

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA PARA DESPACHO DE FONTES DE
GD A BIOGÁS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Luiz Fernando Guarenti Martins

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**METODOLOGIA PARA DESPACHO DE FONTES DE GD A
BIOGÁS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
LÓGICA FUZZY**

Luiz Fernando Guarenti Martins

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

Orientadora: Prof^a Dr^a Luciane Neves Canha

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Martins, Luiz Fernando Guarenti

Metodologia para despacho de fontes de gd a biogás em redes de distribuição utilizando lógica fuzzy / Luiz Fernando Guarenti Martins.-2012.

159 p.; 30cm

Orientadora: Luciane Neves Canha

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012

1. Resíduos sólidos urbanos 2. Biogás 3. Geração distribuída 4. Lógica Fuzzy 5. Método Multicriterial I. Canha, Luciane Neves II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**METODOLOGIA PARA DESPACHO DE FONTES DE GD A BIOGÁS
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

elaborada por
Luiz Fernando Guarenti Martins

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciane Neves Canha, Prof^a. Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Jocemar Biasi Parizzi, Prof. Dr (UNIPAMPA)

Daniel Pinheiro Bernardon, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, 19 de março de 2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao "Criador", dono de todos os conhecimentos do mundo e seus espíritos de luz que iluminam nossos caminhos em meio a tantas provações.

Em segundo plano, não menos importante, mas sim, palpável, as seguintes pessoas que foram de fundamental importância para a realização deste trabalho:

Minha querida e amada esposa Anna Elisa Martins pelo carinho e atenção; Meus filhos Carla Vanessa e Felipe Martins pela compreensão e paciência;

Às Professoras e amigas: Alzenira da Rosa Abaide e Luciane Neves Canha, que a mim depositaram confiança e acreditaram no meu trabalho.

Finalmente ao já falecido Prof. e amigo Fábio Antônio Baldissera a quem devo muito de minha conduta e de minhas realizações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, mais precisamente ao Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa Prof. Hélio Leães Hey, ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Prof. José Renes Pinheiro, ao Diretor do Centro de Tecnologia Professor Eduardo Rizzatti pelo apoio e confiança, ao meu colega e irmão de muitos anos Anacleto Luiz Brondani (vulgo Gatão) e aos demais colegas do laboratório: Zulmar Belmonte do Nascimento, Anderson Splitzer, José Heron Rozales Inhaquites, Paulo Roberto da Silva, Fernando Coelho de Faria Corrêa e Diego Brenner dos Reis que me deram amparo e estiveram na retaguarda de forma que eu pudesse desenvolver com tranquilidade o trabalho. Aos colegas do PPGE Eleonice Saenger de Oliveira, Carlo Castelanelli e Luciana Kapelinski pela compreensão e auxílios prestados. Gostaria também de agradecer aos Professores Félix Farret e Ghendy Cardoso, aos doutorandos Jordan Trapp e Luciano Porto, todos integrantes do grupo CEEA.

Não poderia deixar de agradecer de coração o colega de mestrado que teve participação importantíssima no trabalho e integrante do projeto de P&D Wagner Brignol e ao gerente do projeto de P&D Ricardo Barreira Orling, ambos engenheiros do Grupo CEEE.

Ao colega de P&D Alexandre Barin, companheiro que nunca mediu esforços para me auxiliar em momentos complicados, sempre disposto a auxiliar.

Agradeço os Professores Ricardo Nederson do Prado, Thiago Bandeira Marquezan, Robinson Camargo, Fábio Bisogno, Marco Dala Costa, Leandro Michels, Luciano Schuch, Alexandre Campos, Claiton Franchi, Hilton Abílio Gründling e Humberto Pinheiro que sempre me apoiaram e me deram força.

Meu agradecimento especial a quem estimulou e deu a confiança para que eu realizasse este trabalho: Professoras Alzenira da Rosa Abaide e minha orientadora Profa. Luciane Neves Canha.

Gratidão aos Professores que atenderam ao convite para participarem da banca examinadora: Daniel Pinheiro Bernardon e Jocemar Biazzi Parizzi.

Agradeço aos amigos e familiares por todo apoio e carinho

Finalmente, agradeço a minha querida esposa Anna Elisa Martins, a quem amo, por todo apoio, paciência, compreensão, carinho e atenção nestes anos em que estive desenvolvendo este trabalho, com certeza esta companheira maravilhosa foi importantíssima nesta conquista.

Agradeço a todos os colegas e amigos que me consideram, não citados aqui nominalmente.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

METODOLOGIA PARA DESPACHO DE FONTES DE GD A BIOGÁS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

AUTOR: LUIZ FERNANDO GUARENTI MARTINS

ORIENTADORA: LUCIANE NEVES CANHA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 19 de março de 2012.

Este trabalho tem a finalidade de definir o período do dia para o despacho de uma fonte alternativa de geração distribuída de energia elétrica (GD), utilizando como combustível o biogás proveniente de reações anaeróbias que ocorrem em resíduos sólidos urbanos (RSU) depositados em células do Aterro Sanitário de Recreio no município de Minas do Leão à rede da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D). Inicialmente foi utilizado o *software* Biogás® para estimar a vazão de metano (gás em maior porcentagem no biogás) e avaliar a potência que este gás disponibiliza para ser gerada em qualquer aterro em função do tempo de vida útil do mesmo. Este *software* foi escolhido para ser utilizado neste trabalho por ser uma ferramenta livre e desenvolvida no Brasil pelo convênio entre a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) com o Governo Federal, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia. Esta recuperação energética do metano tem potencialidade de servir como combustível para alimentar um ou mais conjuntos de motores geradores Ciclo Otto adaptados para biogás. Após a estimativa da vazão de biogás e da potência que pode ser gerada no aterro, partiu-se para a execução de simulações com as grandezas elétricas do alimentador. Neste trabalho as simulações das grandezas elétricas foram obtidas com o uso do *software* PSL®DMS, ferramenta utilizado pelos técnicos da CEEE-D para análise da do fluxo de carga de sistemas de distribuição, e serão utilizadas como critérios denominados de quantitativos. Para determinar o momento ideal para a conexão da GD à rede de distribuição da concessionária, foi utilizado um método de apoio à decisão. Este método considera critérios quantitativos e qualitativos definidos pelos Especialistas ou Agentes de Decisão (AD), no caso, técnicos da concessionária de energia elétrica que avaliam em conjunto estes dados. Os critérios qualitativos são baseados na possibilidade de incrementos de serviços subsidiários ao sistema de distribuição de energia elétrica, denominados de Serviços Ancilares (SA). A definição da prioridade dos valores dos critérios quantitativos (grandezas elétricas da rede de distribuição) é baseada na análise de funções trapezoidais que relacionam as grandezas elétricas a valores e percentuais definidos pelo PRODIST e pelos AD. Já para os critérios qualitativos, a análise ocorre em função de uma metodologia denominada de Estimativa de Especialistas, em que os mesmos aplicam notas ao tipo de SA que será aplicado e ao momento de sua aplicação em relação às características da curva de demanda do AL. A definição do *ranking* dos melhores horários do dia para despacho da GD ao AL é consequência da avaliação dos valores estabelecidos para as prioridades finais dos critérios quantitativos e qualitativos.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Biogás. Geração distribuída. Lógica Fuzzy. Método Multicriterial.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Electric Engineering
Federal University of Santa Maria

EFFECTIVE CONNECTION OF DISTRIBUTED GENERATION SOURCES ON DISTRIBUTION NETWORKS USING FUZZY SETS AND RULES.

AUTHOR: LUIZ FERNANDO GUARENTI MARTINS

ADVISER: LUCIANE NEVES CANHA

Data and Place of Defense: Santa Maria, March 19, 2012.

The aim of this work is determine the most appropriated period for connection of a particular generation source fueled by biogas on a distribution network. The biogas is produced through anaerobic reactions that occur in the municipal solid waste deposited at the landfill – specific landfill in analysis. The Minas do Leão landfill is taken as study case, predicting the connection of this generation source on a distribution network supported by the State Company of Electrical Energy (CEEE). The Biogas® software was used to estimate the amount of methane generated in the landfill and to determine the landfill life cycle. By using that information it is possible to plot the power electrical generation curve in MW. The choice for the Biogas® software is justified because this tool is free software developed between the federal government – environment state administration – and the CETESB (Technology Company of Environmental Sanitation of the State of Sao Paulo). After that, the PSL®DMS software was used to simulate the main electrical characteristics of the network in analysis. These simulations provided the data for evaluating the quantitative parameters – voltage levels, power losses and load current. A group of decision makers were selected for establishing scores applied to the qualitative parameter evaluation - availability of ancillary services support. After the definition of the quantitative and qualitative parameters a multi-objective methodology was developed. In the first step of the methodology are applied pertinent fuzzy functions – trapezoidal variables that consider electrical characteristics of the network and also the voltage levels defined in the PRODIST (Proceedings of Electric Energy Distribution on Electrical National System). The second part is associated with the decision makers' estimative, in which the decision maker presents some scores for each type of ancillary service in analysis, according to the specific moment when this ancillary service will be supported. For these evaluations are considered the demand curve of the feeder where the distributed source will be connected. The methodology was then applied for selecting and ranking the most appropriated period to connect the distributed generation source on the distribution network. The definition of the ranking is the outcome of the data evaluation according to the final priorities – quantitative and qualitative analysis.

