problema (48). Caracterizado o problema, o *smart grid* informa então qual barra está com sobrecorrente, subtensão ou sobretensão (49), e realiza o corte de carga nessa barra. O corte da carga se reflete no código como uma diminuição de 1% na carga dessa barra (50), esse fator se dá principalmente porque esse estudo deseja determinar limites e padrões de injeção de potência no sistema, por isso o fator de 1% permite encontrar com certa precisão a carga que deve ser cortada para eliminar o problema na rede de distribuição. Essa nova carga é então substituída na barra que estava com problema (51) e então o sistema volta para o passo (41), que roda

novamente o fluxo e verifica se há ultrapassagem dos limites estabelecidos, dessa forma, o sistema fica preso ao *smart grid* até que este corrija as cargas de forma a manter as tensões e correntes dentro da normalidade.

- ❖ Etapa 4 – A quarta etapa ocorre quando as outras etapas já foram realizadas para as 24 horas do dia, fornecendo em cada hora o resultado de tensões e correntes do sistema, com ou sem a atuação do *smart grid*. Assim, verificado que todas as horas já foram consideradas, o resultado final é fornecido ao usuário em forma de matriz, com 24 linhas para cada dia, indicando informações sobre tensão e corrente para cada uma das horas (55) antes e depois da atuação do *smart grid*. Após o fornecimento desses resultados, são calculadas as potências resultantes (demanda menos a geração distribuída) para cada uma das unidades consumidoras em cada um dos horários, além da porcentagem da carga atendida pela geração a partir de RSU (56). Os resultados dessas potências resultantes são plotados então e fornecidos para o usuário (57), finalizando o programa.

3.3.2.2.3 Rotina 3 – Atuação do *smart grid* para determinação das cargas desligadas

Nessa simulação será estudada a tomada de decisão do *smart grid* quando é necessário fazer um desligamento de cargas. Para isso, cada barra foi considerada como um grupo de consumidor com fator de potência diferente, que será o fator determinante para seu desligamento. Assim, quando *smart grid* tiver que desligar certa quantidade de potência para que o sistema volte a funcionar dentro dos limites, essa quantidade de potência será desligada em uma ou mais cargas, totalmente ou parcialmente. A Figura 3.9 mostra o fluxograma desse terceiro grupo de simulações.

Esta simulação se faz bastante útil quando a sobrecorrente ocorre somente no ramo principal. Assim, deve ser tomada uma decisão de corte de carga entre uma das 18 barras de carga do sistema. O fluxograma da Figura 3.9 é idêntico ao tipo de simulação do item 3.3.2.2.2, distinguindo-se apenas pela forma de atuação do *smart grid*. Por esse motivo, não serão descritos todos os passos como nos fluxogramas anteriores, já que as descrições são as mesmas. Serão então discutidos apenas os passos de (77) a (81), que se referem à atuação do *smart grid* e se distingue das demais simulações.

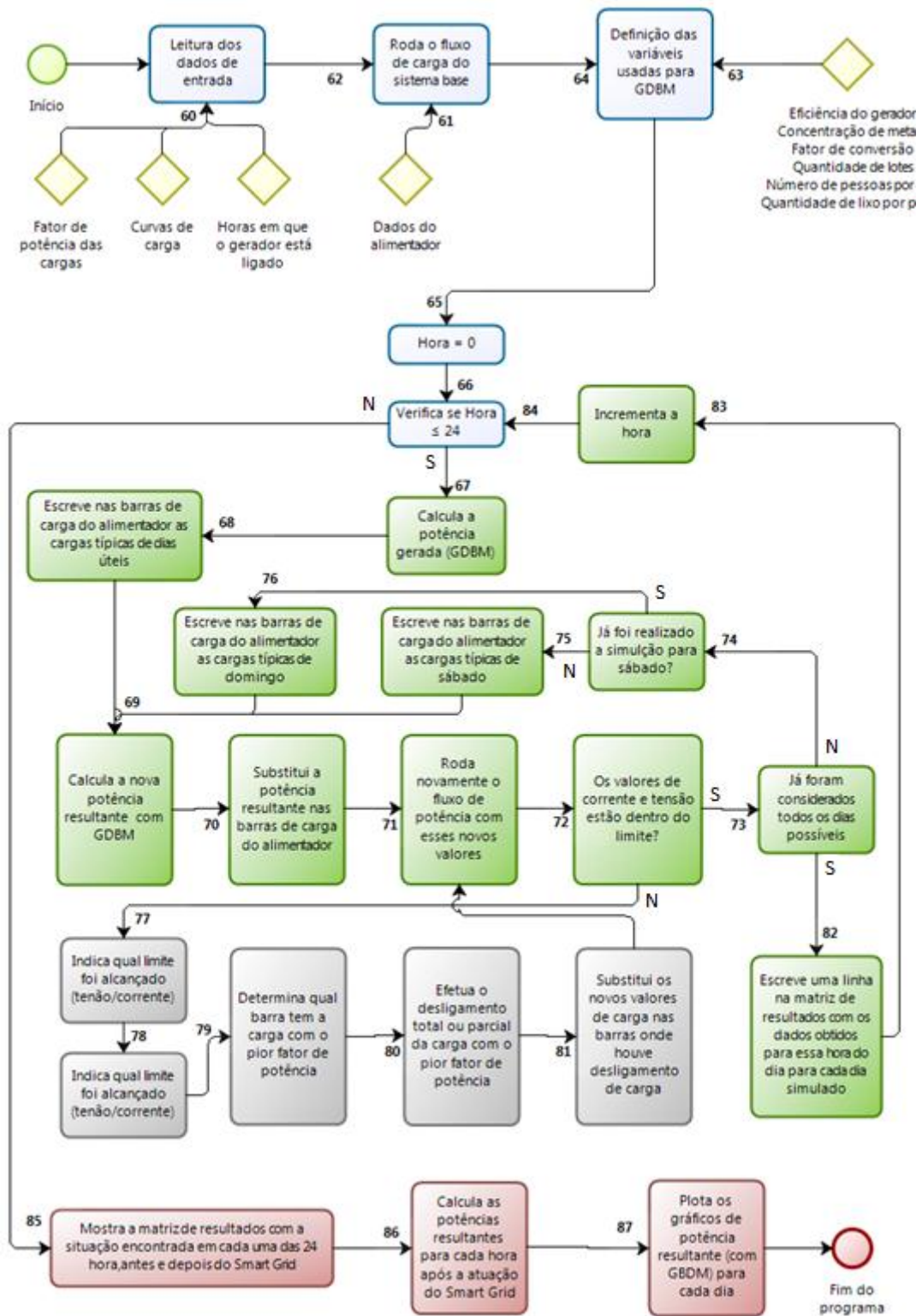


Figura 3.9 Rotina para simular a atuação do smart grid para corte de carga.

Quando ocorre a sobrecorrente no ramo principal o sistema informa ao *smart grid* que o limite alcançado foi a corrente (77) e informa em qual dia esse limite foi ultrapassado (78). A partir daí o *smart grid* seleciona a barra com o menor fator de potência (79), pois é a

barra que mais prejudica o sistema com maior injeção proporcional de potência reativa. Essa barra então é escolhida para ter sua carga cortada totalmente ou parcialmente (80) e essa nova carga reduzida é reescrita na barra com esse menor fator de potência (81). Novamente o sistema roda o fluxo de carga para determinar se com a nova situação o problema foi corrigido ou se é necessária uma nova intervenção do *smart grid* para diminuir ainda mais a carga do sistema.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inserção de geração distribuída no sistema elétrico tem inúmeras vantagens que já foram elucidadas no capítulo 2. Porém alguns aspectos devem ser analisados de forma que essa geração não gere problemas no sistema de distribuição. Assim, a simulação em um sistema de distribuição é bastante importante e necessária, pois pode descartar ou corroborar para a viabilidade técnica da geração a partir de resíduos sólidos urbanos.

Os materiais e métodos mostrados neste capítulo têm como objetivo fazer com que a simulação da GD seja a mais próxima possível da realidade, de forma a demonstrar se os impactos da geração a partir de RSU é uma realidade que deve ser utilizada na busca de alternativas à geração convencional de energia elétrica.

Com o embasamento teórico realizado no capítulo 2 e a metodologia aqui formulada, fez-se possível a realização das simulações propostas, de forma que os seus resultados sirvam de base para que a discussão dos impactos da GD seja realizada no próximo capítulo.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante do estudo realizado nos capítulos anteriores, nos quais se obteve informações sobre formas de geração de energia elétrica a partir da biomassa de RSU, apresentam-se no presente capítulo os resultados das simulações realizadas e a análise dos mesmos. O conhecimento colocado no decorrer do trabalho impulsiona a intenção de uma análise de um sistema onde essa fonte estaria inserida para se obter a resposta do sistema a essa nova configuração, além de proporcionar ainda uma análise sobre a segurança da rede de distribuição de energia. Assim, se mostrou a importância dessa rede interligada e como essa geração distribuída poderia proporcionar mais robustez ao sistema.

Desta forma, buscou-se a possibilidade da utilização do conceito de *smart grid* para controlar esse pequeno sistema e intensificar as chances de que erros aparentes sejam resolvidos. Todo esse aparato teórico baseado em fontes renováveis, geração distribuída e *smart grid*, serviu de base para o desenvolvimento de simulações onde os conceitos anteriormente apresentados são de grande importância.

Nesse capítulo serão dispostos os resultados e análises de situações que são consideradas relevantes para o maior entendimento de uma rede elétrica com uma GD e suas maneiras de controle e eficiência em manter o sistema em funcionamento.

4.2 APRESENTAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

De acordo com o proposto, este tópico tem a intenção de dizer quais foram às simulações executadas e as principais características de cada uma, além da ordem em que os resultados serão apresentados para que se possa entender melhor como funciona a rede simulada.

Em primeiro lugar foi preciso entender como o alimentador se comporta sem nenhuma GD para, posteriormente, serem possíveis comparações e conclusões de como o alimentador está sendo afetado para cada caso em específico. Portanto, trabalhou-se em diversas possibilidades de simulações de forma a observar várias configurações possíveis para o

sistema. O Quadro 4.1 mostra um resumo das simulações que serão consideradas para a análise, juntamente com a descrição de qual fluxograma descreve o método utilizado em cada simulação²¹.

Quadro 4.1 *Descrição das simulações realizadas.*

n°	Descrição	Fluxograma
4.3	Simulação do sistema sem geração distribuída	2
4.4	Simulação para determinar o máximo de GD a partir da biomassa que pode ser injetada no sistema sem gerar problemas na rede	1
4.5	Simulação da geração típica com geração em todas as unidades consumidoras	2
4.6.1	Simulação da geração típica apenas em uma a cada três unidades consumidoras – vazão três vezes maior	2
4.6.2	Simulação da geração típica apenas em uma a cada seis unidades consumidoras – vazão seis vezes maior	2
4.6.3	Simulação da geração típica apenas em uma unidade consumidora – vazão 18 vezes maior	2
4.7	Simulação da geração típica somente em um intervalo de hora determinado – geração em todas as unidades consumidoras	2
4.8	Simulação com a carga variando e geração em todas as unidades consumidoras	2
4.9	Simulação com a carga variando e geração em apenas uma a cada três unidades consumidoras	2
4.10	Simulação com corte da alimentação da subestação	2
4.11	Simulação com sobrecorrente no ramo principal e corte de carga por fator de potência	3

4.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA SEM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Esta simulação tem como objetivo determinar o funcionamento natural do alimentador sem a componente de GD, haja vista que o fluxo de potência nesse caso é somente em uma direção: da fonte geradora, no caso a subestação, para a carga. Esta simulação servirá então de base para comparação do sistema, de forma que seja possível identificar qual a diferença entre o fluxo de potência com geração distribuída e o fluxo de potência natural desse caso base.

Essa simulação tem como referência o alimentador mostrado na Figura 3.3, onde não há GD e as cargas são iguais às demandas típicas para cada tipo de unidade consumidora. O Quadro 4.2 ilustra os resultados obtidos como saída da simulação para um dia útil.

²¹ Os fluxogramas e as descrições das rotinas utilizadas já foram mostrados no item 3.3.2.2 – Rotinas e algoritmo.

Quadro 4.2 Simulação do sistema sem nenhuma geração distribuída – dia útil.

Hora	Valor máximo da corrente sem SG	Valor mínimo da tensão sem SG	Trecho de corrente máxima	Valor máximo da corrente com SG	Valor mínimo da tensão com SG	Limite alcançado	Carga antes da atuação do SG	Carga após a atuação do SG
1	0,4443	0,9764	21-22	0,4443	0,9764	Nenhum	0,0450	0,0450
2	0,3610	0,9804	21-22	0,3610	0,9804	Nenhum	0,0367	0,0367
3	0,3310	0,9819	21-22	0,3310	0,9819	Nenhum	0,0337	0,0337
4	0,3012	0,9833	21-22	0,3012	0,9833	Nenhum	0,0307	0,0307
5	0,2952	0,9835	21-22	0,2952	0,9835	Nenhum	0,0301	0,0301
6	0,3271	0,9818	21-22	0,3271	0,9818	Nenhum	0,0333	0,0333
7	0,3721	0,9795	21-22	0,3721	0,9795	Nenhum	0,0378	0,0378
8	0,5547	0,9712	21-22	0,5547	0,9712	Nenhum	0,0559	0,0559
9	0,5443	0,9684	21-22	0,5443	0,9684	Nenhum	0,0547	0,0547
10	0,5616	0,9680	33-34	0,5616	0,9680	Nenhum	0,0563	0,0563
11	0,6299	0,9641	33-34	0,6299	0,9641	Nenhum	0,0629	0,0629
12	0,6750	0,9612	33-34	0,6750	0,9612	Nenhum	0,0672	0,0672
13	0,6613	0,9621	33-34	0,6613	0,9621	Nenhum	0,0659	0,0659
14	0,6901	0,9612	33-34	0,6901	0,9612	Nenhum	0,0687	0,0687
15	0,7285	0,9596	33-34	0,7285	0,9596	Nenhum	0,0724	0,0724
16	0,7221	0,9600	33-34	0,7221	0,9600	Nenhum	0,0718	0,0718
17	0,7004	0,9608	33-34	0,7004	0,9608	Nenhum	0,0697	0,0697
18	0,5896	0,9657	15-16	0,5896	0,9657	Nenhum	0,0343	0,0343
19	0,7824	0,9620	15-16	0,7824	0,9620	Nenhum	0,0452	0,0452
20	0,9065	0,9572	15-16	0,9065	0,9572	Nenhum	0,0521	0,0521
21	0,9621	0,9555	15-16	0,9621	0,9555	Nenhum	0,0552	0,0552
22	0,8301	0,9610	15-16	0,8301	0,9610	Nenhum	0,0479	0,0479
23	0,7050	0,9652	15-16	0,7050	0,9652	Nenhum	0,0409	0,0409
24	0,5417	0,9713	21-22	0,5417	0,9713	Nenhum	0,0546	0,0546

Cada linha do quadro ilustra o resultado para uma hora do dia. Observa-se que os parâmetros de saída são as correntes máximas e tensões mínimas antes e depois da atuação do controle de carga no *smart grid*, além da identificação do ramo em que ocorre a corrente máxima. É informado ainda se algum dos limites estipulados no item 3.2.2.3 foi alcançado e qual a carga antes e depois da atuação do *smart grid*.

A simulação realizada nessa configuração tem como saída três resultados: para dias úteis, sábados e domingos. Porém nessa simulação será apresentado somente o resultado para o dia útil, uma vez que os resultados obtidos foram todos dentro dos limites determinados. Assim, os resultados são colocados em um formato padrão que será utilizado como base para todos os resultados restantes desse trabalho.

Conforme já elucidado, esta situação servirá de base de comparação para o sistema, haja vista que reflete o fluxo de potência para uma carga típica em dias úteis, sábados e domingos, havendo deslocamento unidirecional de potência. Nessa situação, a energia consumida por todo o alimentador é de 17,704 GWh para um dia útil, de 17,784 GWh para o sábado e de 17,787 GWh para o domingo.

Pode-se verificar no Quadro 4.2 que todas as correntes estão menores que 1 pu e as tensões então dentro da faixa de 0,915 e 1,05 pu, assim, o sistema elétrico de distribuição está operando adequadamente em todas as horas do dia. Como há ausência de problemas, o alimentador não exige a atuação do *smart grid*, o que pode ser confirmado pela igualdade entre os valores de carga, correntes e tensões encontrados sem e com o SG.

Conforme já citado, as tensões e correntes encontradas para o sábado e o domingo também se encontram dentro do limite, com resultados bem próximos aos demonstrados para o dia útil. O Quadro 4.2 contém somente os resultados para os dias úteis de forma a apresentar o formato final dos resultados da simulação, porém apresenta-se agora o Gráfico 4.1, que mostra os resultados de tensão e corrente obtidos também para sábado e domingo. Pode-se observar então pelo gráfico que, para essa situação típica, não há nenhuma corrente ou tensão fora da faixa estipulada como aceitável para o bom funcionamento do sistema.