Keywords: Biogas. Distributed generation. Fuzzy logic. Municipal solid waste landfill. Multi-objective methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das energias renováveis e não renováveis no país desde 1970. Fonte: ICLEI, 2009.	29
Figura 2 – Matriz energética brasileira. Fonte: ICLEI, 2009.	29
Figura 3– Matriz energética mundial. Fonte: ICLEI, 2009.	30
Figura 4 – Ilustração de um lixão. Fonte: lixo.com.br, 2010.	50
Figura 5 – Ilustração de um aterro sanitário. Fonte: lixo.com.br, 2010.	50
Figura 6 – Representação de um aterro controlado. Fonte: lixo.com.br, 2010.	51
Figura 7 – Reciclagem em esteira. Fonte: Oliveira, 2004.	52
Figura 8– Compostagem numa célula do aterro de Sorocaba. Fonte: UNESP, 2007.	53
Figura 9 – Estrutura de captação de biogás em um aterro. Fonte: ICLEI, 2009.	61
Figura 10 – Os quatro tempos do motor Otto. Fonte: Figueiredo, 2007.	64
Figura 11 – Foto ilustrativa do grupo motor gerador de 150 kW. Fonte: www.arapongas.org/servicos/motor.htm.	65
Figura 12 – Diagrama de funcionamento da microturbina Capstone. Fonte: De Bona, 2004.	69
Figura 13 – Representação em corte de uma microturbina Capstone. Fonte: De Bona, 2004.	70
Figura 14 – Microturbinas Capstone. Fonte: Figueiredo, 2007.	72
Figura 15 – Motor Stirling em corte. Fonte: Lora, 2005.	73
Figura 16 – Foto de um grupo motor gerador com a utilização do motor Stirling. Fonte: Lora, 2005.	74
Figura 17 – Célula de combustível. Fonte: LORA, 2005.	75
Figura 18 – Função Trapezoidal para analisar os níveis de prioridade dos critérios quantitativos.	80
Figura 19 – Fluxograma representando a metodologia proposta para determinar o <i>ranking</i> horário para o despacho da GD à rede de distribuição.	82
Figura 20 – Curva de geração de CH ₄ (superior) e curva de coleta de CH ₄ (inferior). Fonte: BIOGÁS®.	87
Figura 21 – Curva da estimativa de potência que pode ser gerada no AS. Fonte: BIOGÁS®.	88
Figura 22 – Ilustração com várias opções de potências para gerar em relação à vida útil do aterro.	91
Figura 23 – Ilustração do AL03 e suas ramificações com a conexão do aterro onde se encontra a GD AS, georreferenciado pelo <i>software</i> Google Earth®. Fonte: PSL®DMS, versão Demo 1.0.1.1 da Powersyslab Engenharia e Sistemas Ltda.	93
Figura 24 – Curva da demanda ativa média diária típica do mês de janeiro de 2011, gerada no <i>software</i> MicroSoft EXCEL. Fonte: Memória de massa do AL03.	94
Figura 25 - Curva horária média de corrente por fase num dia típico de janeiro de 2011, gerada no MicroSoft EXCEL®. Fonte: Memória de massa do AL03.	94
Figura 26 – Gráficos de três funções trapezoidais utilizadas na lógica <i>fuzzy</i> para a definição das regras que resultarão nos valores das prioridades dos critérios.	97
Figura 27 – AL03, proveniente da SE AR.	125
Figura 28 – Curva da demanda ativa média diária do AL03 (dia típico janeiro 2011).	126
Figura 29 – Curva da demanda reativa média diária do AL03 (dia típico janeiro 2011).	126
Figura 30 – Curva horária média de demanda ativa, por fase, do AL03 (dia típico - janeiro 2011).	127
Figura 31 – Curva horária média da demanda reativa, por fase, do AL03 (dia típico - janeiro 2011).	127

Figura 32 – Curva horária média de corrente do AL03 (dia típico - janeiro 2011).....	127
Figura 33 – Curva horária média de corrente por fase do AL03 (dia típico - janeiro 2011) .	128
Figura 34 – Curva horária média de carregamento do cabo do AL03 (dia típico janeiro 2011).	128
Figura 35 – Curva horária média das perdas ativas, por fase, do AL03 (dia típico janeiro 2011)	129
Figura 36 – Curva horária média das perdas reativas, por fase, do AL03 (dia típico janeiro 2011).	129
Figura 37 – Ilustração dos 4 pontos críticos do AL03.	130
Figura 38 – NT dos 4 pontos considerados como mais críticos do AL03. Ilustração dos níveis de tensão nos 4 pontos mais críticos do AL03.	130
Figura 39 – Curva horária média de demanda ativa, por fase, do AL03.	131
Figura 40 – Curva horária média de demanda reativa, por fase, do AL03.	131
Figura 41 – Curva horária média de corrente, por fase, do AL03	132
Figura 42 – Carregamento percentual do cabo do AL03.	132
Figura 43 – Curva horária média de perdas ativas por fase do AL03.....	133
Figura 44 – Curva horária média de perdas reativas, por fase, do AL03.....	133
Figura 45 – NT nos 4 pontos considerados mais críticos do AL03, com a GD AS inserida como APE.	134
Figura 46 – Curva da corrente na troncal do AL03 sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS	137
Figura 47 – Curva da corrente na troncal do AL03 com a GD AS despachando energia. Fonte: PSL®DMS.....	137
Figura 48 – Perdas acumuladas no AL03 sem o despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS...	137
Figura 49 – Perdas acumuladas no AL03 com a GD AS despachando. Fonte: PSL®DMS.	138
Figura 50 – Níveis de tensão no ponto crítico 1. Fonte: PSL®DMS.....	138
Figura 51 – Níveis de tensão no ponto crítico 2. Fonte: PSL®DMS.....	138
Figura 52 – Níveis de tensão no ponto crítico 3. Fonte: PSL®DMS.....	139
Figura 53 – Níveis de tensão no ponto crítico 4. Fonte: PSL®DMS.....	139
Figura 54 – Curva da potência ativa na barra da SE AR sem despacho da GD AS.	139
Figura 55 – Curva da potência ativa na barra da SE AR com despacho da GD AS.....	140
Figura 56 – Curva de corrente na troncal do AL03 sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	142
Figura 57 – Curva de corrente na troncal do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	142
Figura 58 – Perdas acumuladas no AL03 sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.....	142
Figura 59 – Perdas acumuladas no AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	143
Figura 60 – Níveis de tensão no ponto crítico 1 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	143
Figura 61 – Níveis de tensão no ponto crítico 2 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	143
Figura 62 – Níveis de tensão no ponto crítico 3 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	144
Figura 63 – Níveis de tensão no ponto crítico 4 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	144
Figura 64 – Curva de potência ativa do AL03 (barra da SE AR) sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	144
Figura 65 – Curva de potência ativa do AL03 (barra da SE AR) com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.	145

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1– Custos da geração de energia elétrica de diversas fontes alternativas.	32
Tabela 2– Níveis de tensão e suas faixas de variação.	41
Tabela 3– Valores de distorção harmônica.....	43
Tabela 4- Valores de desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão.....	43
Tabela 5 – Comparação de algumas tecnologias de conversão do biogás em energia elétrica.	76
Tabela 6– Valores das variáveis em função do índice de pluviometria	85
Tabela 7– Dados apresentados pelo <i>software</i> para o AS em análise, dentre eles a estimativa da vazão de metano.....	86
Tabela 8- Estimativa da potência em função da vazão de metano no aterro.....	87
Tabela 9 – Estimativa da potência elétrica convertida pelo grupo motor gerador em função do tempo (ano).....	89
Tabela 10– Tempo de vida útil do aterro em função da potência gerada.....	90
Tabela 11 – Valores referentes aos créditos de carbono de 2014 até 2037 - período de 23 anos.....	91
Tabela 12– Valores característicos do AL03 sem a contribuição da GD AS.....	96
Tabela 13– Níveis de prioridade dos critérios quantitativos provenientes da aplicação da lógica <i>fuzzy</i>	99
Tabela 14– Notas dadas pelos AD aos critérios qualitativos em função de suas prioridades.....	100
Tabela 15– Valores das comparações aos pares dos pesos estipulados pelos AD e os valores dos coeficientes k_1 e k_2	100
Tabela 16– Método da diagonal da matriz principal e cálculo de k_p	101
Tabela 17- Pesos referenciados pelos AD para os SA's em função da curva de carregamento do AL03.....	102
Tabela 18– Valores das médias das notas dadas pelos AD multiplicadas pelo valor do coeficiente de prioridade k_p de cada critério que somadas e aplicadas ao critério dos mínimos múltiplos determinam as prioridades horárias finais dos critérios qualitativos.....	103
Tabela 19– Análise para o <i>rankiamento</i> dos melhores horários para o despacho da GD AS na rede de distribuição da concessionária utilizando os métodos dos \langle 's, Σ e Π :	104
Tabela 20– <i>Ranking</i> final para o despacho da GD AS ao AL03.	105
Tabela 21– Potência ativa na barra da SE AR – comparação com despacho e sem despacho da GD AS ao AL03.	107
Tabela 22 – Dados da curva de carga do AS, da potência gerada pela GD AS e o valor da potência despachada para o AL03.....	136
Tabela 23 – Demonstrativo das curvas de geração e despacho da GD AS ao AL03.	141
Tabela 24 – Valores sugeridos pela USEPA	148
Tabela 25 – Estimação da densidade do lixo.....	149
Tabela 26 – Eficiência do sistema	149
Tabela 27– Valores propostos de k em função das precipitações anuais	151
Tabela 28– valores mínimos e máximos para L_0	152
Tabela 29– Valores de COD para tipos diferentes de materiais.....	154
Tabela 30– Notas dos critérios atribuídas pelos AD.	155

Tabela 31– Ordenação dos critérios por ordem de importância.	156
Tabela 32 – Importância dos critérios com valores dos coeficientes k_1 e k_2	157
Tabela 33– Prioridade dos critérios	157
Tabela 34– Notas aplicadas pelos AD aos critérios qualitativos em função dos patamares de tempo selecionados.	158
Tabela 35– Estimativa horária das prioridades dos critérios.	159
Tabela 36 – Valores das prioridades dos critérios quantitativos e qualitativos horários e dos índices finais que levam ao <i>rankiamento</i> X^o	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

< - Operador mínimo;
 ΔV – Nível de tensão;
 ΔW – Perda de potência;
 Σ - Operador somatório;
 $\mu(x)$ – Prioridade do critério x ;
A – Unidade de corrente elétrica (Ampère);
AD – Agente de decisão;
AL – Alimentador;
AL03 – Alimentador nº 3;
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
APE - Autoprodutor de energia elétrica;
APINE – Associação dos Produtores Independentes de energia elétrica;
AS – Aterro sanitário;
CA/CC – Retificador de corrente alternada para corrente contínua;
CEEE-D - Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica;
CH₄ – Gás metano;
CHE - Usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja igual ou inferior a 1MW;
CO₂ - Gás carbônico;
COP - Conferência das partes;
C_{icc} - Carregamento térmico dos cabos condutores;
EPE – Empresa de Pesquisa Energética;
FT - Fatores de transferência;
GD – Geração distribuída;
GDL - Gás de lixo;
GEE - Gás de efeito estufa;
GLP – Gás liquefeito de petróleo;
h – Unidade de medida de tempo (hora);
H₂ – Hidrogênio;
Hz – Unidade de Frequência (Hertz);
I – Corrente elétrica;
ICLEI – Associação internacional de governos locais e organizações nacionais e regionais que fizeram um compromisso com o desenvolvimento sustentável;
INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética;
k - Constante de decaimento;
 k_1, k_2 - Coeficientes das estimativas médias dos critérios;
Kcal – Unidade de medida de energia (quilo Caloria);
Kg – Unidade de medida de peso (quilograma);
km² - Unidade de medida de distância (quilômetro);
 k_p - Coeficiente de prioridade de cada critério;
kW – Unidade de potência elétrica (quilo Watt);
kWh – Unidade de medida de potência elétrica (quilo Watt hora);
L – Unidade de volume (Litro);
L₀ - Potencial de geração de metano;
m³ – Unidade de volume (metro cúbico);
m³hCH₄/ano – Vazão de metano (horas por ano);
MCI - Motor de combustão interna;