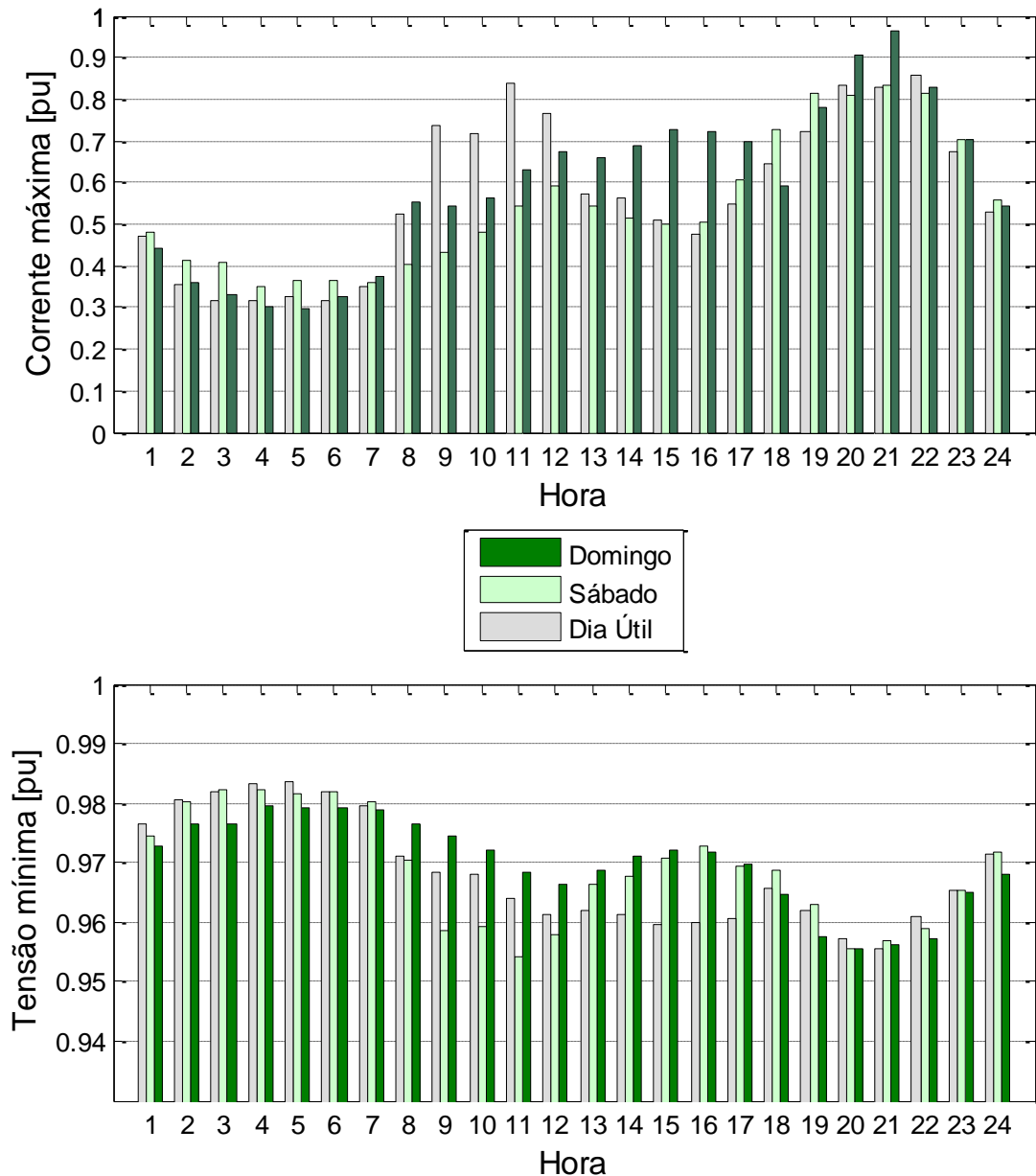


Gráfico 4.1 Correntes e tensões para todos os dias simulados.

4.4 SIMULAÇÃO PARA DETERMINAR O MÁXIMO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Esta simulação tem por objetivo determinar a quantidade máxima de resíduos sólidos urbanos que pode ser utilizada para geração em todos os pontos de carga sem que essa potência injetada afete a rede de distribuição de energia elétrica. A Figura 4.1 mostra novamente o alimentador, destacando em azul as barras onde existe GDBM.

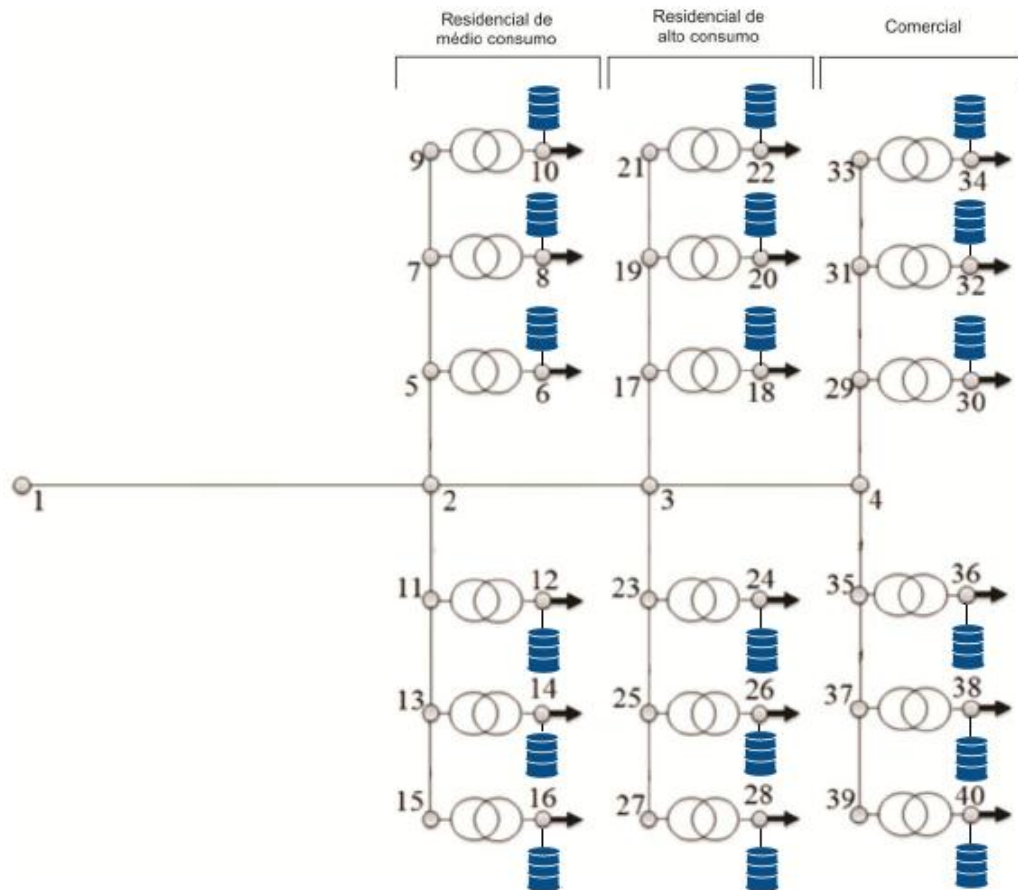


Figura 4.1 Simulação para determinar a quantidade máxima de lixo.

O Quadro 4.3 mostra o resultado obtido a partir dessa simulação. Nele contém dados referentes às 24 horas do dia. É possível observar que a maior quantidade de lixo possível para não ocorrer o problema seria de 34,1 kg de lixo por pessoa por dia, obtida às 21 horas. Contudo, o valor mínimo considerado para que não ocorresse problema no sistema foi de 24,3 kg, obtido às 5 horas da manhã. Esse é o valor determinado para o cálculo da quantidade máxima de geração sem causar problemas, haja vista que com essa quantidade de lixo não se atinge os limites de tensão e corrente no sistema em qualquer uma das 24 horas. O quadro contém ainda o valor máximo da tensão para cada hora analisada, valor que não apresentou problema dentro de seu limite apresentado anteriormente.

É interessante observar que, devido à injeção de potência pelas GD, as tensões aumentaram, apesar de não causar problema ao sistema. Cabe ressaltar ainda que essa tensão máxima ocorreu sempre na barra 10, uma vez que sua demanda é menor, causando uma maior penetração de potência gerada pela GDBM. Por sua vez, o trecho onde a corrente apresenta o valor máximo é entre as barras 11 e 12. Retornando à Figura 4.1, que

apresenta o esquemático do alimentador, é possível observar que a tensão tende a aumentar no extremo da ramificação da unidade consumidora residencial de médio porte, assim como a corrente, porém em uma ramificação diferente.

O quadro mostra também que o limite alcançado foi o de corrente em todas as horas, informando seu valor máximo para cada hora. Essas correntes apresentadas já são correntes abaixo do valor permitido, pois a rotina encontra o valor limite de potência possível produzida sem causar o problema de sobrecorrente. Também é possível observar que os problemas ocorreram tanto nos dias úteis quanto nos sábados e domingos. Isso acontece devido à variação do comportamento de carga adotado para cada dia.

Quadro 4.3 *Simulação para determinar o valor máximo de geração.*

Hora	Quantidade máxima de lixo por dia [kg/pessoa]	Máxima tensão atingida [pu]	Barra com máxima tensão	Corrente máxima [pu]	Trecho de corrente máxima	Limite alcançado	Dia em que o limite foi alcançado
1	26.2000	1.0204	10	0.9991	11-12	Corrente	Dia útil
2	24.9000	1.0203	10	0.9964	11-12	Corrente	Dia útil
3	24.6000	1.0204	10	0.9980	11-12	Corrente	Dia útil
4	24.4000	1.0205	10	0.9966	11-12	Corrente	Dia útil
5	24.3000	1.0204	10	0.9971	11-12	Corrente	Dia útil
6	24.5000	1.0196	10	0.9981	11-12	Corrente	Domingo
7	25.4000	1.0199	10	0.9966	11-12	Corrente	Domingo
8	25.8000	1.0197	10	0.9970	11-12	Corrente	Domingo
9	27.1000	1.0198	10	0.9984	11-12	Corrente	Domingo
10	27.7000	1.0190	10	0.9959	11-12	Corrente	Dia útil
11	28.6000	1.0187	10	0.9999	11-12	Corrente	Dia útil
12	28.9000	1.0181	10	0.9963	11-12	Corrente	Dia útil
13	28.7000	1.0196	10	0.9986	11-12	Corrente	Domingo
14	28.0000	1.0198	10	0.9972	11-12	Corrente	Domingo
15	27.4000	1.0197	10	0.9956	11-12	Corrente	Domingo
16	28.3000	1.0180	10	0.9960	11-12	Corrente	Dia útil
17	29.3000	1.0186	10	0.9987	11-12	Corrente	Dia útil
18	30.3000	1.0195	10	0.9985	11-12	Corrente	Dia útil
19	32.4000	1.0207	10	0.9969	11-12	Corrente	Sábado
20	33.1000	1.0197	10	0.9990	11-12	Corrente	Domingo
21	34.1000	1.0209	10	0.9972	11-12	Corrente	Sábado
22	33.8000	1.0202	10	0.9971	11-12	Corrente	Domingo
23	31.7000	1.0213	10	0.9977	11-12	Corrente	Sábado
24	28.3000	1.0206	10	0.9986	11-12	Corrente	Sábado

Assim, a quantidade máxima de lixo por pessoa que podemos utilizar para geração nesse trabalho é de 24,3 kg por dia, pois esse valor garante que a geração não afete o sistema em

nenhuma hora do dia causando ultrapassagem dos limites determinados. Cabe notar ainda que esse valor foi encontrado às 5 horas da manhã, horário em que a carga é pequena e, conseqüentemente, a potência injetada é maior. Utilizando esse valor mínimo determinado, chega-se a um valor de 8,748 toneladas de lixo por dia que poderiam ser usadas na geração sem causar nenhum dano à rede, podendo assim gerar 37,323 MWh. Com essa quantidade de lixo, a GDBM excede a demanda de carga suprindo todo o alimentador e devolvendo o restante ao sistema elétrico. Nesse caso, as unidades consumidoras atendidas por este alimentador poderiam ficar independentes da energia da concessionária.

4.5 SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO TÍPICA EM TODAS AS UNIDADES CONSUMIDORAS

Do mesmo modo que a simulação anterior, a Figura 4.1 também vale para representar onde ocorre GDBM, pois novamente existe geração em todas as unidades consumidoras. Porém agora com os valores reais de potência gerada. Essa simulação tem a intenção de mostrar como o sistema se comportaria tendo geração baseada nos valores apresentados no capítulo 3, que determinam a quantidade de potência gerada em cada ponto com GDBM. Para essa situação, nenhum dos limites de tensão e corrente foram alcançados em nenhum horário do dia. Assim, o Quadro 4.4 expõe as situações extremas para cada um dos dias. Para cada hora indicada, está destacado em vermelho se o extremo obtido foi de corrente ou de tensão.

Quadro 4.4 *Valores extremos alcançados de corrente e tensão.*

Hora	Valor máximo da corrente [pu]	Trecho de corrente máxima	Valor mínimo da tensão [pu]	Barra com tensão mínima	Dia
21	0,8644	15-16	0,9595	16	Dia útil
22	0,7614	15-16	0,9622	28	Sábado
11	0,7606	33-34	0,9583	34	Sábado
21	0,7376	15-16	0,9597	28	Domingo
20	0,7337	21-22	0,9589	28	Domingo

Nessa simulação, onde a potência injetada é bem menor do que a carga, nota-se uma ausência de problemas relacionados à tensão e correntes em todos os dias, independentemente da hora. Nota-se ainda a tendência da corrente máxima em cada hora ocorrer entre os trechos 15-16, 21-22 e 33-34. Observando o alimentador da Figura 3.4,

esses trechos se encontram nos extremos de ramificações dos três tipos de unidades consumidoras.

A diferença entre a potência injetada e a carga gera uma potência líquida que é de 13,941 MWh para os dias úteis, 14,021 MWh para os sábados e 14,024 MWh para os domingos, potência essa que reflete a quantidade que subestação deve entregar para o alimentador. Nessa situação, o percentual da carga que é atendida completamente pela GDBM fica sendo de aproximadamente 21% para todos os dias, o restante é atendido pela subestação. Com isso é visto uma possibilidade de desatolar a geração central com a ajuda das GD, dando ao sistema maior segurança para atender outros locais.

O Gráfico 4.2 mostra que, apesar das curvas de cargas serem diferentes de acordo com os dias, as correntes máximas apresentadas nos trechos do alimentador apresentam uma disposição parecida, onde aumentam quando a carga exige mais potência, porém com a presença de GDBM essa necessidade de suprimento de carga pela subestação é menor.

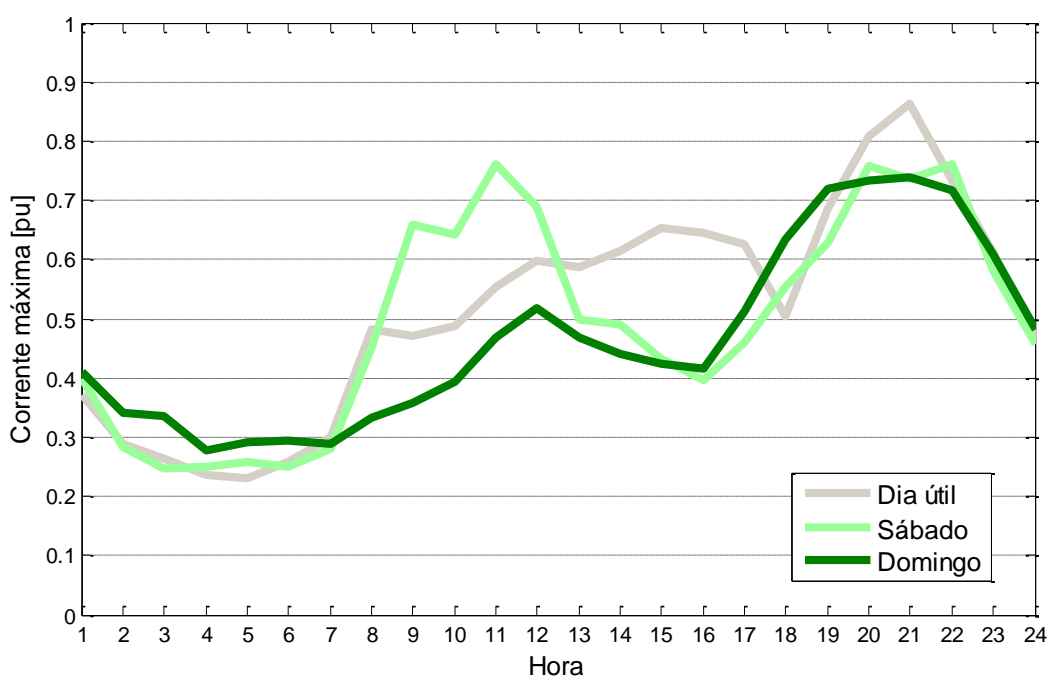


Gráfico 4.2 Corrente máxima no alimentador para cada dia.

4.6 SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO TÍPICA APENAS EM ALGUMAS DAS UNIDADES CONSUMIDORAS

4.6.1 Geração típica apenas em uma em cada três unidades consumidoras

Nesse caso, a simulação tem a mesma intenção que a anterior. A diferença é dada nas posições onde se encontram as GDBM e na quantidade de unidades geradoras, além da alteração da vazão de biogás de forma a obter em um ponto de geração maior potência injetada. A Figura 4.2 mostra como está localizado a geração nesta simulação. Para a realização dessa simulação, fez-se a vazão ser três vezes maior, pois foi considerado o acúmulo na quantidade de lixo dos lotes onde não existe geração distribuída.

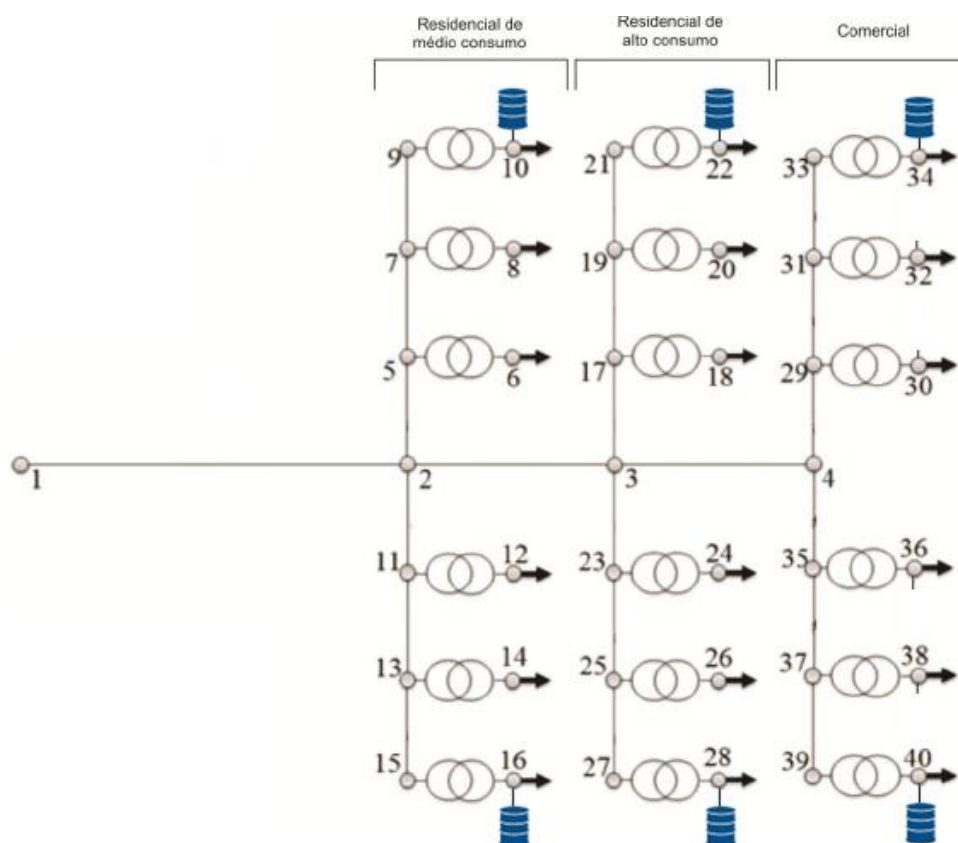


Figura 4.2 Geração típica em uma a cada três unidades consumidoras.

O resultado dessa simulação não foi muito diferente do que foi apresentado na anterior, pois também não ocorreu nenhum problema em nenhuma hora do dia e em nenhum dos dias simulados. A diferença encontrada nos resultados foi basicamente a do local onde acontecia a corrente de maior valor. No Quadro 4.5, é possível comparar essa diferença

entre a simulação do item 4.5 e essa simulação. Os valores referentes a presente simulação encontra-se do lado direito do quadro, com fundo em verde, enquanto os valores da simulação anterior estão do lado esquerdo com fundo em azul. Todos esses valores são comparação dos resultados obtidos para o dia de domingo.

Quadro 4.5 *Comparação entre correntes máximas para o domingo.*

Hora	Simulação 4.5		Simulação 4.6.1	
	Valor máximo da corrente	Trecho de corrente máxima	Valor máximo da corrente	Trecho de corrente máxima
1	0.4092	21-22	0.4813	19-20
2	0.3411	21-22	0.4126	19-20
3	0.3352	21-22	0.4067	19-20
4	0.2775	27-28	0.3479	31-32
5	0.2907	33-34	0.3618	31-32
6	0.2936	33-34	0.3648	31-32
7	0.2898	33-34	0.3609	31-32
8	0.3326	33-34	0.4041	31-32
9	0.3588	33-34	0.4307	31-32
10	0.3927	21-22	0.4809	13-14
11	0.4693	21-22	0.5419	19-20
12	0.5187	21-22	0.5915	19-20
13	0.4681	21-22	0.5406	19-20
14	0.4394	21-22	0.5118	19-20
15	0.4242	21-22	0.4964	19-20
16	0.4165	21-22	0.5050	13-14
17	0.5116	15-16	0.6030	13-14
18	0.6338	15-16	0.7269	13-14
19	0.7197	15-16	0.8139	13-14
20	0.7337	21-22	0.8077	19-20
21	0.7376	15-16	0.8321	13-14
22	0.7162	15-16	0.8104	13-14
23	0.6097	15-16	0.7025	13-14
24	0.4832	21-22	0.5558	19-20

Nota-se na simulação do item 4.5 que as correntes máximas se encontram nos ramos situados nos extremos das ramificações de cada tipo de unidade. Já na simulação deste item 4.6.1, nota-se que as correntes de maior valor se apresentam nos ramos situados no meio das ramificações de cada tipo de unidade, apesar dessas correntes apresentarem valores bem próximos. O Gráfico 4.3 mostra com mais clareza essa comparação entre as simulações de forma que fique mais claro a proximidade dos valores de corrente máxima para cada hora.

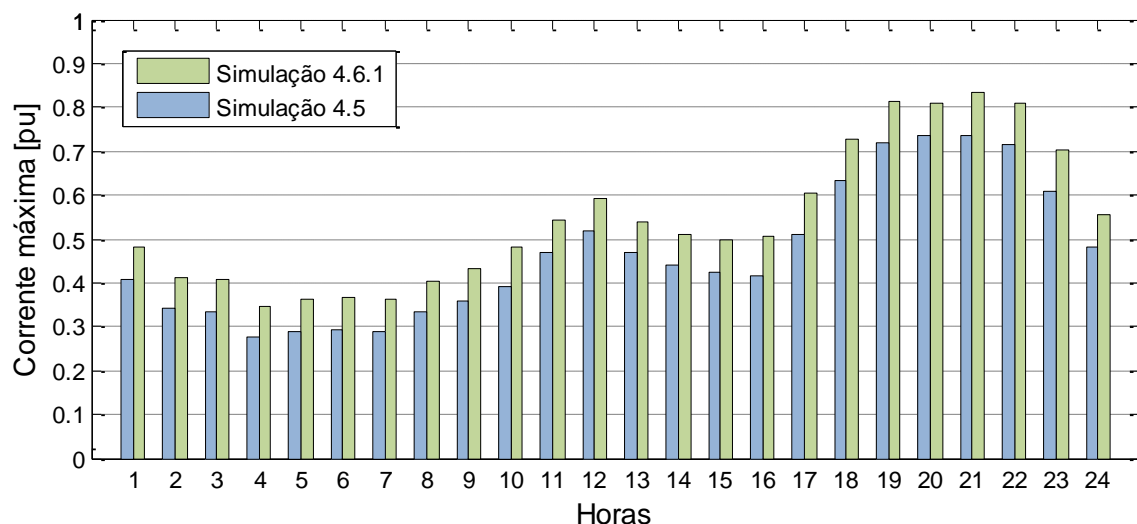


Gráfico 4.3 Comparação entre as correntes máximas das simulações 4.5 e 4.6.1.

A GDBM produziu durante o dia inteiro 3,7630 MWh de energia para o sistema. Assim a geração e a energia líquida são exatamente iguais à simulação anterior, pois a demanda e a geração são idênticas. Porém, dispostas de maneira diferente. O percentual da carga atendida pela GDBM permanece então o mesmo, de aproximadamente 21% para todos os dias.

4.6.2 Geração típica apenas em uma em cada seis unidades consumidoras

Novamente enfatiza-se que o objetivo dessas simulações com geração apenas em alguns pontos era observar como a disposição das GDBM afetava os parâmetros do sistema. Portanto, uma nova simulação com a mesma ideia da anterior foi executada, porém agora com apenas uma GDBM a cada seis unidades consumidoras, ou seja, somente uma GDBM por tipo de unidade consumidora, conforme ilustrado na Figura 4.3.

A vazão foi então aumentada para seis vezes o valor da simulação com geração em todas as unidades consumidoras. Novamente considerando que todos os resíduos sólidos gerados pelas unidades consumidoras sem GDBM seriam utilizados no ponto mais próximo onde haja geração. Nessa situação, nenhum dos limites foram ultrapassados na rede, apesar dos valores de corrente e tensão terem aumentado. Uma observação importante é que, nesse caso, os valores máximos de corrente encontrados estavam somente nas unidades consumidores residenciais de médio consumo e nas unidades comerciais.

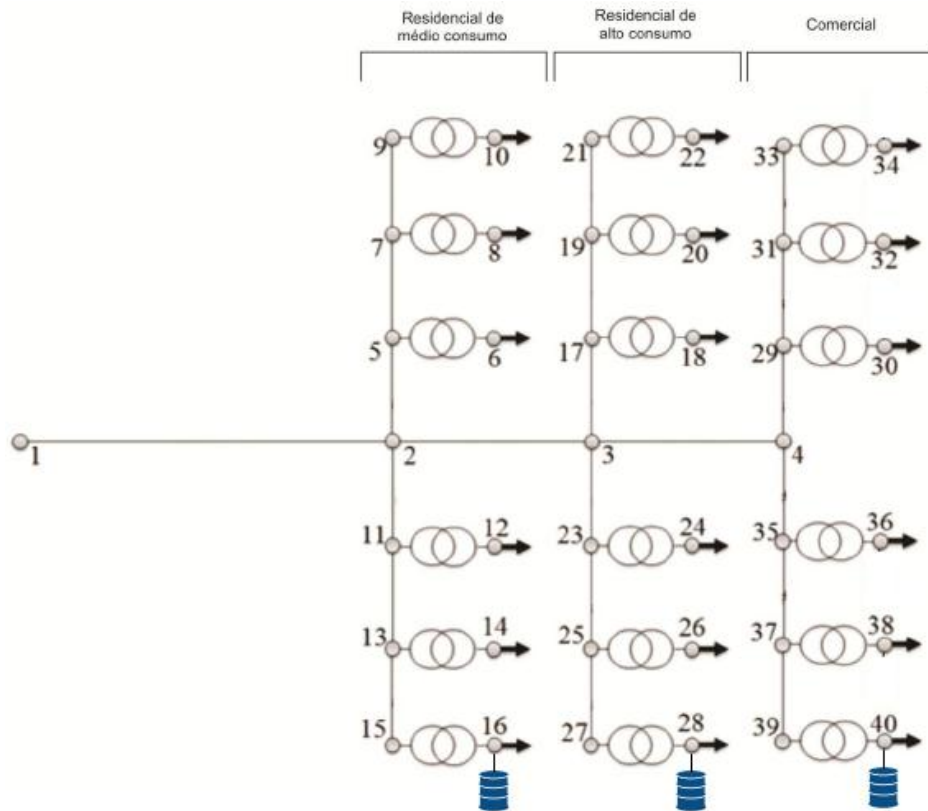


Figura 4.3 Geração típica em uma a cada seis unidades consumidoras.

4.6.3 Geração típica apenas em uma unidade consumidora

Alterando novamente a disposição da geração distribuída, realizou-se uma simulação com somente um ponto de GDBM com o máximo de potência possível a ser gerada considerando a quantidade de lixo que se consegue com a quantidade de lotes já definidos. Nesse caso, escolheu-se a barra número 16 para conter um grupo motor-gerador capaz de gerar energia a partir de todos os resíduos sólidos das residências e comércios presentes no alimentador.

Para essa situação, considerou-se vazão 18 vezes maior que a vazão caso a geração ocorresse em todas as barras de carga, situação da simulação 4.5. A Figura 4.4 ilustra a situação considerada para a simulação. A escolha da barra com GDBM foi feita considerando-se que as barras residenciais de médio consumo são as barras onde há menor consumo, portanto, as barras limitantes para a simulação, pois é onde a geração distribuída afeta mais a potência resultante.

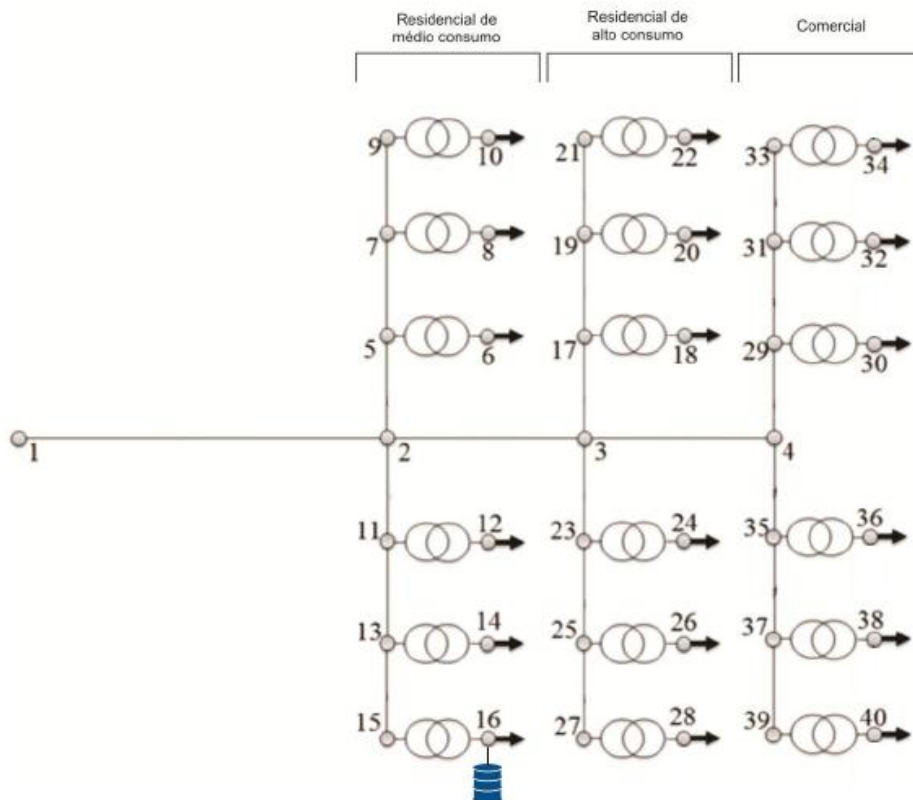


Figura 4.4 Geração típica apenas em uma unidade consumidora.

A potência da geração com esse cenário foi de 156,79 kW. Nesse caso o limite de corrente é atingido em todas as horas para todos os dias, impossibilitando essa configuração para o funcionamento adequado do sistema de distribuição. Com as correntes acima de 1 pu é muito provável que toda a alimentação da subestação fosse desligada pela proteção, deixando todo o alimentador sem energia elétrica. Assim, quando essa geração injeta potência acima da capacidade do alimentador, o *smart grid* atua no controle da geração, limitando o valor de potência gerada a cada hora para que não prejudique o funcionamento adequado do sistema. O Quadro 4.6 traz as informações de corrente máxima antes e depois da atuação do controle do *smart grid* limitando a geração.

É importante ressaltar que essa configuração, mesmo com a atuação do *smart grid* normalizando o sistema, não é a mais adequada para a quantidade de resíduos obtidos nesse alimentador, pois com o corte da geração a sua capacidade não é aproveitada ao máximo, desperdiçando parte da carga energética dos resíduos que poderia ser facilmente aproveitada apenas com a distribuição adequada dos pontos de geração.

Quadro 4.6 Comparação entre correntes máximas.

Hora	Corrente máxima [pu]					
	Dia útil		Sábado		Domingo	
	Sem SG	Com SG	Sem SG	Com SG	Sem SG	Com SG
1	1,8069	0,9931	1,7754	0,9992	1,7395	0,9902
2	1,8543	0,9926	1,8312	0,9932	1,8191	0,9924
3	1,8672	0,9941	1,8631	0,9898	1,8503	0,9991
4	1,8735	0,9891	1,8619	0,9887	1,8557	0,9934
5	1,8780	0,9936	1,8687	0,9954	1,8645	0,9906
6	1,8427	0,9930	1,8542	0,9926	1,8724	0,9984
7	1,7809	0,9929	1,8106	0,9969	1,8358	0,9972
8	1,7471	0,9974	1,7973	0,9947	1,8211	0,9945
9	1,7495	0,9985	1,7415	0,9899	1,7733	0,9968
10	1,7501	0,9992	1,6954	0,9994	1,7185	0,9959
11	1,7213	0,9975	1,6895	0,9938	1,6921	0,9974
12	1,7083	0,9981	1,7035	0,9938	1,6923	0,9975
13	1,6944	0,9987	1,6916	0,9968	1,7153	0,9927
14	1,7234	0,9991	1,7023	0,9936	1,7392	0,9897
15	1,7460	0,9943	1,7365	0,9996	1,7599	0,9965
16	1,7298	0,9923	1,7198	0,9973	1,7035	0,9953
17	1,6954	0,9997	1,6790	0,9990	1,6476	0,9979
18	1,6592	0,9942	1,6239	0,9911	1,5820	0,9962
19	1,5556	0,9890	1,5864	0,9996	1,5418	0,9916
20	1,4971	0,9993	1,5337	0,9988	1,5673	0,9976
21	1,4720	0,9958	1,5338	0,9990	1,5337	0,9987
22	1,5308	0,9969	1,5196	0,9888	1,5437	0,9930
23	1,5930	0,9920	1,6090	0,9918	1,5958	0,9940
24	1,7043	0,9963	1,7283	0,9927	1,6958	0,9880

Vê-se que o *smart grid* atua no sentido de reduzir a GDBM para assegurar que a corrente máxima para cada hora esteja abaixo de 1 pu, dessa forma a geração poderia continuar somente em ponto, porém não seria permitido gerar na sua capacidade máxima.

Apresenta-se agora uma comparação das últimas três simulações realizadas para que se possa obter uma relação de como a distribuição concentrada da geração afeta as correntes máximas no alimentador. O Gráfico 4.4 ilustra as correntes para as três configurações com geração típica: com uma em cada três unidades consumidoras, uma em cada seis e em apenas uma barra do sistema. No caso da simulação 4.6.3, foram inseridas nos gráficos as correntes antes da atuação do *smart grid*, uma vez que após a atuação essas correntes ficam aproximadamente iguais a 1 pu.