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;
MJ – Unidade de trabalho (mega Joule);
MME – Ministério de Minas e Energia;
MW – Unidade de potência (mega watt);
O₂ – Oxigênio;
°C – Unidade de temperatura (graus Celsius);
ONS - Operador Nacional do Sistema;
PCH - Usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1MW e inferior a 30MW;
PCI – Poder calorífico interno;
P_{fcq} - Prioridade final dos critérios quantitativos;
pH - Potencial hidrogeniônico;
PIA - Produtor Independente Autônomo;
PIE - Produtor Independente de Energia Elétrica;
Pop_x - População atendida pelo aterro no ano x;
p.u – Sistema "por unidade", consiste na definição de valores de base para grandezas elétricas;
PRODIST – Procedimentos de distribuição de energia elétrica;
PROINFA - Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica;
P_{ST} - Severidade de tempo curto;
QEE - Qualidade de energia elétrica;
Q_x - Vazão de metano no ano x;
RCE - Reduções certificadas de emissões;
RPM – Unidade de velocidade angular (rotação por minuto);
Rsd - Resíduo sólido domiciliar;
RSU - Resíduos sólidos urbanos;
R_x - Fluxo de resíduos no ano x;
SA – Serviço ancilar;
SE – Subestação de energia elétrica;
SE AR – Subestação de energia elétrica - localidade de Areal;
SIN - Sistema interligado nacional;
T - Ano de deposição do resíduo no aterro;
T_{coleta} - Taxa de coleta de resíduo;
TN - Tensão nominal;
Ton. – unidade de peso (Tonelada);
T_{RSD} - Taxa de geração de resíduos;
TW – Unidade de potência (tera Watt);
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro;
V – Unidade de tensão elétrica – (Volt);
V_N – Tensão nominal
x - ano atual (ano);
x – Critério escolhido;
X^o – Ranking final;
Y(x) – Índice final;
η – Rendimento elétrico;
II – Operador produtivo;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Considerações iniciais	21
1.2 Justificativa	22
1.3 Objetivos	24
1.3.1 Objetivo Geral	24
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 Organização do trabalho	25
2 FONTES DE ENERGIA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	27
2.1 Fontes não renováveis de energia	27
2.2 Fontes renováveis de energia	28
2.3 Fontes alternativas de energia	30
2.3.1 Incentivos nacionais	32
2.3.2 Incentivos internacionais	33
2.3.2.1 O MDL e os RCE's	33
2.3.2.1.1 Créditos de carbono e a queima eficiente do biogás	35
2.3.2.1.2. Créditos de carbono e a geração de energia elétrica.....	35
Riscos associados a projetos do MDL em resíduos sólidos	36
2.4 Geração Distribuída	37
2.4.1 GD no Brasil	38
2.4.2 Modos de operação da GD	39
2.4.3 Impactos da conexão da GD na rede elétrica	39
2.4.4 Fluxo de potência e perdas associadas	40
2.5 Serviços Ancilares	44
2.5.1 Alguns dos SA's que a GD pode fornecer:	44
3 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU	47
3.1 Lixo	47
3.2 Resíduos Sólidos Urbanos	47
3.3 Disposição dos RSU	49
3.3.1 Formas de disposição.....	49
3.4 Aproveitamento dos RSU	51
3.5 Biomassa	54
3.6 Biogás	55
3.6.1 Composição do biogás de aterro.....	55
3.6.2 Fatores que influenciam na produção do biogás	57
4 USO DO BIOGÁS DE RSU COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA ELÉTRICA	59
4.1 Sistemas para extração e tratamento do biogás de aterro	60
4.2 Tecnologias para geração de energia elétrica em aterros	62
4.2.1 Motor de combustão interna (MCI).....	62
4.2.1.1 Motor Ciclo Otto	63
4.2.1.2 Turbinas a gás	66
4.2.1.3 Turbina a vapor (Ciclo Rankine).....	67
4.2.1.4 Microturbinas a gás	68
4.2.2 Motor Stirling	72

4.2.3 Células a combustível	74
5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA E O MOMENTO PARA DESPACHO DA GD.	77
5.1 Metodologia usada para a estimativa da vazão de metano, responsável pela potência que pode ser gerada no aterro sanitário.....	77
5.2 Estimativa da potência que pode ser gerada no aterro sanitário	79
5.3 Determinação do período de despacho da GD ao sistema de distribuição	79
5.3.1 Análise quantitativa e regras <i>fuzzy</i>	79
5.3.2 Análise qualitativa e estimativa de especialistas.....	81
6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	83
6.1 Introdução.....	83
6.2 Determinação da vazão de metano e da potência que pode ser gerada no aterro sanitário.....	83
6.2.1 Estimativa da potência que pode ser gerada no aterro e o MDL	87
6.3 Método de apoio à decisão, para definir o despacho da GD à rede de distribuição.	92
6.3.1 Critérios quantitativos	93
6.3.2 Critérios qualitativos	99
6.4 Análise dos resultados.....	104
6.5. Análise dos parâmetros elétricos do AL03 após despacho da GD AS	106
CONCLUSÃO	111
Principais contribuições	113
Previsão para trabalhos futuros	114
Publicações.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A - Diagnóstico do AL03.....	125
APÊNDICE B - Diagnóstico do despacho contínuo da GD AS ao AL03.....	136
APÊNDICE C - Diagnóstico do despacho da GD AS ao AL03 pelo <i>ranking</i> da metodologia	141
ANEXO A - Modelos numéricos para o cálculo da geração de biogás e da potência que pode ser gerada.....	147
ANEXO B - Metodologia para determinação do período de despacho da GD ao sistema de distribuição – Estimativa de Especialistas.....	155

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Avaliando o progressivo aumento na participação de fontes alternativas e renováveis de energia na matriz energética mundial e o atual contexto do setor elétrico brasileiro com necessidade crescente de expansão na oferta de energia elétrica, percebe-se que a inserção de fontes renováveis de geração distribuída (GD) nos setores de transmissão e distribuição é cada vez mais efetiva, visando maior qualidade, confiabilidade e principalmente a sustentabilidade na geração de energia elétrica (BARIN et al, 2010).

Com isso, gerações descentralizadas que faz uso de fontes primárias renováveis - aproveitamento do biogás de aterros sanitários para geração de energia, por exemplo - surgem como alternativas essenciais para diversificação da matriz energética, podendo propiciar melhorias ao sistema de distribuição de energia a partir da definição do regime operacional eficiente da conexão destas fontes.

No Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica ocorre de forma centralizada (HADDAD, 2010). Em muitos casos, para transmitir a energia elétrica até os pontos de consumo é necessária a construção de longas linhas que, em sua maioria, estão sujeitos a toda a sorte de problemas operacionais. Estas extensas linhas implicam, muitas vezes, em reclamações dos consumidores às distribuidoras de energia, visto que em muitos trechos verificam-se sérias alterações na qualidade e confiabilidade da energia fornecida.

É importante observar que a inserção da GD em horários inapropriados, sem a devida avaliação de critérios específicos, pode resultar em um aumento no carregamento da rede e em indesejáveis níveis de tensão, fora dos limites aceitáveis estabelecidos pela ANEEL (PRODIST, 2010). Como consequência, pode-se ter um aumento dos custos de operação, manutenção e planejamento, e até implicar em severas multas às companhias distribuidoras de energia elétrica.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento para a adequada inserção de fontes de GD nos sistemas de distribuição, utilizando a lógica *fuzzy*. Para tanto será identificado o melhor regime operacional de uma fonte de GD, localizada em um aterro sanitário, para geração de energia elétrica, a partir do biogás proveniente do

tratamento de resíduos sólidos urbanos. Para atingir este objetivo, a metodologia de apoio à decisão desenvolvida toma como base conjuntos e regras *fuzzy*, propondo a avaliação dos critérios: níveis de tensão, perdas de potência, capacidade de carregamento de cabos condutores e serviços auxiliares.

A avaliação prática deste trabalho é realizada tomando como exemplo a inserção de uma fonte de GD, proveniente do biogás resultante do tratamento de resíduos sólidos urbanos em um aterro sanitário, com potência estimada de 6MW. A máquina primária é composta de um motor alternativo de combustão interna, Ciclo Otto, adaptado para biogás, acoplado mecanicamente a um gerador síncrono. Este gerador fornece energia para ser despachada à rede de distribuição da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D).

1.2 Justificativa

A energia elétrica é um dos principais pilares da sociedade moderna, sendo indispensável tanto para a produção de bens quanto para o oferecimento de serviços. O crescimento populacional associado à expansão das atividades industriais traz como consequências o crescente aumento da demanda de energia elétrica e conseqüentemente do descarte de resíduos sólidos urbanos (RSU).

No Brasil, o crescimento tecnológico e populacional contínuo exige um aumento cada vez maior da oferta de energia elétrica. Desta forma, quando o aumento da demanda ultrapassa os limites do sistema, é necessário o desenvolvimento de projetos para construção e ampliação dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica.

No Brasil 83,7% da oferta total de energia elétrica é proveniente da geração em grandes centrais hidrelétricas (EPE, 2009), situadas na maioria das vezes muito distantes dos grandes centros consumidores. Este dado, associado ao avanço de novas tecnologias de produção de energia e à preocupação com os impactos ambientais, conduz a diversificações das formas de geração de energia elétrica através, por exemplo, da ampliação da geração descentralizada, chamada de geração distribuída de energia elétrica.

A GD tem como características: geração próxima dos centros consumidores, maior flexibilidade de operação, facilidade no licenciamento ambiental e menores prazos de instalação e construção.