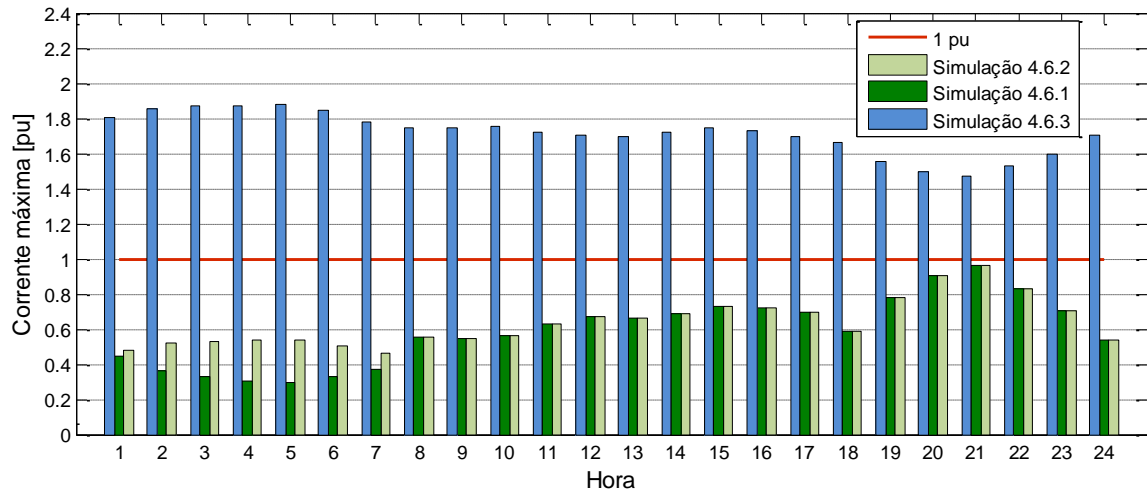


Gráfico 4.4 Comparação entre as correntes máximas para as três configurações.

As simulações mostradas nos itens 4.5, 4.6.1 e 4.6.2 indicam que, independente do ponto onde se colocar uma GDBM, observando a quantidade de lixo que se teria para a produção de energia elétrica em cada situação, essa geração não afetaria o sistema e serviria de auxílio para a fonte de alimentação central, a subestação, reduzindo a sua necessidade de injeção de potência em quase 21%. Essa porcentagem é significativa, haja vista que essa análise é realizada somente para um alimentador específico. Pensando numa rede como um todo, se houvessem fontes alternativas interligadas à rede em diversos pontos, esta ajudaria a reduzir a dependência e a chance de alguma falta de energia proveniente de alta demanda. Com a biomassa proveniente de RSU estudada nesse trabalho, tem-se ainda a vantagem de reduzir a quantidade de lixo e de gases não benéficos ao meio ambiente. Já no caso da simulação 4.6.3, verifica-se que não é possível que toda a GDBM seja concentrada em uma única barra, pois essa situação afetaria o comportamento adequado do sistema. Assim, a distribuição da geração não deve ser feita de forma concentrada, pois mesmo sendo possível gerar uma determinada quantidade de potência, essa configuração leva o sistema a situações inadequadas.

4.7 SIMULAÇÃO COM GERAÇÃO TÍPICA SOMENTE EM UM INTERVALO DE HORA DETERMINADO

Em todas as simulações anteriores a GDBM era realizada por uma fonte constante de potência gerando em todas as horas do dia, porém pode-se pensar em ativa-la somente em determinados horários. Realizou-se então esta simulação escolhendo os horários onde

haveria geração baseado nas curvas de carga dos dias úteis, onde no horário entre 18 e 23 horas existem os picos de demanda, auxiliando ainda mais a subestação nesses horários.

Para essa simulação considerou-se então uma vazão quatro vezes maior, pois como há geração somente em um quarto do dia, o biogás gerado nas outras horas é colocado na câmara de armazenamento e liberado com vazão quatro vezes maior no período da geração.

O Gráfico 4.5 demonstra a curva de carga padrão adotada para uma residência de médio porte juntamente com a GDBM somente nos horários indicados e a potência resultante entre a diferença da demanda e da geração.

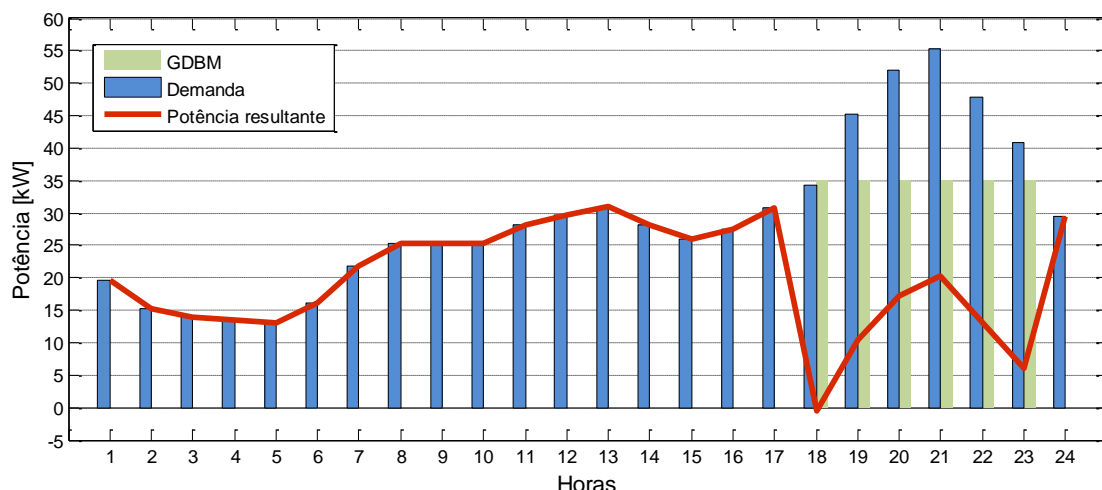


Gráfico 4.5 *Relação entre a geração e a demanda para um dia útil.*

De acordo com o Gráfico 4.5, é possível verificar que a quantidade de potência que a subestação precisará suprir sofrerá mudança. A potência negativa observada às 18 horas seria uma potência injetada na rede a partir do ponto de carga da análise. É então possível observar que no horário de pico, onde a necessidade da fonte central era a maior, a subestação não precisa mais gerar uma grande potência para suprir a carga, uma vez que a demanda é reduzida por conta da inserção da GDBM, além de receber potência a partir da carga às 18 horas.

Há ainda a possibilidade de que, para cada dia, escolha-se o melhor horário e intervalo para geração para reduzir o pico de demanda de acordo com o perfil de consumo, como foi

realizado para o dia útil. O Gráfico 4.6 mostra o resultado considerando o mesmo intervalo e horário de utilização da GDBM para todos os dias e tipos de unidades consumidoras.

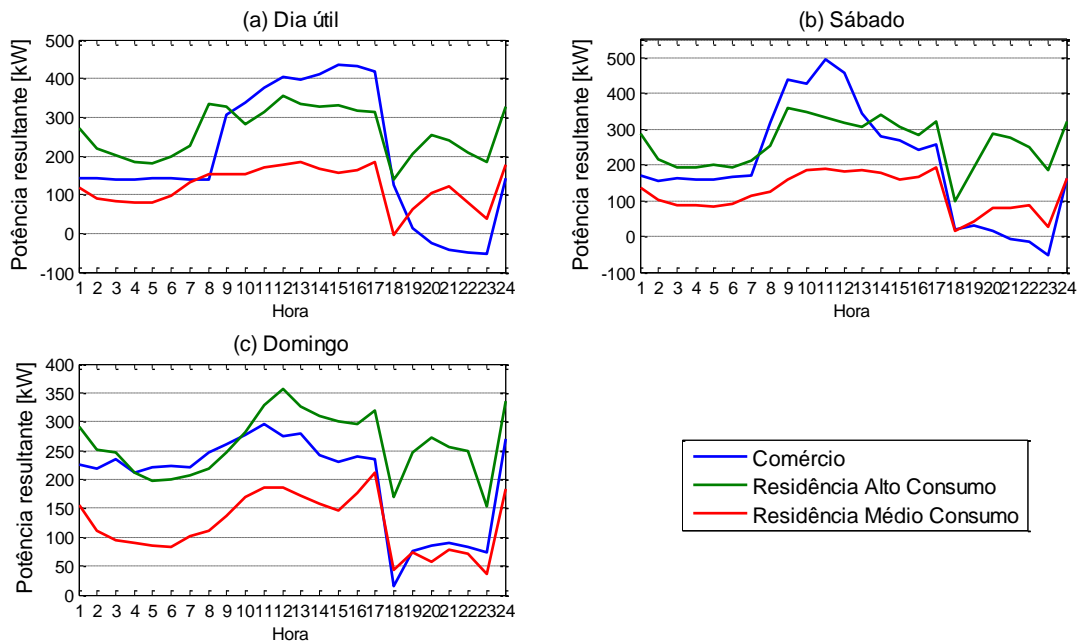


Gráfico 4.6 Potências resultantes para geração no horário de pico.

Assim como nas simulações anteriores, apesar de se injetar potência ao sistema, os limites de tensão e corrente foram respeitados, portanto essa seria uma boa prática para aliviar a central fornecedora de energia nos horários de pico.

4.8 SIMULAÇÃO COM A CARGA VARIANDO E GERAÇÃO EM TODAS AS UNIDADES CONSUMIDORAS

No capítulo 2, falou-se tanto da geração distribuída a partir de resíduos sólidos quanto do controle em *smart grid*. Estas próximas simulações mostrarão como a atuação do *smart grid* pode proporcionar maior controle e segurança à rede. Para isso a carga será alterada de forma que o sistema apresente sobrecarga ou subtensão, exigindo atuação do controle no *smart grid*.

Nesta situação será observado um aumento de carga generalizado e GDBM em todos os pontos de carga nos diversos tipos de unidades consumidoras, haja vista que, devido à

quantidade pequena de geração a partir de RSU, a potência injetada não causaria problema algum à rede definida, trazendo somente benefícios. Para mostrar a importância do *smart grid* e as diversas formas de atuação, será realizado um estudo de algumas situações pertinentes.

A determinação para esse caso foi de aumentar 20% a carga em todos os pontos definidos, além da existência de GDBM em todas as barras de carga, conforme já mostrado na Figura 4.1. Essa situação reflete o menor aumento na demanda que afeta o sistema gerando sobrecorrente no transformador. Existe somente um horário e um dia específico em que o limite estipulado foi ultrapassado, conforme indicado no Quadro 4.7, tal situação aconteceu para o dia útil.

Quadro 4.7 *Simulação com carga 20% acima do padrão – limite que afeta o sistema.*

Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Carga antes do SG [kW]	Carga após o SG [kW]
21	1,0658	0,9502	15-16	0,9954	0,9527	Corrente	66,2	62,4

É possível observar no Quadro 4.7 que às 21 horas ocorreu sobrecorrente no trecho entre as barras 15 e 16 e que foi necessária a atuação do *smart grid* para corrigir esse problema. Com a situação proposta de 20% de sobrecarga, a corrente nesse trecho ficou acima de 1 pu, comprometendo o funcionamento do transformador.

O *smart grid* então deve reduzir essa corrente de forma que fique dentro do limite determinado. Para isso, é feita uma redução de 3,8 kW na carga, conseguindo obter uma corrente aproximadamente 7% menor e dentro do limite de operação.

Com o intuito de verificar como o sistema se comporta com o aumento de demanda, a simulação foi realizada novamente com a alteração da demanda para 50% acima do padrão. Com esse cenário, mais problemas foram encontrados e em todos os dias de análise, os resultados são apresentados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 Simulação com carga 50% acima do padrão.

Dia que o limite foi ultrapassado	Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]
Dia útil	15	1,0378	0,9422	33-34	0,9918	0,9442	Corrente	108,6	104,3
Dia útil	16	1,0278	0,9429	33-34	0,9934	0,9445	Corrente	107,7	104,5
Dia útil	19	1,0978	0,9453	15-16	0,9908	0,9456	Corrente	67,8	61,9
Dia útil	20	1,2900	0,9384	9-10	0,9948	0,9435	Corrente	78,2	62,0
Dia útil	21	1,3763	0,9358	13-14	1,0000	0,9440	Corrente	82,8	61,8
Dia útil	22	1,1710	0,9444	15-16	0,9984	0,9470	Corrente	71,8	62,4
Sábado	9	1,0502	0,9407	33-34	0,9924	0,9433	Corrente	109,65	104,2
Sábado	10	1,0246	0,9417	29-30	0,9999	0,9431	Corrente	107,2	104,0
Sábado	11	1,2083	0,9338	33-34	0,9967	0,9432	Corrente	124,2	104,6
Sábado	12	1,0963	0,9395	37-38	0,9997	0,9441	Corrente	114,0	104,1
Sábado	19	1,0045	0,9469	15-16	0,9931	0,9469	Corrente	62,7	62,0
Sábado	20	1,2009	0,9351	11-12	0,9996	0,9418	Corrente	124,2	104,6
Sábado	21	1,1711	0,9373	27-28	0,9982	0,9425	Corrente	71,7	62,2
Sábado	22	1,2147	0,9403	11-12	0,9995	0,9432	Corrente	74,1	61,8
Domingo	18	1,0146	0,9498	15-16	0,9917	0,9499	Corrente	63,3	62,0
Domingo	19	1,1502	0,9384	27-28	0,9979	0,9405	Corrente	70,5	61,8
Domingo	20	1,1639	0,9352	27-28	0,9955	0,9401	Corrente	120,6	104,7
Domingo	21	1,1786	0,9365	17-18	0,9998	0,9402	Corrente	72,0	61,9
Domingo	22	1,1449	0,9379	15-16	0,9981	0,9405	Corrente	70,2	62,2

Observa-se no Quadro 4.8 que com o aumento da carga apareceram vários novos problemas em todos os dias, todos eles de sobrecorrente nos transformadores, levando o controle de carga a atuar em diversas horas. Cabe ressaltar ainda que a tensão mínima após a atuação do *smart grid* aumenta devido à diminuição da demanda por causa do corte parcial de carga. O Gráfico 4.7 ilustra a queda na demanda no sábado após o sistema atuar para normalizar as correntes.

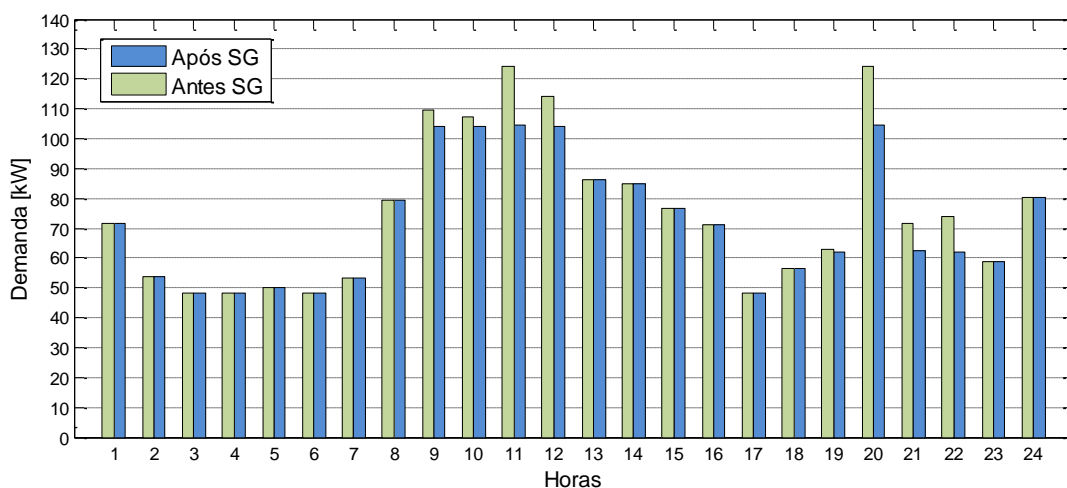


Gráfico 4.7 Demandas antes e depois do smart grid para o sábado.

Pode-se observar no gráfico o controle de carga realizado para diminuir a carga até o limite onde o sistema não apresenta sobrecorrente em nenhum transformador. Na simulação realizada, em todas as horas onde ocorre sobrecorrente, a carga é diminuída para o limite da demanda que o transformador suporta de carga sem sobrecarregá-lo. Assim, qualquer carga acima desse valor deve ser cortada por atuação do *smart grid*, mantendo assim a integridade do sistema. Para esse controle de carga considerou-se que a carga possui disjuntores acessíveis ao *smart grid* de forma que não seja necessário o corte completo da carga.

Uma nova simulação foi realizada para a mesma configuração anterior, porém considerando um aumento de 100% em toda a demanda. Como esperado, o sistema nessa simulação apresentou ainda mais correntes fora do limite. De todas as horas consideradas para todos os dias, apenas em pequenos períodos do dia o *smart grid* não precisou atuar, pois o sistema já estava em funcionando adequadamente.

Dessa forma, em grande parte das situações simuladas houve corte de carga para solucionar o problema do sistema. O Gráfico 4.8 ilustra o percentual de redução de carga para cada hora do sábado, ou seja, quanto da carga foi necessário desligar para que essa demanda não comprometesse todo o alimentador, correndo o risco de desligar toda a sua carga.

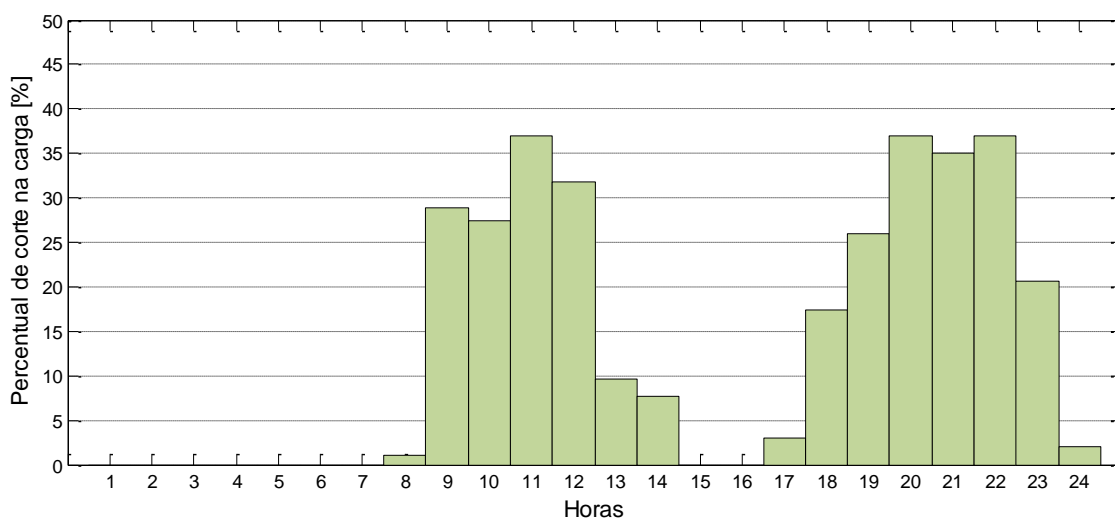


Gráfico 4.8 *Percentual de corte de carga para o sábado.*

Pode-se inferir do Gráfico 4.8 que na madrugada de sábado e entre 15 e 16 horas não houve sobrecarga em nenhum ponto, mesmo utilizando-se o dobro da demanda. Nos outros horários a sobrecarga nos transformadores forçou um corte de carga para que a corrente voltasse aos padrões determinados, assim, houve desligamento de carga na barra que estava causando a sobrecorrente. Vê-se que nos horários onde há pico de consumo no sábado, como às 11 horas nas unidades comerciais, o corte de carga foi superior a 35%, pois a corrente no trecho 21-22 para esse horário chegou a 1,6831 pu, precisando assim de uma grande diminuição de carga para que a corrente volte a valores padrões.

Para as três situações simuladas, houve a mesma quantidade de geração, porém a demanda foi alterada de forma que se observasse a resposta do sistema a sobrecargas e a atuação do *smart grid* com o controle da carga que está afetando diretamente o sistema. O Quadro 4.9 faz uma comparação entre o percentual da carga que é atendido pela geração distribuída em cada uma das situações. Neste resultado, o percentual da carga atendida nos dias úteis, sábados e domingos são distintos, porém extremamente próximos. Foi considerada então a

média dos valores, representando aproximadamente o atendimento da carga pela GDBM em qualquer dia considerado.

Quadro 4.9 *Percentual da carga atendido pela geração a partir da biomassa – 1.*

Aumento da carga [%]	Percentagem da carga atendida pela GDBM
0	21,00
20	17,70
50	14,30
100	11,50

Com o aumento da carga, é realmente esperado que a sua percentagem atendida pela GDBM diminua, fato verificado pelo Quadro 4.9. O importante é ressaltar que essa percentagem deveria ser ainda menor nos casos com aumento de demanda, porém o *smart grid* atua cortando a carga excedente, aumentando assim a relação geração/demanda. O controle de carga nas simulações desse item traz como resultado a importante constatação de que mesmo que haja um aumento na carga dimensionada, o sistema pode evitar um desligamento total da subestação apenas desligando parte de cargas em pontos críticos do alimentador.

4.9 SIMULAÇÃO COM A CARGA VARIANDO E GERAÇÃO EM UMA A CADA TRÊS UNIDADES CONSUMIDORAS

Essa simulação tem um objetivo parecido com a do item 4.8, a mudança básica é na localização das GDBM. Nessa simulação novamente será alterada a demanda de forma a forçar ultrapassagem dos limites estabelecidos, porém a GDBM será distribuída de forma que haja geração somente em uma a cada três unidades consumidoras, totalizando seis pontos de geração no alimentador. A Figura 4.5 apresenta novamente a disposição das unidades geradoras no alimentador para esse item.

Na primeira situação tem-se a demanda aumentada em 10%, limite de aumento que ocasiona o primeiro erro decorrente dos valores de corrente fora do limite permitido. O Quadro 4.10 apresenta essa primeira ocorrência de problema causado pela sobrecorrente acima do valor limite de 1 pu, ocorrida para um dia útil.

Quadro 4.10 Simulação com carga 10% acima do padrão – limite que afeta o sistema.

Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Carga antes do SG [kW]	Carga após o SG [kW]
21	1,0658	0,9531	13-14	0,9966	0,9553	Corrente	60,7	57,2

Pelo Quadro 4.10 é visto que a sobrecorrente ocorreu entre as barras 13 e 14 às 21 horas do dia útil, necessitando a atuação do *smart grid* para reduzir a quantidade de demanda até que o limite de capacidade do sistema seja respeitado. O trecho determinado é a representação do transformador, o que demonstra que o mesmo não está preparado para esse aumento de carga. O *smart grid* atuou, portanto, reduzindo 3,5 kW na carga da barra 14, eliminando assim o problema, uma vez que a corrente passou a ser 0,9966 pu.

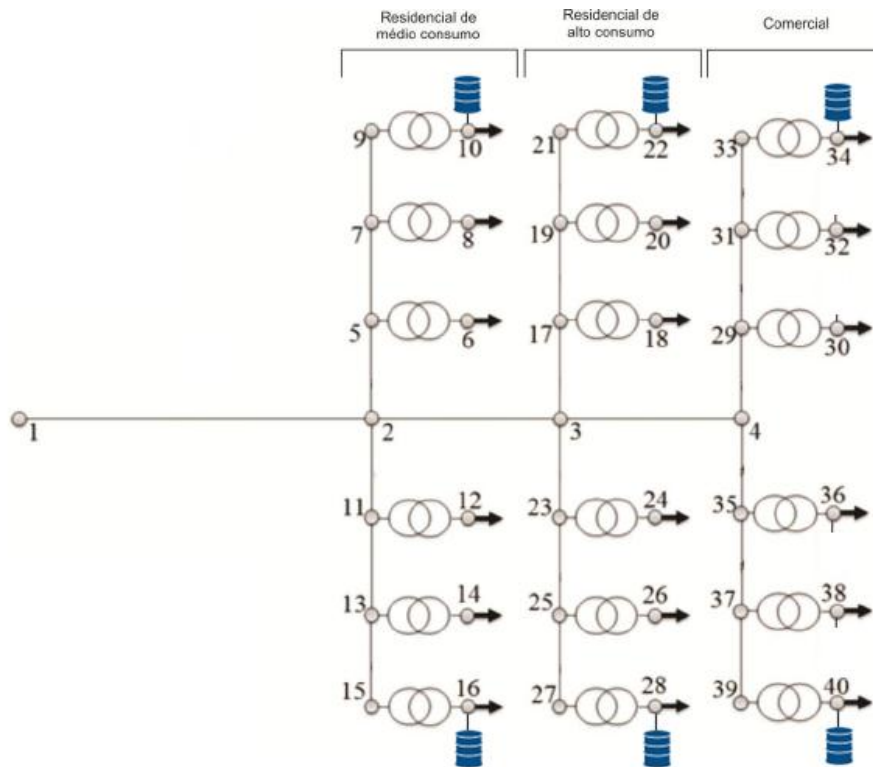


Figura 4.5 Geração típica em uma a cada três unidades consumidoras.

Foi utilizado nesse item o mesmo método de análise utilizado no item 4.8, assim, com o intuito de verificar como o sistema se comporta com o aumento de demanda, a simulação foi realizada novamente com a alteração da demanda para 50% acima do padrão. Com esse cenário mais problemas foram encontrados e com ocorrência em todos os dias de análise, os resultados são apresentados nos Quadros 4.11 a 4.13.

Quadro 4.11 Simulação com carga 50% acima do padrão – dia útil.

Dia que o limite foi ultrapassado	Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]
Dia útil	12	1,0310	0,9439	31-32	0,9991	0,9451	Corrente	100,8	97,8
Dia útil	13	1,0096	0,9453	31-32	0,9991	0,9457	Corrente	98,8	97,8
Dia útil	14	1,0541	0,9439	37-38	0,9994	0,9463	Corrente	103,0	97,9
Dia útil	15	1,1138	0,9414	31-32	0,9923	0,9461	Corrente	108,6	97,2
Dia útil	16	1,1037	0,9422	31-32	0,9937	0,9463	Corrente	107,7	97,4
Dia útil	17	1,0701	0,9433	31-32	0,9944	0,9462	Corrente	104,5	97,4
Dia útil	19	1,1957	0,9443	11-12	0,9999	0,9479	Corrente	67,8	57,1
Dia útil	20	1,3894	0,9367	7-8	0,9984	0,9436	Corrente	78,1	65,8
Dia útil	21	1,4763	0,9341	13-14	0,9990	0,9457	Corrente	82,8	57,0
Dia útil	22	1,2693	0,9427	13-14	0,9971	0,9493	Corrente	71,8	57,0
Dia útil	23	1,0748	0,9506	13-14	0,9990	0,9523	Corrente	61,3	57,1

Quadro 4.12 *Simulação com carga 50% acima do padrão – sábado.*

Dia que o limite foi ultrapassado	Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]
Sábado	9	1,1263	0,9400	31-32	0,9930	0,9450	Corrente	109,6	97,1
Sábado	10	1,1006	0,9409	35-36	0,9998	0,9450	Corrente	107,2	96,9
Sábado	11	1,2851	0,9331	39-40	0,9999	0,9421	Corrente	124,2	97,5
Sábado	12	1,1725	0,9388	35-36	0,9998	0,9443	Corrente	114,0	97,0
Sábado	19	1,1016	0,9479	19-20	0,9989	0,9490	Corrente	62,7	56,7
Sábado	20	1,2771	0,9370	13-14	0,9995	0,9406	Corrente	124,2	97,5
Sábado	21	1,2696	0,9392	19-20	0,9978	0,9418	Corrente	71,7	56,9
Sábado	22	1,3136	0,9394	13-14	0,9992	0,9438	Corrente	74,1	57,0
Sábado	23	1,0282	0,9523	19-20	0,9980	0,9524	Corrente	58,8	57,0
Sábado	9	1,1263	0,9400	31-32	0,9930	0,9450	Corrente	109,6	97,1
Sábado	10	1,1006	0,9409	35-36	0,9998	0,9450	Corrente	107,2	96,9

Quadro 4.13 *Simulação com carga 50% acima do padrão – domingo.*

Dia que o limite foi ultrapassado	Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]
Domingo	18	1,1117	0,9482	13-14	0,9910	0,9519	Corrente	63,3	56,6
Domingo	19	1,2487	0,9402	7-8	0,9976	0,9415	Corrente	70,5	56,5
Domingo	20	1,2401	0,9371	21-22	0,9991	0,9389	Corrente	120,6	97,6
Domingo	21	1,2774	0,9384	7-8	0,9991	0,9399	Corrente	72,0	56,5
Domingo	22	1,2434	0,9398	13-14	0,9972	0,9411	Corrente	70,2	56,8
Domingo	23	1,0742	0,9488	13-14	0,9985	0,9514	Corrente	61,2	57,0

É possível observar nos quadros apresentados nesse item que com o aumento de 50% na demanda o sistema funciona com várias correntes acima de 1 pu, fato que não é permitido pois compromete o transformador, exigindo assim a atuação do *smart grid*. Enquanto com a sobrecarga de 10% o sistema só apresentou sobrecorrente em uma hora do dia, a demanda aumentada em 50% fez esse número subir para vinte e oito horários com sobrecorrente, fazendo assim que o alimentador fique bastante afetado. O controle de carga é realizado então para normalizar essa situação, desligando cargas em todos os horários em que há sobrecorrente. Novamente a corrente é levada para abaixo de 1 pu a partir do corte de carga onde o transformador está em sobrecarga. O Gráfico 4.9 traz as cargas antes e depois da atuação do *smart grid* em um dia útil de forma que, com a diferença entre as curvas, possa-se perceber a carga que precisou ser desligada para normalizar o sistema.

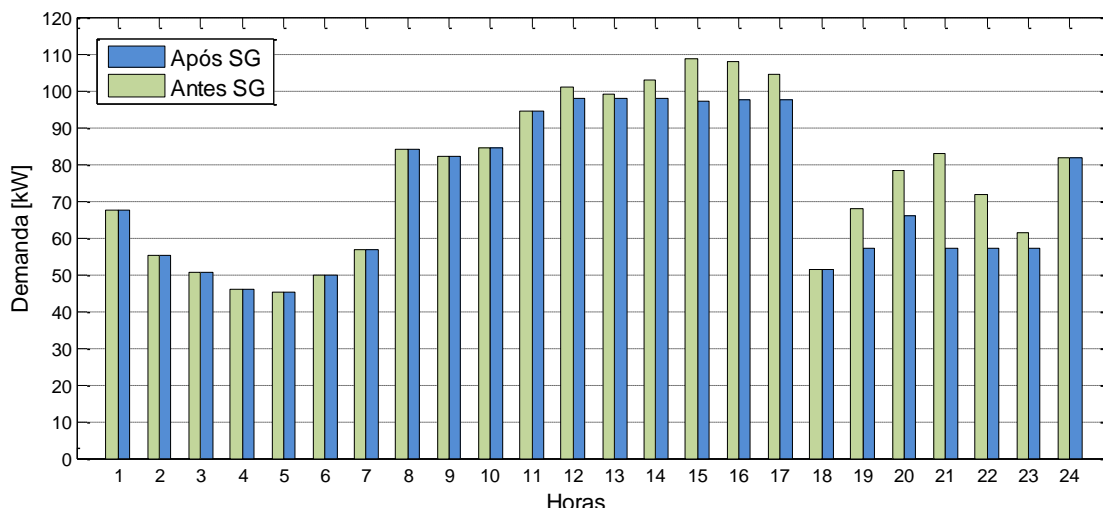


Gráfico 4.9 Demandas antes e depois da atuação do *smart grid* para o dia útil.

Como já citado e visto no Gráfico 4.9, nessa simulação existem várias horas do dia com sobrecarga em algum ponto do alimentador. Pode-se observar no gráfico que o *smart grid* atuou entre meio dia e 23 horas, exceto às 18 horas. Assim, para todos esses horários é possível observar uma diferença entre a potência antes e após o SG, diferença essa que foi realizada com o corte da carga nos pontos onde havia a sobrecorrente.

Assim como no item 4.8, foi realizada a simulação com a carga sendo o dobro da demanda típica para observar como o *smart grid* reage no controle da carga com uma sobrecarga

maior. O resultado dessa simulação mostrou que, para todos os dias considerados, a corrente esteve acima de 1 pu na maior parte do dia, exigindo corte de carga.

O Gráfico 4.10 apresenta o percentual de redução de carga para cada hora do dia útil. Quando esse percentual é zero, significa que a corrente não excedeu o limite determinado e, portanto, não houve necessidade de corte de carga. Nos horários onde houve corte de carga, o gráfico indica quanto foi necessário desligar na barra com sobrecorrente para que a corrente voltasse a ser inferior a 1 pu e o sistema funcionasse adequadamente.

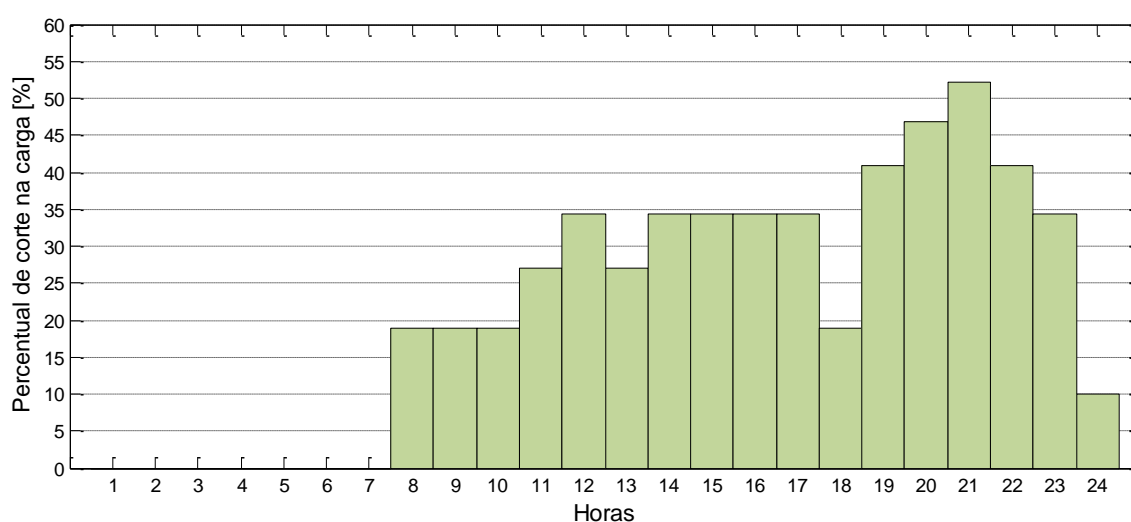


Gráfico 4.10 *Percentual de corte de carga para um dia útil.*

Nota-se pelo Gráfico 4.10 que em grande parte do dia o *smart grid* precisou atuar desligando parte da carga na barra com sobrecorrente. Nesse caso simulado ocorreu a situação mais crítica, onde mais de 50% de carga precisou ser cortada para que sistema não atingisse os limites de corrente. Esse resultado é interessante quando se percebe que uma situação extrema dessa levaria o sistema a desligar-se por inteiro, havendo corte em 100% da carga. O *smart grid* atuaria então no sentido de proteger o sistema desse desligamento total, assim, o corte e 50% em uma barra evitaria um desligamento generalizado de todo o sistema.

A potência gerada pela GDBM nos três casos simulados é a mesma, pois a única alteração entre os casos é o aumento percentual da demanda. O Quadro 4.14 mostra a percentagem da carga que é atendida pela GDBM.