Um tipo de GD que tem grandes possibilidades de expansão nos sistemas de distribuição é a geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de aterros sanitários.

No Brasil são produzidas diariamente 230.000 toneladas de RSU (LANDIM, 2006), destas 29,6% destinados a lixões sem nenhuma medida de proteção ao meio ambiente, os outros 38,6% são enviados para aterros sanitários que atendem às normas específicas as quais permitem a confinção segura em termos de controle da poluição ambiental e os restantes 31,8% são destinados a aterros controlados (processo preferível ao lixão, mas inferior ao aterro sanitário) os quais não atendem integralmente às normas (OLIVEIRA, 2009).

Dos municípios brasileiros, 63,6% utilizam lixões como forma de disposição dos resíduos sólidos urbanos, 18,4% utiliza aterros controlados e 13,8% dispõem os resíduos em aterros sanitários (JUNIOR, 2007) e apenas 33% possuem 100% de serviços de limpeza e/ou coleta de lixo (FIGUEIREDO, 2007 e MARQUES, 2006). Desta forma, a disposição final do lixo é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos e a emissão descontrolada do biogás produzido na decomposição anaeróbia dos resíduos acarreta problemas ambientais, como poluição do ar e solo e danos à saúde da população.

Sabe-se que um aterro sanitário representa um gigantesco biodigestor descontínuo, onde os resíduos são colocados em células herméticas com sistemas de coleta de efluentes líquidos (chorume) e gasosos (biogás), também denominado de gás de lixo (GDL).

A composição do GDL varia de acordo com o tipo de biomassa, e na maioria dos aterros são utilizados sistemas com drenos horizontais ligados a dutos verticais que geralmente terminam em queimadores denominados *flares*, onde ocorre a combustão do GDL. Este processo apresenta baixa eficiência, pois se estima que apenas 20% do biogás drenado sejam efetivamente destruídos pela queima, sendo o restante simplesmente emitido para a atmosfera (OLIVEIRA, 2009).

A liberação de gás carbônico (CO_2) para a atmosfera é 21 vezes menos agressivo que a liberação do metano (CH_4), o que acarreta uma menor contribuição para o aumento do efeito estufa na atmosfera (LANDIM e AZEVEDO, 2006).

A crescente preocupação com os problemas econômicos e ambientais provenientes da geração de energia elétrica através de termelétricas de energia, dependentes de combustíveis fósseis e suas emissões ao meio ambiente; os alargamentos de extensas áreas e linhas de transmissão cada vez mais longas e sujeitas a toda a sorte de intempéries, levam à realização de estudos sobre a utilização de estratégias utilizando projetos sustentáveis que envolvam fontes renováveis e alternativas de energia elétrica de forma descentralizada.

Desenvolver o estudo e a análise do regime ótimo de operação da GD a biogás, proveniente do tratamento de RSU, depositados em aterros sanitários, e sua conexão à rede de distribuição de energia elétrica, utilizando como máquina primária um grupo motor gerador Ciclo Otto (adaptado para biogás) cuja potência de utilização será definida em função da vazão e qualidade do biogás produzido no aterro, é de fundamental importância e justificam a execução desta dissertação, pois, além da redução dos problemas ambientais, causados pelas emissões de biogás e infiltrações de percolados no lençol freático em aterros, a recuperação energética do metano como GD é muito positiva, pois, melhora a confiabilidade e a qualidade da energia elétrica na rede de distribuição. Apesar dos benefícios citados anteriormente, se não houver, por parte dos especialistas, uma análise prévia e criteriosa dos parâmetros da rede de distribuição, poderá ocorrer transgressões das características operacionais, como: níveis de tensão, perdas de potência e energia e carregamento do alimentador, causando problemas sérios em relação à proteção do sistema de distribuição.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Definir o período do dia mais apropriado para o despacho da GD a biogás de RSU à rede de distribuição da concessionária de energia elétrica. A importância deste fato se deve ao fato de que a presença da GD nos sistemas de distribuição de energia, pode influenciar de forma significativa na qualidade do suprimento da energia elétrica. Este impacto pode ser tanto positivo quanto negativo, pois existe uma série de fatores envolvidos que são afetados pelo regime operacional das fontes de GD. O despacho programado poderá possibilitar um incremento na qualidade da energia fornecida quando a GD entrar em operação em períodos estratégicos do dia, atendendo de forma adequada aos consumidores ao longo da rede conforme as necessidades específicas da concessionária de energia. A partir do momento em que métodos para aumento da eficiência operacional da GD são desenvolvidos e validados, abrem-se caminhos para facilitar a diversificação na matriz energética nacional, proporcionando ainda uma maior flexibilidade no planejamento das redes de distribuição. Por outro lado é importante observar que a inserção da GD em horários inapropriados, sem a

devida avaliação de critérios específicos, pode resultar em um aumento no carregamento da rede e em indesejáveis níveis de tensão, fora dos limites aceitáveis estabelecidos pelo PRODIST (2010) e como resultado, pode-se ter um aumento dos custos de operação, manutenção e planejamento, e até implicar em severas multas às companhias distribuidoras de energia.

1.3.2 Objetivos Específicos

a) Analisar a viabilidade do uso de uma fonte de GD a biogás num aterro sanitário (AS), através da estimativa da produção e/ou vazão do biogás proveniente do tratamento dos RSU depositados no mesmo, e por consequência a potência elétrica que pode ser gerada por esta GD;

b) Utilizar uma metodologia para a definição do regime ótimo de operação (*ranking*) da GD com a aplicação de um método de apoio à decisão que seja capaz de avaliar diversos critérios de forma conjunta. Tais critérios podem ser diretamente relacionados com a qualidade do fornecimento de energia elétrica, como níveis de tensão, capacidade de carregamento de condutores e serviços ancilares (SA's) - reserva de potência, controle de frequência, reserva de prontidão, suporte de reativos e autorestabelecimento. As prioridades dos critérios quantitativos (níveis de tensão, perdas de potência e carregamento dos cabos condutores do alimentador) serão definidas com a utilização da lógica *fuzzy* e as preferências dos critérios qualitativos (possibilidade do fornecimento dos SA ao alimentador) serão definidas por estimativas de especialistas da concessionária para a definição dos melhores horários do dia para o despacho da GD ao sistema de distribuição de energia elétrica.

1.4 Organização do trabalho

Para melhor apresentar o trabalho desenvolvido nesta dissertação, dividiram-se os capítulos da seguinte maneira:

CAPÍTULO 2 – Fontes de Energia e Geração Distribuída;

CAPÍTULO 3 – Aproveitamento Energético dos RSU;

CAPÍTULO 4 - Uso do Biogás de RSU como Fonte Alternativa de Energia Elétrica;

CAPÍTULO 5 – Metodologia Proposta;

CAPÍTULO 6 - Aplicação da Metodologia;

CONCLUSÃO;

Principais Contribuições;

Previsões para trabalhos futuros;

Publicações;

APÊNDICE A – Diagnóstico do AL03;

APÊNDICE B – Diagnóstico do despacho contínuo da GDAS ao AL03;

APÊNDICE C – Diagnóstico do despacho da GD AS ao AL03 pelo ranking da metodologia.

ANEXO A – Modelos numéricos para o cálculo da geração de biogás;

ANEXO B – Metodologia para determinação do período de despacho da GD ao AL 03 –
Estimativa de Especialistas.

2 FONTES DE ENERGIA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Quanto às fontes de energia, consideram-se aqui todas as substâncias (petróleo, carvão, urânio, biomassa, etc.) capazes de produzirem energia em processos de transformação (combustão, fissão nuclear, etc.), como também as formas de energia associadas ou não ao movimento dos corpos (energia solar, gravitacional), movimento dos fluidos (energia das ondas, hidráulica) e dos gases (energia eólica), ou à temperatura das substâncias (energia geotérmica), cuja transformação em outras formas de energia pode ser realizada em larga escala. (FARRET, 1999).

2.1 Fontes não renováveis de energia

Quanto à renovabilidade das fontes, em princípio, todas podem ser produzidas e repostas na natureza. Entretanto, para várias delas o processo de reposição natural envolve milhares de anos e condições favoráveis (como é o caso do petróleo), enquanto que a reposição artificial quando não é impossível é absolutamente inviável, envolvendo um gasto de energia igual ou superior à quantidade de energia a ser obtida, ou custos proibitivos (como é o caso da energia nuclear).

Além disso, o carvão e o petróleo são altamente poluidores e contaminam o ar, ocasionam chuvas ácidas quando queimados, contaminam o solo, o mar, os rios e as águas subterrâneas durante o processo de extração e como consequência dos frequentes vazamentos produzem os “gases de efeito estufa” que contribuem para o aquecimento global. Como se isso fosse pouco, ainda existem as guerras e conflitos internacionais que são causados pelo interesse pelo controle das fontes de petróleo.

Segundo o ICLEI (2009) as fontes não renováveis de energia totalizam 53,2% da matriz nacional e fica evidente que o consumo de petróleo e seus derivados ainda é muito elevado no país (36,7%), seguido de gás natural (10,3%) e carvão mineral (6,2%).

2.2 Fontes renováveis de energia

Conforme Filho (2005) fontes renováveis são aquelas que não queimam combustíveis fósseis para produção de energia elétrica, não causando assim um grande dano ambiental, tais como: hídrica, solar e eólica.

Aquelas cuja utilização pela humanidade não representa qualquer variação significativa em seu potencial, que em muitos casos está avaliado para uma duração de vários milhões (ou bilhões) de anos (energia solar, gravitacional), e aquelas outras, cuja reconstituição pode ser feita sem grandes dificuldades em prazos de apenas alguns anos e até menos, como no caso da biomassa. São provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, que é a fonte primária de quase toda energia disponível na terra, por isso, praticamente inesgotável e não alteram o balanço térmico do planeta (ICLEI, 2009).

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis é uma tendência em diversos países, em especial, na Europa e Austrália. Dentre os motivos que levaram a adoção destas políticas públicas nesses países, podem-se destacar:

- Diversificação da matriz energética;
- Redução da dependência de importação de combustíveis fósseis para usinas térmicas, minimizando o risco de variações abruptas no preço do insumo energético;
- Comprometimento internacional de adotar medidas para combater o aquecimento global, por meio da assinatura do Protocolo de Quioto e outros tratados internacionais;
- Cumprimento de metas de redução na emissão de gases de efeito estufa;
- A liderança no desenvolvimento de tecnologia para produção eficiente de energia elétrica a partir de fontes eólica, solar, biomassa, maré motriz, geotérmica e outras.