Quadro 4.14 *Percentual da carga atendido pela geração a partir da biomassa – 2.*

Aumento da carga [%]	Percentagem da carga atendida pela GDBM
0	21,00
10	19,30
50	14,40
100	11,80

Esse resultado é bem próximo ao resultado obtido no Quadro 4.9, com geração em todas as unidades consumidoras. Isso ocorre porque a geração, independente de ser distribuída ou localizada, tem o mesmo valor e está suprindo a mesma quantidade de carga.

4.10 SIMULAÇÃO COM CORTE NA ALIMENTAÇÃO DA SUBESTAÇÃO

No decorrer desse estudo, uma das ideias interessantes para análise do sistema seria a de retirar a alimentação realizada pela subestação, pois possibilitaria um entendimento extra da GDBM conjuntamente com a atuação do *smart grid* nessa situação. O corte dessa alimentação possibilitaria saber como a GDBM suportaria a rede e como o *smart grid* selecionaria as cargas que continuariam ligadas ao sistema.

Entretanto, essa situação não teve êxito em sua simulação devido à limitação do MatPower em simular sem que haja uma geração para suprir toda carga, ou seja, o programa exige que exista um balanço de potências entre as cargas e a geração principal, a barra swing, independente de onde ela se localize no alimentador.

Assim, no caso aplicado, sempre que se retira a subestação da rede e deixa o sistema alimentado somente pelas GDBM, uma dessas gerações é automaticamente escolhida para ser a barra swing e dela toda a demanda necessária para o sistema é injetada, independente de a GDBM ter ou não condições de suprir tamanha demanda.

4.11 SIMULAÇÃO COM SOBRECORRENTE NO RAMO PRINCIPAL E CORTE DE CARGA POR FATOR DE POTÊNCIA

Em todos os casos simulados os problemas encontraram-se nos transformadores, pois estes foram dimensionados para a demanda, diferente dos cabos, que foram dimensionados pelo

critério físico, resultando em um sobredimensionamento elétrico. Assim, nessa simulação a ideia foi aumentar a capacidade dos transformadores de forma que, com o aumento da demanda, sejam encontrados problemas de tensão e corrente no ramo principal do alimentador para que fosse possível mostrar mais maneiras de atuação do smart grid. Além desta medida, foi também alterada a bitola do ramo principal de 2 AWG para 4 AWG, pois esta é a menor bitola para cabos de distribuição determinada pela norma NTD – 6.05 da CEB²².

Baseado nos resultados encontrados anteriormente, nos quais foram visto que a GDBM não causaria problemas à rede se considerada uma distribuição não centralizada, pensou-se na situação onde a presença da GDBM somente diminuiria a demanda, não causando problemas por injeção de potência no sistema. Assim, como se deseja observar os efeitos causados pelo aumento da demanda, entendeu-se que não traria muitos benefícios para a análise a inserção da GDBM.

A Figura 4.6 ilustra o sistema considerado, com as alterações feitas nas bitolas dos condutores, nos fatores de potência das cargas e na capacidade dos transformadores.

Para essa análise foi considerado que a demanda era aproximadamente três vezes maior que a demanda típica utilizada em todo o trabalho. Esse foi o aumento necessário para que, com o sistema sobredimensionado, ocorresse ultrapassagem dos limites de tensão e corrente no ramo principal. A demanda três vezes maior pode ser justificada considerando, por exemplo, um local onde são instalados prédios residenciais ou comerciais onde anteriormente existiam casas, aumentando consideravelmente o perfil de consumo desse ramal.

Nessa simulação foi utilizado ainda outro tipo de controle pelo *smart grid*, selecionando o corte da carga com o menor fator de potência. No caso do problema continuar sendo no transformador (sobrecorrente ou subtensão), a atuação do *smart grid* continua idêntica ao controle já demonstrado nas simulações anteriores, cortando carga na barra onde o problema se encontra. Porém, se o problema encontrado foi no ramo principal, o corte será feito na

²² Os condutores deverão ser de alumínio nú, cuja seção deverá ser dimensionada pelo projetista e aprovada pela CEB. A seção mínima deverá ser de 4 AWG (CEB, 1998).

barra onde o fator de potência é menor, de forma que a corrente no ramo principal diminua. Para observar esse controle quando ocorre problema no ramo principal, os valores de fator de potência foram alterados em todas as barras, conforme mostrado na Figura 4.6, de maneira que a situação se aproxime da realidade e possibilite uma atuação do *smart grid* baseada nessas diferenças entre as características das cargas.

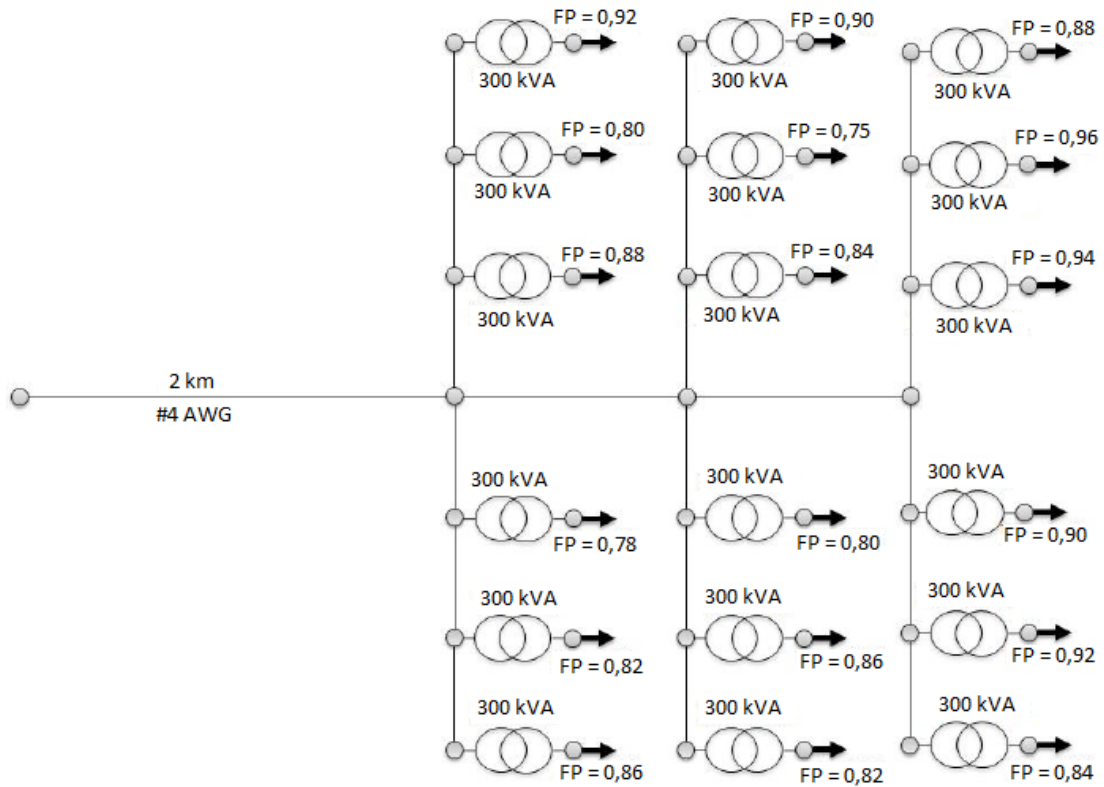


Figura 4.6 Alimentador com as alterações realizadas nos parâmetros.

Assim, os parâmetros do condutor no ramo principal foram alterados para os parâmetros referentes ao condutor 4 AWG citados anteriormente no item 3.2.1.1.1. Os parâmetros dos transformadores, por sua vez, foram alterados conforme a norma NTD 8.07 da CEB, de agosto de 2012 para os seguintes valores: potência nominal de 300 kVA, resistência de $0,07667 \Omega/\text{km}$, reatância de $0,29056 \Omega/\text{km}$ e ampacidade de 0,15 pu. Os resultados para essa simulação são apresentados nos Quadros 4.15 a 4.17.

Quadro 4.15 Simulação com sobrecarga no ramo principal e corte de carga por fator de potência – dia útil.

Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Barra de menor fator de potência	Carga antes da atuação do SG por FP [kW]	Carga após a atuação do SG por FP [kW]
1	0,6198	0,9519	19-20	132,7	132,7	0,6198	0,9519	Nenhum	20	132,7	132,7
2	0,5012	0,9601	19-20	108,2	108,2	0,5012	0,9601	Nenhum	20	108,2	108,2
3	0,4588	0,9631	19-20	99,4	99,4	0,4588	0,9631	Nenhum	20	99,4	99,4
4	0,4168	0,9658	19-20	90,5	90,5	0,4168	0,9658	Nenhum	20	90,5	90,5
5	0,4084	0,9662	19-20	88,7	88,7	0,4084	0,9662	Nenhum	20	88,7	88,7
6	0,4534	0,9629	19-20	98,2	98,2	0,4534	0,9629	Nenhum	20	98,2	98,2
7	0,5173	0,9580	19-20	111,5	111,5	0,5173	0,9580	Nenhum	20	111,5	111,5
8	0,7788	0,9411	19-20	164,9	164,9	0,7788	0,9411	Nenhum	20	164,9	164,9
9	0,8165	0,9341	1-2	0	0	0,8165	0,9341	Nenhum	20	161,3	161,3
10	0,7960	0,9399	1-2	0	0	0,7960	0,9399	Nenhum	20	138,0	138,0
11	0,8944	0,9325	1-2	0	0	0,8944	0,9325	Nenhum	20	153,9	153,9
12	0,9783	0,9246	1-2	0	0	0,9783	0,9246	Nenhum	20	174,0	174,0
13	0,9559	0,9278	1-2	0	0	0,9559	0,9278	Nenhum	20	164,3	164,3
14	0,9485	0,9273	1-2	0	0	0,9485	0,9273	Nenhum	20	161,0	161,0
15	0,9635	0,9245	1-2	0	0	0,9635	0,9245	Nenhum	20	162,8	162,8
16	0,9519	0,9254	1-2	0	0	0,9519	0,9254	Nenhum	20	155,1	155,1
17	0,9577	0,9266	1-2	0	0	0,9577	0,9266	Nenhum	20	154,2	154,2
18	0,9272	0,9279	1-2	0	0	0,9272	0,9279	Nenhum	20	171,3	171,3
19	0,9838	0,9209	19-20	203,8	203,8	0,9838	0,9209	Nenhum	20	203,8	203,8
20	1,1095	0,9135	1-2	228,0	206,2	0,9150	0,9337	Corrente	20	228,0	0
21	1,0675	0,9162	1-2	220,0	205,1	0,9935	0,9196	Corrente	20	220,0	205,1
22	0,9873	0,9230	19-20	205,0	205,0	0,9873	0,9230	Nenhum	20	205,0	205,0
23	0,9266	0,9282	19-20	193,5	193,5	0,9266	0,9282	Nenhum	20	193,5	193,5
24	0,7606	0,9412	19-20	161,0	161,0	0,7606	0,9412	Nenhum	20	161,0	161,0

Quadro 4.16 Simulação com sobrecarga no ramo principal e corte de carga por fator de potência – sábado.

Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Barra de menor fator de potência	Carga antes da atuação do SG por FP [kW]	Carga após a atuação do SG por FP [kW]
1	0,6601	0,9474	19-20	140,7	140,7	0,6601	0,9474	Nenhum	20	140,7	140,7
2	0,4905	0,9596	19-20	105,9	105,9	0,4905	0,9596	Nenhum	20	105,9	105,9
3	0,4530	0,9631	1-2	0	0	0,4530	0,9631	Nenhum	20	94,6	94,6
4	0,4499	0,9632	1-2	0	0	0,4499	0,9632	Nenhum	20	94,9	94,9
5	0,4536	0,9624	19-20	98,2	98,2	0,4536	0,9624	Nenhum	20	98,2	98,2
6	0,4626	0,9626	1-2	0	0	0,4626	0,9626	Nenhum	20	95,2	95,2
7	0,5123	0,9589	1-2	0	0	0,5123	0,9589	Nenhum	20	104,7	104,7
8	0,7426	0,9340	37-38	156,0	156,0	0,7426	0,9340	Nenhum	20	125,3	125,3
9	1,0573	0,9147	37-38	215,6	178,1	0,9255	0,9184	Corrente	20	176,7	0
10	1,0326	0,9146	37-38	210,9	179,5	0,9366	0,9183	Corrente	20	171,3	0
11	1,2114	0,9150	37-38	244,2	161,7	0,9839	0,9184	Corrente	20	164,3	0
12	1,1014	0,9146	37-38	224,2	179,7	0,9968	0,9150	Tensão	20	156,3	156,3
13	0,8811	0,9248	1-2	0	0	0,8811	0,9248	Nenhum	20	150,1	150,1
14	0,8404	0,9324	1-2	0	0	0,8404	0,9324	Nenhum	20	167,2	167,2
15	0,7667	0,9387	1-2	0	0	0,7667	0,9387	Nenhum	20	150,7	150,7
16	0,7212	0,9434	1-2	0	0	0,7212	0,9434	Nenhum	20	139,5	139,5
17	0,8083	0,9360	1-2	0	0	0,8083	0,9360	Nenhum	20	158,1	158,1
18	0,7973	0,9386	1-2	0	0	0,7973	0,9386	Nenhum	20	150,4	150,4
19	0,9507	0,9226	19-20	197,3	197,3	0,9507	0,9226	Nenhum	20	197,3	197,3
20	1,1974	0,9148	19-20	244,2	205,8	0,9709	0,9285	Corrente	20	244,2	0
21	1,1643	0,9099	19-20	238,3	209,1	0,9312	0,9312	Corrente	20	238,3	0
22	1,0974	0,9140	19-20	225,6	206,1	0,9124	0,9340	Corrente	20	225,6	0
23	0,9279	0,9283	19-20	193,8	193,8	0,9279	0,9283	Nenhum	20	193,8	193,8
24	0,7435	0,9417	19-20	157,5	157,5	0,7435	0,9417	Nenhum	20	157,5	157,5

Quadro 4.17 Simulação com sobrecarga no ramo principal e corte de carga por fator de potência – domingo.

Hora	Máxima corrente sem SG [pu]	Mínima tensão sem SG [pu]	Trecho de corrente máxima	Carga antes da atuação do SG [kW]	Carga após a atuação do SG [kW]	Máxima corrente com SG [pu]	Mínima tensão com SG [pu]	Limite alcançado	Barra de menor fator de potência	Carga antes da atuação do SG por FP [kW]	Carga após a atuação do SG por FP [kW]
1	0,6957	0,9427	1-2	0	0	0,6957	0,9427	Nenhum	20	143,6	143,6
2	0,5933	0,9508	1-2	0	0	0,5933	0,9508	Nenhum	20	123,6	123,6
3	0,5889	0,9511	1-2	0	0	0,5889	0,9511	Nenhum	20	121,8	121,8
4	0,5234	0,9576	1-2	0	0	0,5234	0,9576	Nenhum	20	104,1	104,1
5	0,5123	0,9594	1-2	0	0	0,5123	0,9594	Nenhum	20	97,3	97,3
6	0,5116	0,9592	1-2	0	0	0,5116	0,9592	Nenhum	20	98,2	98,2
7	0,5386	0,9575	1-2	0	0	0,5386	0,9575	Nenhum	20	102,0	102,0
8	0,5853	0,9546	1-2	0	0	0,5853	0,9546	Nenhum	20	107,0	107,0
9	0,6625	0,9486	1-2	0	0	0,6625	0,9486	Nenhum	20	121,5	121,5
10	0,7517	0,9415	1-2	0	0	0,7517	0,9415	Nenhum	20	138,6	138,6
11	0,8406	0,9330	1-2	0	0	0,8406	0,9330	Nenhum	20	161,0	161,0
12	0,8514	0,9293	1-2	0	0	0,8514	0,9293	Nenhum	20	175,5	175,5
13	0,8060	0,9343	1-2	0	0	0,8060	0,9343	Nenhum	20	160,7	160,7
14	0,7319	0,9392	1-2	0	0	0,7319	0,9392	Nenhum	20	152,5	152,5
15	0,7085	0,9415	19-20	148,0	148,0	0,7085	0,9415	Nenhum	20	148,0	148,0
16	0,7359	0,9408	1-2	0	0	0,7359	0,9408	Nenhum	20	145,7	145,7
17	0,7929	0,9365	1-2	0	0	0,7929	0,9365	Nenhum	20	156,6	156,6
18	0,9068	0,9261	19-20	186,4	186,4	0,9068	0,9261	Nenhum	20	186,4	186,4
19	1,1085	0,9147	1-2	223,9	200,4	0,9818	0,9308	Corrente	20	223,9	0
20	1,1799	0,9150	1-2	237,1	193,9	0,9983	0,9278	Corrente	20	237,1	0
21	1,1382	0,9150	1-2	229,2	193,2	0,9571	0,9304	Corrente	12	162,8	0
22	1,1138	0,9146	1-2	224,7	199,2	0,9913	0,9302	Corrente	20	224,7	0
23	0,9308	0,9263	1-2	0	0	0,9308	0,9263	Nenhum	20	177,5	177,5
24	0,8189	0,9330	1-2	0	0	0,8189	0,9330	Nenhum	20	165,2	165,2

O Quadro 4.15 mostra todas as horas relativas a um dia útil, é possível observar que somente às 20 e 21 horas houve ultrapassagem do limite de corrente e tensão. Às 20 horas, a maior sobrecorrente do sistema se situa no transformador entre as barras 19 e 20, situação que é resolvida pela atuação do *smart grid* cortando parte da carga da barra 20. Porém, esse corte não é suficiente para diminuir a corrente do ramo principal para baixo de 1 pu, exigindo novamente a atuação do *smart grid*. Nesse ponto, a maior corrente no sistema é no ramo principal, portanto o corte completo é feito na carga da barra de menor fator de potência (barra 20), levando a corrente no ramo principal para 0,915 pu, resolvendo assim o problema que afetava o sistema. Já às 21 horas existia sobrecorrente no trecho entre as barras 19 e 20 e o *smart grid* realizou o corte em parte da carga da barra 20, diminuindo a sua corrente para 0,9935 pu, assim, todas as correntes estavam dentro do limite determinado e não foi preciso mais nenhuma atuação do *smart grid*.