Conforme o ICLEI (2009), no Brasil a participação de energias renováveis na matriz energética totalizava 45,3%, o que é bastante significativo. A Figura 1 apresenta a evolução do consumo de energias renováveis e não renováveis no país, desde 1970, ficando evidente que a participação das energias renováveis na matriz energética nacional não aumentou nos últimos anos.

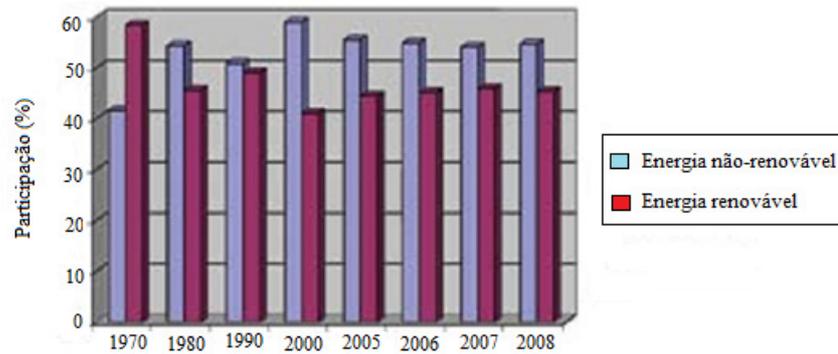


Figura 1 – Evolução das energias renováveis e não renováveis no país desde 1970. Fonte: ICLEI, 2009.

A utilização de energias renováveis no país baseia-se principalmente em hidrelétricas (13,8%), produtos da cana-de-açúcar (16,4%), lenha e carvão vegetal (11,6%). Apenas 3,5% da matriz energética brasileira correspondem a outras fontes de energia renovável.

A Figura 2 apresenta a matriz energética brasileira.

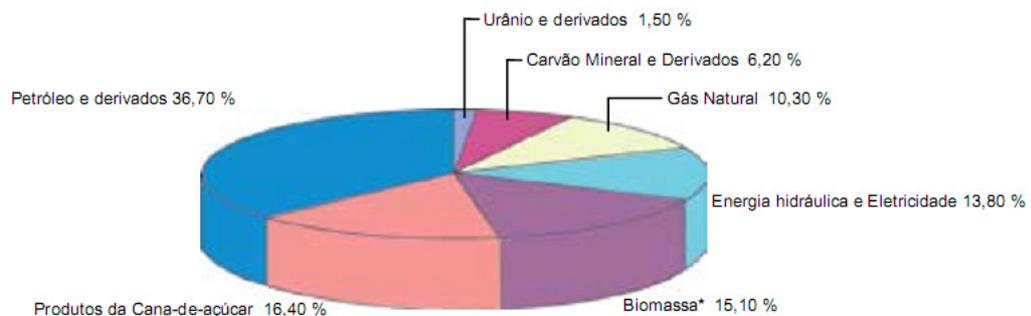


Figura 2 – Matriz energética brasileira. Fonte: ICLEI, 2009.

Na Figura 3, pode se verificar que a matriz energética mundial apresenta dependência direta de energias não renováveis.

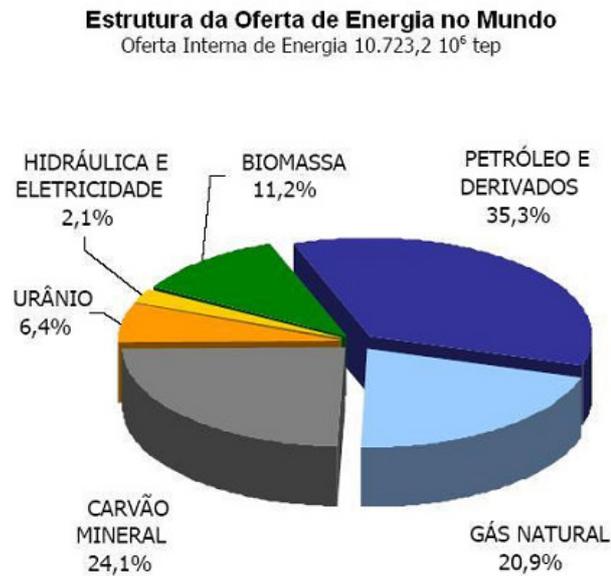


Figura 3– Matriz energética mundial. Fonte: ICLEI, 2009.

2.3 Fontes alternativas de energia

São fontes de energia relativamente novas (no que se refere à exploração como fonte de energia elétrica), não utilizadas tradicionalmente e que não produzem energia em grande escala, tais como pequenas centrais hidrelétricas, solares, eólicas, células a combustível, biomassa e etc. (FILHO, 2005).

Estas fontes são consideradas como sustentáveis e limpas e derivam do meio ambiente natural. Cabe ressaltar que este conceito é amplamente confundido com o conceito de fontes renováveis de energia e para diferenciá-los, consideram-se as centrais hidrelétricas de grande porte: elas são renováveis, mas não são alternativas. (FILHO, 2005).

Com as crises de ofertas do petróleo ocorridas nos anos de 1973 a 1979, várias fontes de energia renovável, até então economicamente inviáveis, tornaram-se mais atrativas. No Brasil, foram desenvolvidos pequenos projetos de fontes de energia eólica, solar, de pequenas centrais hidroelétricas e de biomassa, mais especificamente do álcool de cana-de-açúcar para combustível veicular. A partir da metade da década de 1980, com a relativa estabilidade que o preço do petróleo alcançou, houve uma diminuição ou quase paralisação no desenvolvimento de fontes de energias alternativas.

Em meados da década de 1990, com o desenvolvimento de estudos científicos sobre os impactos causados ao meio ambiente pela geração de energia a partir de combustíveis fósseis e sua possível causa para o aumento da temperatura do planeta, começaram a nível mundial movimentos para a assinatura do Protocolo de Quioto, com a premissa de redução de emissões de gases poluentes. Nesta última década, com a ampla preocupação com a degeneração do meio ambiente, vista pela crescente aplicação das orientações definidas no Protocolo de Quioto, somada ao surgimento de estudos prevendo a futura escassez dos combustíveis fósseis, percebeu-se que a utilização de fontes alternativas de energia, principalmente, renováveis seria essencial para a obtenção do desenvolvimento sustentável, visando equilíbrio econômico, social e ambiental.

Mesmo com a crise econômica global, no final do ano de 2008, que ocasionou uma redução mundial nos investimentos em fontes alternativas de energia, pode-se dizer que o aproveitamento de fontes renováveis de energia continuou a crescer, tendo em vista a conscientização provinda do estabelecimento do protocolo de Quioto. Em função destas argumentações, pode-se concluir que embora em meio a uma das maiores crises econômicas mundiais já registradas, os aspectos ambientais não estão mais deixados de lado (BARIN, 2010).

Sistemas de geração de energia baseados em fontes primárias renováveis, utilizando biogás resultante da decomposição aeróbia de RSU, por exemplo, são consideradas tecnologias ecologicamente amigáveis e com incentivos governamentais para a sua difusão como o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Lei 10.438 (PROINFA, 2002).

Conforme o banco de Informações de geração de energia elétrica da ANEEL, em novembro de 2008, o uso de fontes renováveis de energia apresenta em operação no país 159 usinas hidrelétricas (74.6TW – correspondente a 71% da energia elétrica gerada), 227 centrais geradoras hidrelétricas (120MW – 0,11%) e 320 PCH's (2.4TW – 2,3%), 17 usinas eólicas (272MW – 0,26%), apenas um empreendimento fotovoltaico (20kW) e 302 termelétricas movidas à biomassa (5.7TW – 5,4%), sendo três destas usinas abastecidas por biogás cuja matéria-prima é a biomassa obtida de RSU de aterros sanitários.

De acordo com ANEEL (1998), PCH é toda usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1MW e inferior a 30MW. Além disso, a área do reservatório deve ser inferior a 3km². Já usinas classificadas como CHE são aquelas cujos potenciais hidráulicos são iguais ou inferiores a 1MW.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, tanto a nível internacional quanto nacional. A biomassa é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis.

A Tabela 1 mostra os custos da geração de energia elétrica de diferentes fontes alternativas.

Tabela 1– Custos da geração de energia elétrica de diversas fontes alternativas.

Sistema	Custo da Energia (R\$/MWh)
Biogás	67 a 190
Fotovoltaico	200 a 400
Eólico	50 a 80
Biomassa	40 a 70
Motor Diesel	100 a 300
Micro central hidrelétrica	20 a 40

Fonte: Menezes e Pinto, 2007.

2.3.1 Incentivos nacionais

Para o fomento da geração de energia elétrica através de fontes alternativas foi criado o PROINFA. Este programa, conforme Lei nº 10.438, em seu artigo 3º, de 26 de abril de 2002, instituiu o programa com a finalidade de aumentar a participação da energia elétrica gerada no sistema a partir de unidades de produção baseada em biomassa, eólica e PCH no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Apesar de seus objetivos relevantes, o PROINFA não poderia ser operacionalizado sem alguns ajustes nos mecanismos da Lei às diretrizes e às orientações emanadas a partir da nova Política Energética Nacional. Dessa forma, fez-se necessária a revisão dessa Lei, por meio da Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, quando foram obtidos avanços e aperfeiçoamentos significativos para a sociedade (MME, 2010).

Conforme o Decreto 5.025 (ANEEL, 2004), o PROINFA foi programado para funcionar em duas fases de procedimentos distintos. Na primeira, foram contratados 3.300MW de potência instalada, mediante duas Chamadas Públicas com datas-limite de assinatura de contrato em 29 de abril e 30 de outubro de 2004. Tais contratações foram divididas igualmente entre as fontes, cabendo, portanto, 1.100MW para cada uma. O prazo

para entrada em operação comercial dos empreendimentos contratados era até 30 de dezembro de 2006.

Segundo a reportagem de René Pereira no Jornal “O Estado de São Paulo”, até o momento, este programa já foi prorrogado três vezes e no total foram utilizados apenas a metade da potência instalada de usinas eólicas previstas no programa inicial em 2002, ou seja, 534MW. Na época este incentivo era justificável, pois o preço de geração desta energia era elevado – em torno de R\$282 o MWh. No cenário atual em função dos leilões de energia eólica, foi possível a comercialização pelo preço médio de R\$ 130,86 o MWh. Em função destes números, os especialistas do setor, tornam questionável a decisão do governo de prorrogar o PROINFA. O governo sustenta a tese de que esta renovação garantirá a estabilidade regulatória ao não prejudicar os investidores contratados pelo PROINFA (ECODEBATE, 2011).