No sábado, conforme demonstrado pelo Quadro 4.16, encontraram-se diversos problemas onde a tensão e a corrente ultrapassaram os limites por razões diferentes às já analisadas para o dia útil. Entre 9 e 11 horas as correntes estavam acima de 1 pu no transformador que se encontra entre as barras 37 e 38, assim a atuação do *smart grid* era esperada para realizar o controle de carga naquela barra. O desligamento de parte dessa carga foi suficiente para eliminar a sobrecorrente no transformador em questão, porém não foi capaz de eliminar a sobrecorrente no ramo principal entre as barras 1 e 2. Assim, o *smart grid* tomou a decisão de cortar a carga na barra com o menor fator de potência (barra 20), solucionando o problema. Às 12 horas do sábado também houve sobrecorrente no transformador no trecho entre as barras 37 e 38, porém o corte de 44,5 kW foi suficiente para eliminar a sobrecarga no transformador e no ramo principal, não exigindo o corte da barra com menor fator de potência. Entre 20 e 22 horas o controle de carga atuou de forma semelhante ao dia útil, onde o corte por fator de potência foi necessário já que o corte parcial na carga do transformador em sobrecarga não foi suficiente para eliminar a sobrecorrente no ramo principal.

No domingo, os problemas encontrados foram em sua maioria iguais aos do dia útil, exceto pelo que ocorreu às 21 horas, conforme ilustrado pelo Quadro 4.17. Nesse horário, o corte de carga realizado para eliminar a sobrecorrente no transformador novamente não foi suficiente para eliminar a sobrecorrente no ramo principal, exigindo desligamento da barra 20, que é a barra com o menor fator de potência. Entretanto, o corte da barra 20 também

não fez com que a corrente no ramo principal ficasse abaixo de 1 pu, forçando o *smart grid* a realizar uma segunda atuação por escolha do menor fator de potência. Como a barra 20 já se encontrava totalmente desligada, o *smart grid* selecionou a barra com o segundo menor fator de potência, que nesse caso era a barra 12. Realizado o corte total da barra 12, o sistema voltou às condições normais de operação.

Até então, os estudos realizados foram sempre baseados em um alimentador para um sistema de distribuição em tensão primária, mas nada impede de se estudar o controle realizado em um *smart grid* a partir de um sistema de distribuição em tensão secundária. As considerações feitas para a realização do corte de carga baseado no pior fator de potência pode ser encontrada de forma ainda mais específica pensando-se em uma menor escala, ou seja, não mais em um sistema de média tensão e sim em um sistema de baixa tensão. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram como poderia ser visualizado o problema em um alimentador como o apresentado.

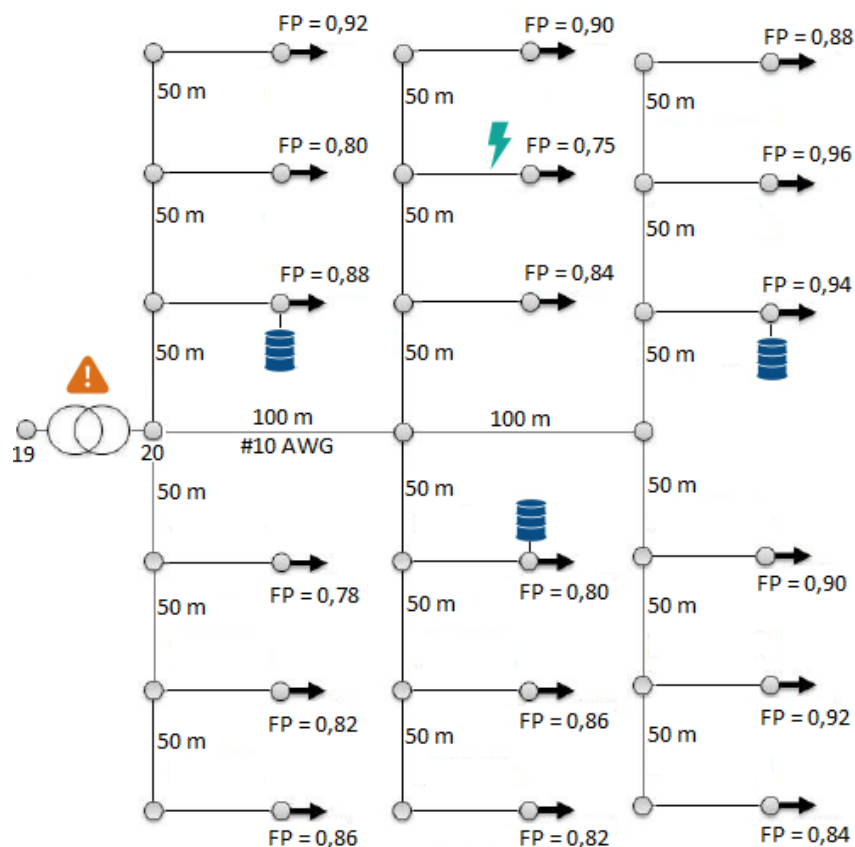


Figura 4.7 Alimentador em um sistema de distribuição de tensão secundária.

A Figura 4.7 demonstra um tipo de perfil de alimentador que poderia ser analisado, com GDBM em algumas unidades consumidoras e um transformador que poderia ser dimensionado de acordo com a demanda do alimentador. Assim como o transformador, os comprimentos e tipo de cabos também seriam parâmetros que devem ser alterados conforme o interesse em se realizar a análise. É interessante observar que o sistema ainda poderia realizar o controle de carga mesmo em baixa tensão.

A situação estudada anteriormente, quando o sistema apresentava sobrecorrente no transformador entre as barras 19 e 20, trecho que apresentava o menor fator de potência, é transformado então no sistema representado pela Figura 4.7. Pode-se observar que a barra principal desse sistema é representada agora pelo trecho 19-20. No caso anterior, o controle do *smart grid* deveria atuar sobre a sobrecorrente existente nesse transformador, reduzindo assim a carga para então o sistema ficar com operabilidade padrão. Esse mesmo controle deve atuar, portanto, no alimentador de baixa tensão utilizando o *smart grid* baseado no fator de potência. Os dois alimentadores se distinguem ainda na representação dos lotes, pois no alimentador distribuição de tensão primária cada carga representava 72 lotes, já no de tensão secundária, cada carga representa 4 lotes, podendo analisar da forma como se queira estudar.

A Figura 4.8 demonstra esses 4 lotes, contendo uma residência cada, que se diferem por suas divisões de circuitos combinados ao *smart grid*. Por exemplo, se o *smart grid* vier a atuar para a redução de carga e escolha por determinada especificação a residência 1, essa mesma residência ficaria sem energia elétrica independente da quantidade de potência que o sistema precisa reduzir, pois seu sistema está totalmente dependente de um único ponto de controle de entrada de energia. Porém, se houver necessidade de corte e a residência escolhida seja a residência 4, o sistema de controle poderia priorizar pontos de carga que trariam mais benefícios ao sistema e, apesar de haver corte em alguns tipos de carga como chuveiros, por exemplo, a casa ainda assim não ficaria sem energia elétrica e poderia então manter parte de suas cargas ligadas conforme sua prioridade.

Assim, caso seja necessário, o *smart grid* poderia fazer sua atuação cada vez mais particular sem afetar totalmente o consumidor e conseguir resolver o problema no sistema principal, o que demonstra mais vantagens desse mecanismo se desenvolver em pontos além da central de distribuição e chegar a controlar cada ponto de carga de cada residência.

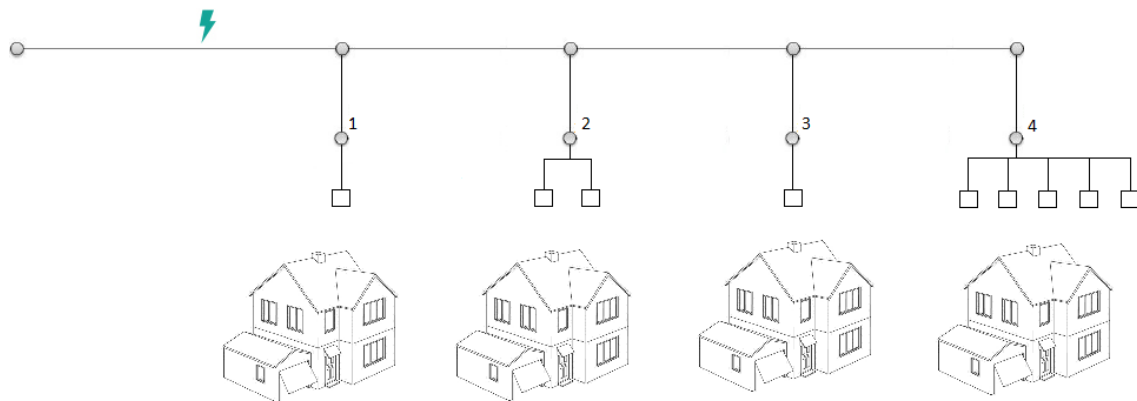


Figura 4.8 *Representação do controle de carga em residências.*

4.12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises feitas neste capítulo deram uma visão mais ampla do controle realizado em *smart grid* e como o sistema suportaria a injeção de potência por uma geração a partir da biomassa de resíduos sólidos urbanos. Entre várias importantes conclusões obtidas, destaca-se a de que o sistema não suporta uma GDBM centralizada com maior geração, uma vez que esta causa problemas de sobrecarga nos transformadores que não são preparados para tal fluxo de potência, observando os limites determinados pelos órgãos responsáveis.

O sistema está preparado para uma geração equilibrada e bem distribuída em seus diversos pontos, não sobrecarregando qualquer transformador e fazendo com que a concessionária seja auxiliada na tarefa de atender a carga. Certamente, o controle executado em *smart grid* possibilita maior segurança e robustez ao sistema de energia elétrica, haja vista que os problemas analisados, como sobrecarga e subtensão, são resolvidos a partir de operações na rede que atuam diretamente nos pontos onde se localizam os problemas.

Assim, o controle de carga é realizado de forma que não haja injustiça ao consumidor, desligando prioritariamente os consumidores que estão prejudicando o sistema mais diretamente e evitando o desligamento generalizado de todo o alimentador. Dessa forma, problemas de sobrecarga no transformador devido ao aumento de demanda exigem que a carga seja cortada até que seu limite esteja no padrão determinado. Caso o sistema seja afetado por sobrecorrente no ramo principal, a escolha do corte na carga com pior fator de potência implica em uma maior segurança no sistema de distribuição de energia.

5 CONCLUSÕES

5.1 ASPECTOS GERAIS

Esse trabalho apresenta um estudo da viabilidade técnica da inserção de uma geração distribuída utilizando como fonte a biomassa de resíduos sólidos urbanos. A carga energética utilizada para a geração de energia é obtida a partir do biogás que é gerado no processo de decomposição da matéria orgânica dos resíduos. Conjuntamente, é realizado um estudo do comportamento do sistema com a introdução de pontos de geração distribuída em uma rede em *smart grid*, observando a resposta do sistema de distribuição a essa nova configuração. O objetivo, a motivação e a estrutura utilizada nesse trabalho foram descritas no Capítulo 1.

O Capítulo 2 abordou os conceitos teóricos associados ao tema do trabalho. Foi apresentado o conceito de biomassa e de resíduos sólidos, além de explorar as diversas tecnologias envolvidas para a conversão da energia contida nos resíduos em energia elétrica. Ainda no Capítulo 2 foram introduzidas as definições de geração distribuída e de *smart grid* e suas principais características, de forma que se fosse possível criar um embasamento teórico para se obter os objetivos propostos.

O Capítulo 3 tratou dos materiais utilizados para se conseguir os resultados, apresentou o modelo de alimentador utilizado para simular a rede de distribuição de energia elétrica e as suas principais características. Ainda em relação aos materiais utilizados, falou-se das ferramentas computacionais utilizadas e dos parâmetros considerados para o funcionamento do programa. Apresentou-se também nesse capítulo a metodologia utilizada no trabalho para a determinação da potência gerada pelo sistema proposto e para a execução da rotina de simulação.

O Capítulo 4 descreveu os resultados obtidos em cada situação simulada e, a partir desses dados, realizou-se a análise proposta como objetivo do trabalho. Foram apresentadas situações onde a geração proposta nesse trabalho atuaria em diversas configurações para que se obtivesse uma análise de maneira ampla da aplicação da geração distribuída a partir de resíduos sólidos urbanos.

Este capítulo, por sua vez, traz as principais conclusões e contribuições do trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Os resultados obtidos a partir das diversas simulações apresentadas abrangem grande parte das situações onde a geração distribuída a partir de resíduos sólidos urbanos poderia ser implementada, possibilitando a conclusão que a metodologia utilizada foi adequada para o objetivo do trabalho. As comparações de resultados realizada no trabalho permitiu ainda entender como a configuração das redes em *smart grid* com geração distribuída pode influenciar na segurança da rede e na qualidade da energia elétrica disponibilizada.

As análises permitiram as seguintes conclusões: (a) existe atualmente viabilidade técnica suficiente para se obter energia elétrica a partir dos resíduos sólidos urbanos, procedimento que já é realizado em diversos locais no mundo, inclusive no Brasil; (b) a potência gerada a partir dos resíduos urbanos não é grande o suficiente para gerar impactos significativos na rede de distribuição, exceto quando feita de forma concentrada e com quantidades excessivas de lixo; (c) apesar de não ter potência suficiente para suprir a demanda das unidades consumidoras, concluiu-se que a geração a partir de RSU traz uma grande vantagem tanto para o consumidor, que depende menos da concessionária e diminui seus gastos, quanto para a concessionária, que tem seus ramais aliviados, evitando problemas de sobrecarga e desligamentos; (d) o controle de carga realizado pelo *smart grid* traz inúmeros benefícios à rede de distribuição, pois protege de forma satisfatória o sistema em geral, mesmo que afetando pontos isolados; (e) as diversas maneiras de atuação do *smart grid* podem fazer seleção de cargas a serem desligadas em caso de sobrecarga no sistema, dando prioridade àqueles pontos onde a carga está acima do típico ou onde não há geração distribuída.

As principais contribuições deste trabalho são: (a) o aparato teórico amplo a respeito da utilização de resíduos sólidos urbanos como fonte de energia elétrica, com a apresentação e caracterização das rotas e tecnologias envolvidas; (b) a discussão sobre a possível implantação de redes *smart grid* no cenário brasileiro atual, estudando as tecnologias disponíveis; (c) a quantificação da potência que pode ser gerada a partir do biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos; (c) os resultados das simulações para um

alimentador típico de distribuição, demonstrando a viabilidade técnica de se inserir esse tipo de geração na rede elétrica já existente; (d) os resultados satisfatórios obtidos para a atuação do *smart grid* em diversas situações, normalizando o sistema que, caso não houvesse esse controles, seria desligado causando maiores prejuízos.

5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar das contribuições anteriormente citadas, diversos estudos relevantes podem ser realizados de forma a enriquecer e completar os estudos aqui realizados. Dessa forma, apresentam-se a seguir sugestões de análises e considerações para aprofundamento das análises realizadas e futuros trabalhos.

- (1) Realizar estudo financeiro com levantamento de custos para implementação do sistema proposto, considerando gastos com instalação, manutenção e transporte dos resíduos, caso necessário.
- (2) Realizar estudo comparativo entre a geração a partir de resíduos sólidos urbanos e a geração fotovoltaica, abordando aspectos técnicos, financeiros e ambientais.
- (3) Estudar características e equipamentos de proteção no alimentador com geração distribuída, incluindo-os na ferramenta computacional para simulação com essas considerações agregadas.
- (4) Considerar no algoritmo os desvios padrões das curvas de carga, de forma que essa carga não seja mais igual à carga típica para todas as unidades consumidoras, aproximando assim as curvas do perfil de carga real.
- (5) Analisar os impactos de se considerar a geração com tensão constante ao invés de geração com fator de potência constante, comparando as diferenças nos dois métodos e nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011 / ABRAF. – Brasília: 2012. 150p. : il. color; 21 cm.

ALMEIDA, W. G.; FREITAS, F. D.; Circuitos Polifásicos: Teoria e Ensaios. Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, Brasília, 1995.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 2 março 2013.

_____. Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. Brasília : Aneel, 2008. 236 p. : il.

_____. ANEEL regulamenta medidores eletrônicos. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5903&id_ar ea=90. Acesso em: 20 dez. 2012.

BORBA, Silvia Mary Pereira. Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso [Rio de Janeiro] 2006. XV, 134 p. 29,7 cm. COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2006.

BRABER, K. Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option on the verge of breakthrough. *Biomass and Bioenergy*, V.9, n.1–5, 1995.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <www.presidencia.gov.br/legislacao>. Acesso em: 2 mar. 2013.

BURANI, Geraldo Francisco; UDAETA, Miguel Edgar Morales; FUJII, Ricardo Junqueira et al. O cenário dos recursos energéticos distribuídos no estado de São Paulo. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas.

CEB – Companhia Energética de Brasília. Norma técnica de distribuição NTD – 1.02: Critérios para projeto de redes aéreas urbanas convencionais (redes aéreas nuas). Brasília, set. 2002.

CEB – Companhia Energética de Brasília. Norma técnica de distribuição NTD – 6.01: Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição – Unidades Consumidoras Individuais. Brasília, dez. 2005.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: biodigestores anaeróbios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997. v. 5, 246 p.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Eduardo Silva; GOMEZ, Edgardo Olivares. *Biomassa para Energia*. 1. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. 732p.

COSTA, David Freire da. *Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto*. 2006. 194f. Dissertação Mestrado em Energia – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.

CRUZ, Paulo de Tarso de Alexandria; NOGUEIRA, Manoel Martins. Oportunidades para o Desenvolvimento da Biomassa Energética no Brasil. *Biomassa & Energia*. Viçosa, v. 1, n.1, 2004.

DE BAERE, L. *State-of-the art of anaerobic digestion of municipal solid wast*. In: Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 2003, Cagliari, Italy. Proceedings. CISA.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Nacional de Energia 2030*. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 408p. : 199 il ; 23 cm.

_____. *Balço Energético Nacional 2012: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética*. – Rio de Janeiro : EPE, 2012.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente*. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p. ; il.

FIGUEIREDO, F. M.; *Médias e desvios padrões das cargas dos transformadores da CEB subdivididas em comerciais e residenciais, bem como em dias úteis, sábados e domingos* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <rafael@shayani.net> em 2 mar 2009.

FREITAS, Walmir; VIEIRA JR, José Carlos M.; FRANÇA, André Morelato; SILVA, Luiz Carlos P. da; COSTA, Vivaldo F. da. *Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída*. SBA. Sociedade Brasileira de Automática, v. 16, p. 332-344, 2005.

GUAN, Fenghua. H.; ZHAO, Dongmei M.; ZHANG, Xu Y.; SHAN, B. T.; LIU, Zhe Y. *Research on Distributed Generation Technologies and its Impact on Power Systems*. IEEE, 2009.

GUIMARÃES, Daniel Senna. *Smart grid é o futuro certo da distribuição de energia elétrica?* O Setor Elétrico. São Pau, edição 50, março/2010.

HERNANES JR, Luiz José. *Implementação de projetos piloto de redes inteligentes no Brasil*. O Setor Elétrico. São Pau, edição 67, agosto/2011.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. *Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos / José Henrique Penido Monteiro et al.; coordenação técnica Victor Zular Zveibil*. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.; 21,0 x 29,7cm.

KREITH, Frank; GOSWAMI, D. Yogi. *Energy Efficiency and Renewable Energy*. Editora CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

LATHEEF, A.; NEGNEVITSKY, M.; KASHEM, M.; PERERA, S. *Present Understanding of the Impact of Distributed Generation on Power Quality*. IEEE: Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08), 2008.

LOPES, Leonardo Zaidan. *Alimentador Radial de Distribuição para Simulações de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica* [Distrito Federal] 2011. xviii, 107p., 210 x 297 mm. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

MACIEL, M. R. V. *Geração Distribuída: Estudo da Penetração de Energia Fotovoltaica em Sistemas Radiais de Distribuição*. Monografia de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

MENEZES, Ricardo A. Amaral; GERLACH, José Luiz; MENEZES, Marco Antônio. *Estágio Atual da Incineração no Brasil*. ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública. In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Parque Barigui – Curitiba, 2000.

MICHAELIS. *Moderno Dicionário de Língua Portuguesa*. São Paulo, 1998

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011 / Secretaria de Produção e Agroenergia*. 2. ed. rev. - Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p.

MWAKABUTA, Ndaga S; SEKAR, Arun. *Comparative Study of the IEEE 34 Node Test Feeder under Practical Simplifications*. Power Symposium, 2007. 39th North American.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; WALTER, Arnaldo César da Silva. *Experiências de Geração de Energia Elétrica a Partir de Biomassa No Brasil: Aspectos Técnicos e Econômicos*. In: Reunión Regional sobre Geración de Eletricidad a partir de Biomassa, 1995. Montevideú. v.1.

OLIVEIRA, Luciano Bastos. *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e abatimento de emissões de gases do efeito estufa*. Rio de Janeiro, 2000. VII, 136p. 29,7 cm

OLIVEIRA, Luciano Bastos. *Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil*. Rio de Janeiro, 2004. X, 237p. 29,7 cm COPPE/UFRJ, D.Sc., Planejamento Energético, 2004.

OLIVEIRA, Luiz Gustavo Silva de. *Aproveitamento energético de resíduos agrícolas – O caso da agroeletricidade distribuída / Luiz Gustavo Silva de Oliveira* – Rio de Janeiro: UFRJ, COPPE, 2011. XIX, 282 p.: il.; 29,7 cm.

PAVAN, Margareth de Cássia Oliveira. *Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil / Margareth de Cássia Oliveira Pavan, orientadora Virgínia Parente*. São Paulo, 2010.

PECORA, Vanessa; FIGUEIREDO, Natalie J. V.; COELHO, Suani T.; VELAZQUEZ, Silvia M. S. G.. *Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário*. In: 7º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 2008, Fortaleza.

PINATTI, Daltro Garcia. Programa BEM – *Biomassa, Energia e Materiais* – Documento Básico DEMAR- Lorena, SP – 1996.

PRETO, Elio Veit; MORTOZA, Gladson Lima. *Geração de energia elétrica utilizando biomassa*. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

REICHERT, Geraldo Antônio. *Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão*. In: 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande - MS: ABES, 2005.

REIS, Mariana Neiva Galião. *Produção de energia limpa através do gás metano proveniente de resíduos sólidos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola politécnica de saúde Joaquim Venâncio. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

SABIÁ, Rodolfo José. *Estudo da geração de energia a partir dos resíduos sólidos*. In: 23º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande - MS.

SANTOS, Francisco José dos; LEE, Erich Shen Higa. *Caracterização do lodo proveniente de Estação de tratamento de esgoto e estudo sobre seu potencial energético*. In: II Congresso Brasileiro de gestão ambiental, 2011, Londrina, PR, 2011.

SEVERINO, Mauro Moura. *Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia*. Distrito Federal, 2008. xxiii, 335p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Doutor, Engenharia Elétrica, 2008).

SFB – Serviço Florestal Brasileiro. *Florestas do Brasil em resumo - 2010: dados de 2005-2010*. / Serviço Florestal Brasileiro – Brasília: SFB, 2010. 152 p., il.; 9 x 12,5 cm.

SHAYANI, Rafael Amaral. *Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes de Distribuição Radial*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD – 051/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010, 161p.

SÖDERMAN, Maria Ljunggren. *Recovering energy from waste in Sweden – a systems engineering study*. Resources, Conservation and Recycling, 2003. V.38, p.89–121.

THONG, Vu Van; DRIESEN, Johan; BELMANS, Ronnie. *Power quality and voltage stability of distribution system with distributed energy resources*. International Journal of Distributed Energy Resources, ISSN 1614-7138, Volume 1 Number 3. Editora: Technology & Science Publishers, Kassel, Alemanha, 2005.

TOLEDO, Fábio de Oliveira. *Desvendando as redes elétricas inteligentes / coordenação geral Fábio Toledo*. Rio de Janeiro: Brasport, 2012.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiommo (Org.). *Fontes renováveis de energia no Brasil*. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

TREVISAN, Aramis Schwanka. *Efeitos da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

VESPA, Izabel Cristina Galbiatti. *Características minerais e energéticas do lixo urbano em processos de compostagem e biodigestão anaeróbia*. Revista Energia na Agricultura, v.21, p.61-80, 2006.

VIEIRA, Tallita L.; SILVA, V. R.; COSTA, Mateus H. *Desenvolvimento de um modelo para o sistema teste de distribuição de 34 nós IEEE com carga pelo software Simulink em ambiente MatLab*. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito. Anais do Congresso Brasileiro de Automática, 2010.

VOIGT, N. et al. *Gestão Ambiental de Resíduos*, COPPE-UFRJ, 1999.

WIECHETECK, M. *Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos*. Sumário Executivo, Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às políticas públicas na área de Gestão e controle ambiental, Ministério Do Meio Ambiente, Curitiba, 2009.

ZIMMERMAN, Ray Daniel; MURILLO-SÁNCHEZ, Carlos Edmundo; THOMAS, Robert John; *MATPOWER Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Systems Research and Educations*. Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, No 1, 2010.

ANEXO

Quadro A.1 *Demanda residencial de médio consumo – Dia útil.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	19.6	15.2	14.0	13.4	13.0	16.2	21.9	25.3	25.4	25.3	28.2	29.6
Desvio padrão	12.0	7.3	6.8	6.3	6.1	13.8	22.3	21.9	22.6	14.4	18.5	18.3
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	30.9	28.1	26.0	27.5	30.8	34.3	45.2	52.1	55.2	47.9	40.9	29.4
Desvio padrão	19.6	15.7	12.5	16.5	22.4	21.9	31.9	29.1	31.9	25.8	25.2	24.4

Quadro A.2 *Demanda residencial de alto consumo – Dia útil.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	45.0	36.7	33.7	30.7	30.1	33.3	37.8	55.9	54.7	46.8	52.2	59.0
Desvio padrão	28.3	20.8	20.3	18.6	19.2	20.6	23.1	38.4	37.9	21.9	25.0	28.4
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	55.7	54.6	55.2	52.6	52.3	58.1	69.1	77.3	74.6	69.5	65.6	54.6
Desvio padrão	24.6	22.8	25.6	24.3	24.0	28.0	29.9	33.2	30.3	27.3	31.9	28.0

Quadro A.3 *Demanda comercial – Dia útil.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	23.6	23.6	22.9	23.1	23.6	23.6	22.9	23.1	51.3	56.3	62.9	67.2
Desvio padrão	8.5	8.9	8.1	8.5	9.2	7.5	9.4	5.0	9.4	11.0	12.5	13.4
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	65.9	68.7	72.4	71.8	69.7	55.7	37.0	30.5	27.8	26.5	26.1	24.0
Desvio padrão	13.0	16.1	17.1	17.5	14.4	12.3	8.7	13.3	8.8	8.2	9.1	8.0

Quadro A.4 *Demanda residencial de médio consumo – Sábado.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	22.6	17.3	14.4	14.5	13.9	15.2	19.2	20.8	26.5	30.9	31.6	30.1
Desvio padrão	26.0	15.1	11.3	11.5	10.5	16.2	25.9	26.6	36.9	40.2	40.4	34.4
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	31.0	29.9	26.5	28.0	32.1	37.6	41.8	47.9	47.8	49.4	39.2	27.1
Desvio padrão	41.0	32.0	24.3	28.1	41.3	51.8	46.5	52.4	49.7	63.4	41.0	22.9

Quadro A.5 *Demanda residencial de alto consumo – Sábado.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	47.7	35.9	32.1	32.2	33.3	32.3	35.5	42.5	59.9	58.1	55.7	53.0
Desvio padrão	37.5	27.4	20.7	21.4	28.2	22.8	31.4	37.4	61.6	49.0	49.1	43.7
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	50.9	56.7	51.1	47.3	53.6	51.0	66.9	82.8	80.8	76.5	65.7	53.4
Desvio padrão	47.8	42.6	34.9	42.7	68.2	37.2	49.5	76.0	49.9	56.3	50.5	39.6

Quadro A.6 *Demanda comercial – Sábado.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	28.3	26.0	27.3	26.6	26.2	27.8	28.4	52.9	73.1	71.5	82.8	76.0
Desvio padrão	8.8	6.7	7.7	7.1	6.0	8.2	7.0	10.8	26.4	30.7	38.6	31.3
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	57.5	46.8	44.7	40.1	42.9	38.3	39.6	37.7	33.5	32.6	26.0	27.2
Desvio padrão	12.0	11.6	5.9	13.0	18.0	13.7	13.9	12.3	10.0	9.3	5.9	6.5

Quadro A.7 *Demanda residencial de médio consumo – Domingo.*

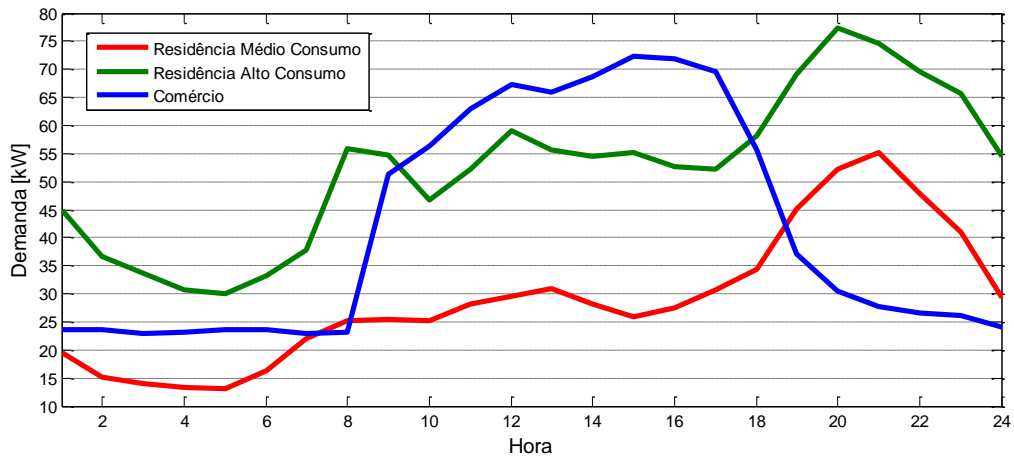
Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	26.1	18.6	15.8	15.2	14.4	13.7	17.0	18.4	22.9	28.2	30.9	30.9
Desvio padrão	35.4	19.3	15.2	13.5	10.9	12.5	18.0	20.7	32.0	48.2	36.7	39.8
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	28.6	26.2	24.2	29.6	35.2	42.2	47.0	44.2	48.0	46.8	40.8	30.5
Desvio padrão	36.2	30.3	19.5	39.6	45.0	55.4	55.7	52.8	55.4	52.1	42.8	44.4

Quadro A.8 *Demanda residencial de alto consumo – Domingo.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	48.7	41.9	41.3	35.3	33.0	33.3	34.6	36.3	41.2	47.0	54.6	59.5
Desvio padrão	35.0	27.0	46.0	20.0	20.1	25.1	29.2	27.8	32.9	49.6	71.0	57.7
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	54.5	51.7	50.2	49.4	53.1	63.2	75.9	80.4	77.7	76.2	60.2	56.0
Desvio padrão	45.4	39.7	34.5	42.8	48.1	63.8	67.6	60.9	49.8	45.8	35.2	45.7

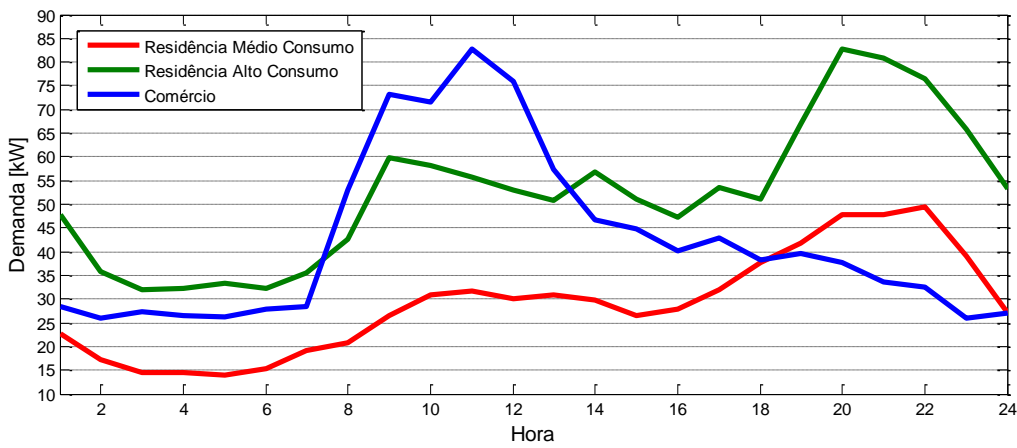
Quadro A.9 *Demanda comercial – Domingo.*

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Demanda (kW)	37.8	36.3	39.1	35.4	36.8	37.1	36.7	41.0	43.6	46.2	49.4	46.0
Desvio padrão	4.7	4.2	5.8	3.5	4.7	4.9	2.2	5.5	8.3	4.8	7.9	5.6
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Demanda (kW)	46.5	40.3	38.4	39.8	39.1	37.2	47.4	49.0	49.7	48.8	47.3	45.0
Desvio padrão	14.1	3.3	4.1	5.7	5.4	4.9	6.0	9.5	7.1	7.4	7.7	5.4



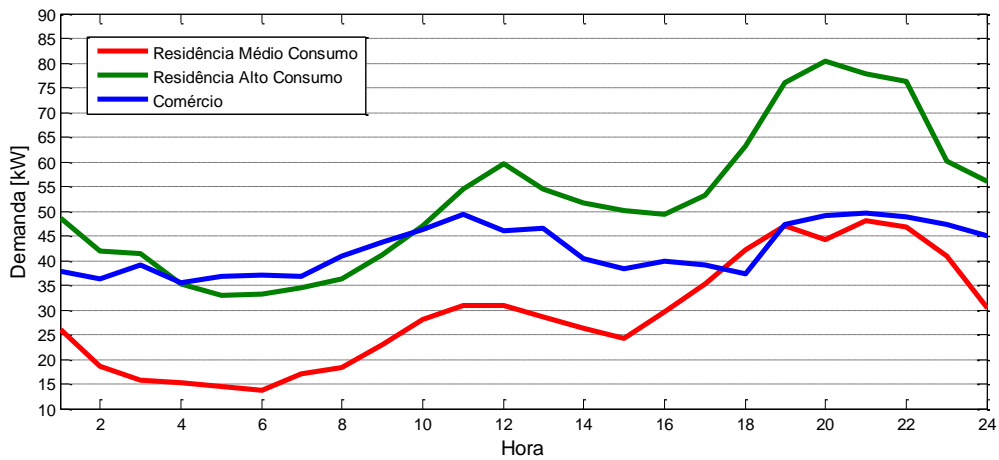
Fonte: CEB – Companhia Energética de Brasília.

Figura A.1 *Curvas de carga – Dia útil.*



Fonte: CEB – Companhia Energética de Brasília.

Figura A.2 *Curvas de carga – Sábado.*



Fonte: CEB – Companhia Energética de Brasília.

Figura A.3 *Curvas de carga – Domingo.*