2.3.2 Incentivos internacionais

2.3.2.1 O MDL e os RCE's

Com relação aos eventos ocorridos no mundo, envolvendo a preocupação com as possíveis mudanças climáticas, pode-se citar a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC, sigla em inglês) a partir de 1992, em Nova York, quando da realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, denominada de ECO 92. Após a regulamentação da UNFCCC, foi instituído um Órgão Supremo da Convenção denominado de Conferência das Partes - COP.

Na 3ª Conferência das Partes (COP-3) ocorrida em 1993 na cidade de Kyoto, no Japão, surgiu o Protocolo de Quioto. Este protocolo entrou em vigor em 2005 e estabeleceu duas metas: que os países criem programas de redução da poluição dentro de seus territórios e que desenvolvam mecanismos de flexibilização com vistas à diminuição de custos.

Estes mecanismos servem para a redução em 5% das emissões antrópicas em relação aos níveis de 1990, no período de 2008 a 2012 (ICLEI-2009) pelas partes relacionadas no Anexo I (países desenvolvidos) estabelecendo mecanismos adicionais de implementação permitindo que a redução das emissões e o aumento da remoção de gás carbônico (CO₂) pelas partes “Anexo I” fossem obtidos de seus territórios, instituindo mecanismos adicionais como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), a Implementação Conjunta (IC) e o

Comércio de Emissões (CE). Aos países em desenvolvimento, como o Brasil, que não possuem metas de reduções, chamados de partes “Não Anexo I”, cabe somente o MDL.

O MDL foi previsto pelo artigo 12 do Protocolo de Quioto, e é uma evolução da proposta brasileira que, com algumas modificações, foi adotada por esse acordo. A proposta brasileira de criação de um Fundo de Desenvolvimento Limpo (FDL) estabelecia uma penalidade financeira aos países desenvolvidos cujas emissões de gases de efeito estufa fossem superiores aos níveis acordados no âmbito da convenção. A ideia era de que os recursos obtidos fossem aplicados em projetos de mitigação ou prevenção de mudanças climáticas em países em desenvolvimento, através de um fundo. Ao longo da COP3, essa proposta evoluiu para o MDL (FELIPETTO, 2007).

A quantidade relativa à diminuição de emissões de gás de efeito estufa (GEE) ou sequestro de CO₂ pode resultar em Reduções Certificadas de Emissões (RCE's) que representam créditos que podem ser comercializados entre países “Anexo I” e “Não Anexo I”, tendo a principal finalidade o benefício econômico para os “Não Anexo I” e um auxílio para que os países do Anexo 1 cumpram suas metas para com o Protocolo. Verificou-se que uma RCE é igual a uma tonelada métrica equivalente de CO₂, calculada com o uso dos potenciais de aquecimento global (OLIVEIRA, 2009).

Para a emissão dos RCE comercializáveis, é necessário o enquadramento da atividade nas regulamentações designadas pela conferência das partes definida no Protocolo de Quioto. Essas certificações também são conhecidas como créditos de carbono.

O Brasil ocupa a terceira posição no mundo em termos de redução de emissões de efeito estufa (8%), atrás da China (35%) e da Índia com 29% (OLIVEIRA, 2009).

O projeto MDL, aplicado à redução de emissões de gases gerados nas áreas de disposição final de resíduos sólidos, prevê a realização de estudos de viabilidade técnica, social, institucional e econômica para municípios brasileiros, associados ao desenvolvimento de um programa de capacitação em gestão integrada de resíduos sólidos com foco no MDL (PIEROBON, 2007).

Em 2009 existiam no Brasil 40 projetos no âmbito do MDL desenvolvidos em aterros sanitários, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE por meio de emissões de metano (CH₄) nos próximos anos, dos quais 25 estão registrados pelo conselho Executivo no UNFCCC, 14 estão em fase de validação no Comitê Executivo e apenas 1 foi encaminhado para revisão do pedido (ICLEI-2009).

Para se ter noção de como ocorre a comercialização de créditos de carbono, cita-se como exemplo uma empresa sediada em um país desenvolvido (Anexo I) com uma cota de emissão de 100 toneladas de carbono por ano, mas que efetivamente emite 120 toneladas.

Para cumprir a meta estipulada pelo protocolo de Quioto, esta empresa teria que comprar os créditos de carbono de um país em desenvolvimento (Não Anexo I) referente às 20 toneladas de carbono que emitiu a mais de sua cota (ICLEI, 2009).

O projeto MDL aplicado à redução de missões de gases gerados nas áreas de disposição final de resíduos sólidos prevê a realização de estudos de viabilidade técnica, social, institucional e econômica para municípios brasileiros, associados ao desenvolvimento de um programa de capacitação em gestão integrada de resíduos sólidos com foco no MDL (PIEROBON, 2007).

Baseados no que foi citado sobre o MDL, muitos países estão aproveitando o GDL para geração de energia proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos.

2.3.2.1.1 Créditos de carbono e a queima eficiente do biogás

A queima eficiente em *flare* transforma o metano (CH_4) em dióxido de carbono (CO_2). Segundo afirmações de especialistas no setor, o potencial de aquecimento (efeito estufa) é 21 vezes menor e assim haverá uma diminuição na emissão de gases produtores de efeito estufa. A quantidade de metano que se deixa de lançar na atmosfera pode ser negociado como créditos de carbono ou emissões reduzidas de carbono.

2.3.2.1.2. Créditos de carbono e a geração de energia elétrica

Existem duas opções quanto à produção de certificados de carbono com a geração de energia elétrica:

Captação do gás para produzir energia (por exemplo, eletricidade/energia térmica), com ou sem reivindicação de redução de emissões por se deslocar ou evitar o uso de energia de outras fontes.

Como os investimentos necessários para a geração de energia em aterros sanitários são muito elevados e o diferencial de créditos de carbono, se comparado com a queima eficiente em *flare*, muito pequeno (isto é, a quantidade de créditos de carbono com a geração de energia não é significativamente maior que a quantidade de RCE's da queima eficiente), somente será viável a geração de energia elétrica em aterros sanitários caso esta possa ser vendida a um preço que cubra os custos de investimento e operação (FELIPETTO, 2007).

Riscos associados a projetos do MDL em resíduos sólidos

Segundo Felipetto (IBAM, 2007), os riscos associados aos projetos podem ser:

- Risco político, como a gestão de resíduos urbanos é de competência municipal, a troca de governos a cada quatro anos pode criar discontinuidades para projetos do MDL, que são necessariamente de longo prazo (no mínimo, sete anos);
- Risco social, na maior parte dos lixões, espalhados pelo país, existem catadores de lixo que obtém o seu sustento através da triagem de materiais recicláveis presentes nos RSU. Em um projeto do MDL, é necessário que os lixões sejam recuperados e que os resíduos sejam cobertos. Com isso não haverá espaço para os catadores, o que pode provocar fortes distúrbios sociais, capazes de comprometer o sucesso do empreendimento;
- Risco da geração e coleta de gás, para a viabilidade do projeto, calcula-se a quantidade estimada de gás gerada por um determinado volume de resíduos sólidos, através de um modelo matemático, e estabelece-se um percentual de coleta do gás gerado. Tanto um quanto o outro pode variar muito, dependendo do tipo de resíduo, da quantidade e, principalmente, do método de operação do aterro e do sistema de gás. Sendo assim, a quantidade de créditos de carbono pode ser significativamente menor do que a estimada, o que pode inviabilizar o projeto;
- Risco de mercado, se a oferta de créditos de carbono se tornar maior que a demanda, neste caso os preços podem despencar; como em 2012 encerra o primeiro período de compromisso do Protocolo de Quioto, todos os acordos deverão ser reanalisados. Não se sabe ainda como ficará o MDL, pois tanto na COP 15 em Copenhague na Dinamarca em 2009, como na COP 16 em Cancun no México em 2010, nada ficou definido a este respeito, no entanto, os participantes

deixaram para decidir no encontro seguinte que se realizará no final de 2011 em Durban na África do Sul (PORTAL BRASIL, 2011);

➤ Outros riscos:

1. Usualidade da coleta e tratamento do biogás de aterro - Isto ocorrendo, o projeto deixaria de ser elegível pelo MDL, pois não teriam mais adicionalidade que é uma característica obrigatória para a aceitação, ou seja, fazer o que todo mundo faz não confere créditos. “Em nosso país, historicamente, devido ao descaso do governo com este tipo de problema não oferece o menor risco” (comentário por conta do autor desta dissertação);
2. Modificação do valor estipulado para o aquecimento global causado pelo metano. Caso este valor seja reestudado e diminua significativamente por conta de novas pesquisas, consolidadas por especialistas, os projetos poderão ser inviabilizados. Embora sejam pequenas as chances de isso acontecer, há o risco de que esse número seja alterado, o que, em caso de redução, prejudicaria a viabilidade econômica do projeto e, em caso de aumento, melhoraria os resultados do empreendimento.

2.4 Geração Distribuída

O incentivo inicial à GD surgiu nos Estados Unidos da América (EUA) com as mudanças na legislação promovidas pelo *Public Utilities Regulatory Policies Act* (PURPA) em 1978, devido a uma crise econômica mundial, com o intuito de reduzir a dependência do petróleo, promover fontes alternativas de energia mais eficientes e diversificar a indústria de geração de energia elétrica. Estas mudanças foram ampliadas em 1992 pelo *Energy Policy Act* (EPA), com a desregulamentação da geração de energia. Outros países também começaram a alterar sua legislação referente ao setor elétrico a partir de então (HADDAD, 2010).

Segundo a APINE (2010), pode-se conceituar geração distribuída, de maneira genérica, como aquela localizada próxima aos centros de carga, conectada ao sistema de distribuição ou do lado do consumidor, de pequeno porte, não despachado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

2.4.1 GD no Brasil

No Brasil, a GD é utilizada por pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia gerada, por sua conta e risco denominados de Produtor Independente de Energia - PIE, e por pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou licença para gerar energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, podendo mediante alvará da ANEEL, comercializar os excedentes de energia, denominados de Autoprodutores de energia – APE. (PRODIST, 2010).

Em (CHAVES, 2009), é citada uma derivação do PIE que é a figura do Produtor Independente Autônomo (PIA), que é o produtor de energia enquadrado no âmbito do PROINFA.

Os benefícios da GD, para a concessionária e para os consumidores conectados a sua rede ocorrem através da postergação de investimentos em expansão nos sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição; baixo impacto ambiental menor tempo de implantação, redução de carregamento dos condutores e conseqüentemente das perdas nas redes, aumento da confiabilidade do sistema, atendimento às comunidades isoladas, novas opções de negócios, melhora dos níveis de tensão em períodos de carga pesada, provimento de serviços ancilares como a geração de energia reativa, e diversificação da matriz energética (HADDAD, 2010).

Por outro lado há algumas desvantagens no aumento de GD espalhadas pela rede de distribuição tais como: bidirecionalidade do fluxo, o que acarreta um aumento da complexidade de operação da rede de distribuição, alteração dos procedimentos de operação, controle e proteção por parte das distribuidoras de energia, dificuldade de controle do nível de tensão no período em que a rede está com carga leve, alteração dos níveis de curto-circuito e aumento das distorções harmônicas da rede, geração intermitente por disponibilidade de combustível – no caso biogás de aterro e elevado custo de implantação e tempo de retorno do investimento.

A utilização de fontes alternativas de energia gera um desafio muito grande para a integração das GD's às redes de distribuição das empresas distribuidoras de energia. Muitas concessionárias ainda não estão completamente preparadas para conectar unidades de GD às redes pela falta de estudos mais detalhados, tanto sobre o impacto desta conexão, quanto sobre as contribuições que estas conexões podem ocasionar as suas redes.

2.4.2 Modos de operação da GD

De Souza (2009) cita que as unidades de GD, por apresentarem uma característica modular e compacta são altamente aplicáveis para diversas situações conforme mostradas abaixo:

- Potência *stand by*: O equipamento permanece à disposição da carga para suprimento em caso de faltas ou necessidades específicas;
- Geração na ponta: O equipamento é programado para gerar energia apenas nos picos de carga;
- Geração na base: A geração de energia é constante, ou seja, durante todo ou parte do período de trabalho visando redução de custos com a energia contratada;
- Cogeração: Talvez, atualmente, a maneira mais interessante de utilizar a GD no mercado. A grande quantidade de energia térmica dissipada pode ser aproveitada para produção combinada de calor (vapor) e energia mecânica.

2.4.3 Impactos da conexão da GD na rede elétrica

A conexão da GD pode trazer impactos significativos no fluxo de potência, perfis de tensão, perdas elétricas, proteção, qualidade da energia (QEE) e outros, tanto para os consumidores quanto para os fornecedores. Esses impactos podem ser positivos ou negativos, dependendo do sistema de distribuição e das características dos geradores (BRITO e FARDIN, 2007).

A utilização de fontes alternativas de energia gera um desafio muito grande para a integração das GD às redes de distribuição das empresas distribuidoras de energia pois, a maioria dessas fontes é intermitente e com limitações em sua flexibilidade de geração (células fotovoltaicas nem sempre produzem energia durante o período noturno cujos horários apresentam alto consumo, aerogeradores podem apresentar grandes variações em função dos ventos e o biogás de aterros depende do tipo de resíduos, umidade e temperatura), dessa forma o controle na associação das GD é indispensável (LIMA et. al, 2006).

Dentre os impactos mais preocupantes estão àqueles relacionados à QEE. Para que a conexão seja a melhor possível são necessários testes e análises de diversos parâmetros que visam garantir tanto a segurança da instalação quanto o fornecimento de uma energia limpa e confiável. Nos padrões nacionais deve-se atender principalmente a norma IEEE 1547.1 *IEEE Standard for Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, o Módulo 8 do PRODIST - ANEEL e o Submódulo 2.2 dos Padrões de Desempenho da Rede Básica do Observador Nacional do Sistema – ONS (DE SOUZA, 2009).

Conforme citado por Haddad (2010), muitas concessionárias ainda não estão completamente preparadas para conectar unidades de GD às suas redes pela falta de estudos mais detalhados sobre o impacto desta conexão e por falta de adequação técnica do sistema, ou seja, um aumento destas conexões implica num aumento considerável do fluxo de potência na rede e um aumento na contribuição na potência de curto-circuito.

2.4.4 Fluxo de potência e perdas associadas

As redes de distribuição operam de forma radial. A integração de GD nos sistemas de distribuição resulta na possibilidade de fluxos de potência bidirecionais (dependendo das condições de carregamento), mudança nas perdas e perturbações nas tensões. Se a potência produzida pela GD for absorvida localmente, a energia distribuída ao longo do alimentador irá diminuir, resultando assim numa redução tanto das perdas quanto das quedas de tensão na rede. Onde a potência ativa produzida exceder a consumida localmente, o excesso poderá ser exportado ao sistema, causando um aumento na tensão local (BRITO e FARDIN, 2007).

Conforme o PRODIST (2010) – Módulo 8, os impactos mais preocupantes relacionados à QEE, em regime permanente¹ ou em regime transitório, afetam os seguintes aspectos:

- a) valor da tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;

¹ Regime permanente é o intervalo de tempo de dez minutos da leitura de tensão, onde não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura.

- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuações de tensão;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) variação de frequência.

A seguir serão apresentados detalhadamente os impactos citados acima:

a) Tensão em regime permanente: Os limites para os níveis de tensão são estabelecidos pelo PRODIST (2010) como: adequados, precários e críticos e referem-se à comparação do valor de tensão obtida por medição, através de um conjunto de leituras realizadas, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados. A

Tabela 2 indica os níveis de tensão para pontos de conexão em média tensão.

Tabela 2– Níveis de tensão e suas faixas de variação.

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL < 0,93 TR$
Crítica	$TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05 TR$

Fonte: PRODIST, 2010 - Módulo 8.

Conforme descrito por Brito (2007), a GD pode influenciar as variações nas tensões se operar em coordenação com as exigências locais da carga, significando que sempre que a carga local, na rede de distribuição, estiver aumentando, a produção local será aumentada também e vice-versa. Neste caso, a GD reduz a variação entre o valor máximo e mínimo do nível de tensão comparada a uma situação sem GD. Se operar sem coordenação com a carga local, a potência da GD aumenta as variações entre o máximo e o mínimo nível de tensão, comparados a uma situação sem GD, porque o nível de tensão mínimo se manteria

(geralmente situação de carga máxima, sem GD), mas o nível máximo da tensão aumentaria (carga leve, mas GD operando com máxima geração) Para o caso em que a GD não opera em coordenação com a carga local, a variação nas tensões nodais com a conexão da GD ocorre principalmente em situação de carga leve, e constitui-se, portanto, um dos principais fatores técnicos que podem limitar a quantidade e conseqüentemente a potência de geradores síncronos conectados à rede. É indispensável garantir que o perfil de tensão da rede não seja adversamente afetado antes da instalação de um gerador distribuído. Assim, devem-se analisar os casos mais críticos onde se tem:

- Máximo carregamento e sem geração;
- Mínimo carregamento e máxima geração.
- Máximo carregamento e máxima geração.

Outro aspecto importante relacionado ao perfil de tensão de regime permanente é determinar quanto do valor da tensão da rede varia quando o gerador é inesperadamente desconectado, já que os reguladores de tensão das redes de distribuição são relativamente lentos. Assim, deseja-se que tal variação seja a menor possível.

b) Fator de potência: Referente ao fator de potência (FP), o PRODIST determina que no ponto de conexão em que a tensão de operação seja inferior a 230kV, o FP deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,0 (um) indutivo ou 1,0 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo.

c) Harmônicos: O conteúdo de harmônicos no sistema do produtor não deve superar, no ponto de interconexão, o limite aceitável pela rede externa. Caso este limite seja excedido tornam-se obrigatórias medidas corretivas para redução destes conteúdos, tais como instalação de filtros ou alteração nos equipamentos geradores de harmônicos.

As distorções harmônicas, que são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental, seguem regras de medição e de cálculos estipulados pelo PRODIST e estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3– Valores de distorção harmônica.

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão (DTT) %
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	3

Fonte: PRODIST, 2010 - Módulo 8.

d) Desequilíbrio de tensão: O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição.

e) Flutuações de tensão: A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão.

A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

A Tabela 4 fornece os valores de referência a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão. Observa-se a delimitação de três faixas para classificação dos indicadores estabelecidos: valor adequado, valor precário e valor crítico. Esses valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 4- Valores de desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão.

Valor de referência	$P_{ST}D95\%$	$P_{LT}S95\%$
Adequado	$< 1 \text{ p.u. / FT}$	$< 0.8 \text{ p.u. / FT}$
Precário	$1 \text{ p.u.} - 2 \text{ p.u. / FT}$	$0.8 - 1.6 \text{ p.u. / FT}$
Crítico	$> 2 \text{ p.u. / FT}$	$> 1.6 \text{ p.u. / FT}$

Fonte: PRODIST, 2010 - Módulo 8.

f) Variação de frequência: A GD, conectada ao sistema de distribuição deve, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9Hz e 60,1Hz. Quando a geração sofrer algum distúrbio que ocasione a saída desta faixa, terá que garantir o retorno da frequência para a faixa de 59,5Hz a 60,5Hz, no prazo de 30s, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, se isto não for possível, ou seja, se houver a necessidade de corte da geração ou da carga, a frequência não poderá exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz. Em condições extremas, não poderá permanecer acima de 62Hz por no máximo 30s acima de 63,5Hz por no máximo 10s; não poderá permanecer abaixo de 58,5Hz por no máximo 10s e abaixo de 57,5Hz por no máximo 5s (PRODIST, 2010) – Módulo 8.

2.5 Serviços Ancilares

Segundo o INEE (2006), serviços ancilares (SA's), também denominados de auxiliares ou subsidiários são:

Aqueles que complementam os serviços principais que, na segmentação brasileira, são caracterizados pela geração, transmissão, distribuição e comercialização. Estes serviços, em um sistema integrado como o brasileiro, se caracterizam por relações causa-efeito que afetam os sistemas como um todo e que ultrapassam as fronteiras da área de abrangência das empresas e/ou dos serviços principais.

Conforme citado por Lezama e Contreras (2010), quando a GD fornece potência reativa para controlar os níveis de tensão da rede de distribuição, este fato gera controvérsia, pois, a manutenção dos níveis adequados de tensão é de responsabilidade exclusiva das concessionárias. E quando isto ocorre, a GD terá uma diminuição em sua capacidade de produção de potência ativa. Este fato anuncia a necessidade de comercialização dos SA's.

2.5.1 Alguns dos SA's que a GD pode fornecer:

- a) Controle primário e secundário de frequência – controle realizado pelas unidades geradoras de modo a limitar e, posteriormente, extinguir a variação de frequência causada pelo desequilíbrio entre carga e geração;

- b) Reserva de potência ativa - provisão de potência ativa efetuada pelas unidades geradoras para realizar o controle de frequência;
- c) Reserva de prontidão - disponibilidade de unidades geradoras com o objetivo de recompor as reservas de potência;
- d) Suporte de reativos - fornecimento ou absorção de energia reativa, destinada ao controle de tensão da rede de operação, a mantendo dentro dos limites de variação estabelecidos;
- e) autorestabelecimento (*black-start*) - a capacidade que tem uma unidade geradora de sair, independentemente de fonte externa, de uma condição de parada total para uma condição de operação. (ANEEL, 2003);
- f) Suporte de potência na ponta de curva de demanda (*Peak Shaving*).

O suporte de reativos ou a provisão de potência reativa está diretamente ligado ao controle da tensão e do fator de potência, mantendo-os dentro dos limites admissíveis, em todo momento, tanto em condições normais de operação, como frente a contingências. Um aspecto importante refere-se à localização dos provedores, pois os requerimentos de reativos e os problemas de tensão são de caráter local, e a transmissão de reativos resulta em perdas consideráveis e diminui a capacidade de transmissão de potência ativa. Portanto, prover o serviço o mais próximo possível do local onde se faz necessário é o ideal (CHAVES, 2009).

As reservas de potência ativa são necessárias para operar o sistema com um grau de segurança e qualidade adequada. Essas reservas são recursos que servem de proteção ao sistema para manter o equilíbrio entre oferta e demanda, durante a operação normal e durante as perturbações. Na terminologia técnica internacional, o termo “reservas” geralmente é diferenciado em duas categorias: reservas de prontidão (*spinning reserve*) e reservas suplementares (*Non-spinning*). Em geral, entende-se por reservas de prontidão o uso de equipamentos de geração para disponibilizar energia de substituição, os quais estão sempre ligados e sincronizados com a rede a fim de incrementar o fornecimento de potência ante a mudança na frequência, corrigindo desequilíbrios entre a geração e a carga causadas por quedas, saídas de geradores ou linhas de transmissão. As reservas suplementares não têm necessidade de responder a uma interrupção imediata e são entendidas como a utilização de equipamentos de geração, assim como o desligamento de cargas que podem ser usados para ajustar desequilíbrios entre a geração e a carga, causados, geralmente, por saídas de geradores e de linhas de transmissão (CHAVES, 2009).

Resumo do Capítulo 2

Neste capítulo realizou-se uma breve revisão bibliográfica a cerca de conceitos de fontes de energias não renováveis, renováveis e alternativas. Mostraram-se informações sobre a diversificação da matriz energética nacional e mundial, os incentivos às fontes alternativas como o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) e os Créditos de Carbono.

Conceitos de geração distribuída no Brasil, seus modos de operação, impactos da conexão à rede de distribuição de energia elétrica da concessionária de distribuição e por último os Serviços Ancilares, que servirão de critérios qualitativos na metodologia deste trabalho, mesmo não tendo aplicação, atualmente, em GD despachando em sistemas de distribuição de média tensão.

3 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU

3.1 Lixo

Lixo é qualquer objeto sem valor ou utilidade, detrito oriundo de trabalhos domésticos, comerciais, industriais etc., o que se joga fora, escória. O lixo produzido individualmente ou coletivamente, pela ação humana, animal ou por fenômenos naturais, nocivos à saúde, ao meio ambiente e ao bem estar da população urbana recebe a denominação de resíduo sólido urbano (HENRIQUES, 2004).

3.2 Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo Udaeta et al. (2009), o lixo urbano recebe a denominação de RSU quando é de responsabilidade da prefeitura e é subdividido em lixo domiciliar, comercial e público. Existem diversos tipos de RSU, onde cada tipo de lixo exige determinada forma de tratamento, seguindo o procedimento denominado de Gerenciamento Integrado de Resíduos, que visa tratar da forma mais adequada esta questão.

Conforme Figueiredo et al. (2007 apud IBAM, 2001), os resíduos domiciliares são os gerados nas atividades diárias em residências, constituídos geralmente por restos de alimentos, jornais e revistas, embalagens em geral, papel higiênico e diversos outros itens como até alguns resíduos tóxicos. Os resíduos comerciais são gerados em estabelecimentos comerciais variando de acordo com a atividade desenvolvida. São, normalmente, constituídos dos mesmos itens encontrados no lixo doméstico, porém em maior proporção; os resíduos urbanos são gerados pela limpeza pública (ruas, praças, praias, terrenos, entre outros) e constituídos por restos vegetais diversos, corpos de animais, embalagens. Resíduos agrícolas gerados nas atividades pecuárias e agrícolas como embalagens de ração, adubos, etc. Resíduos gerados pela construção civil (entulhos) compostos em sua maioria, por uma mistura de materiais inertes como concreto, argamassa, madeira, plásticos, metais e terra, podendo conter materiais que conferem toxicidade como tintas, solventes e peças de amianto e resíduos especiais gerados por hospitais, farmácias, indústrias merecem cuidados especiais em

seu manuseio, transporte ou disposição final. Geralmente, para materiais hospitalares o tratamento mais indicado é a incineração (FIGUEIREDO et al.,2007).

Resíduos de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários possuem legislação própria e não se encaixam nos urbanos e nos comerciais, pois podem hospedar doenças provenientes de outras cidades, estados ou países. O lixo proveniente de fertilizantes químicos e pesticidas é tido como tóxico e necessita de tratamento especial (FIGUEIREDO et al.,2007).

A NBR 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), define resíduos sólidos como sendo aqueles no estado sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, de serviços, de varrição e agrícola. Esta norma classifica os resíduos sólidos quanto as suas características de periculosidade, toxicidade, reatividade, dentre outras, em três classes (resolução CONAMA nº 23 de 12 de novembro de 1996):

Classe 1 - Resíduos Perigosos: são aqueles que apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamento e disposição especiais em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Classe 2 - Resíduos não inertes: são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. São basicamente os resíduos com as características do lixo doméstico.

Classe 3 - Resíduos inertes: são aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização (NBR-10.007 da ABNT), não têm nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Isto significa que a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo. Muitos destes resíduos são recicláveis. Estes resíduos não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo (se degradam muito lentamente). Estão nesta classificação, por exemplo, os entulhos de demolição, pedras e areias retirados de escavações.

A produção dos RSU é um dos problemas mais relevantes da sociedade moderna, agravado pelo crescimento gradativo e desordenado da população, pela aceleração do processo de ocupação do território urbano e pelo desenvolvimento dos bens de consumo popularizados pelo aumento da produção industrial (LANDIM e AZEVEDO, 2006).

Os RSU, mais conhecidos como lixo, são provenientes de resto de atividades humanas consideradas pelos geradores como inúteis ou indesejáveis. Entretanto devido à falta de recursos naturais em algumas regiões, o reuso e aproveitamento dos RSU é de suma

importância para a questão socioambiental e é tratado pela sociedade em geral como um indicador de saúde pública. (FILHO e DA SILVA, 2008).

Impactos provenientes do inadequado tratamento dos resíduos sólidos urbanos estão diretamente ligados a questões ambientais, como as emissões de gases poluentes, contaminação de cursos de água e lençóis freáticos, e conseqüentemente, a questões de saúde pública, principalmente em relação à veiculação de doenças. A análise de questões econômicas e sociais, como a geração de energia elétrica a partir de RSU e a conseqüente geração de empregos e diminuição da quantidade de lixo armazenada, também são aspectos fundamentais a serem considerados para a melhoria no gerenciamento.

3.3 Disposição dos RSU

De acordo com o artigo V da constituição Federal de 1988 compete aos municípios organizar e prestar, diretamente ou em regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local. Assim, a coleta dos RSU por ser um serviço local, entende-se como de competência dos municípios a prestação de serviços de limpeza, coleta e destinação final dos resíduos sólidos de natureza domiciliar, comercial e pública (MARQUES, 2006).

3.3.1 Formas de disposição

Lixão é uma forma inadequada de disposição de resíduos sobre o solo, que se caracteriza pela simples descarga a céu aberto dos resíduos, sem considerar a área em que se está depositando, contaminação das águas superficiais e subterrâneas, risco de fogo, de deslizamentos e de explosões, proliferação de vetores de doenças (moscas, mosquitos, baratas, ratos, etc.), sem medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde pública. Esta situação é mostrada na Figura 4. Um dos pontos negativos desse tipo de deposição é a falta de controle dos resíduos recebidos no local, incluindo muitas vezes a existência de dejetos originados de serviços de saúde e das indústrias.

Surge neste sistema um problema social que são os catadores na segregação informal do lixo.

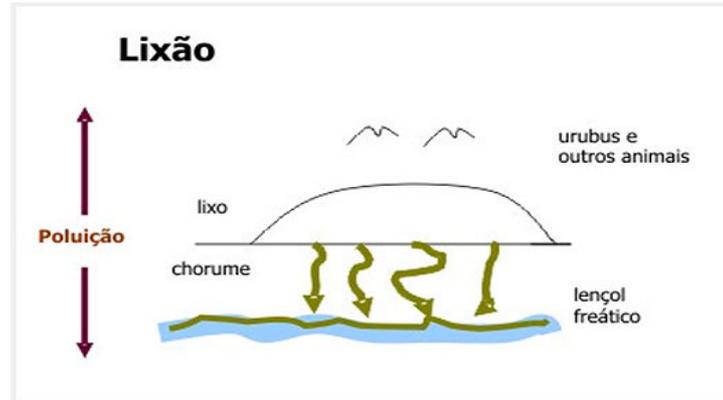


Figura 4 – Ilustração de um lixão. Fonte: lixo.com.br, 2010.

Aterro Sanitário é um processo de disposição fundamentada em critérios de engenharia (estudos geológicos e topográficos) e normas operacionais específicas tais como as normas técnicas da ABNT, NBR 8419/1984 e NBR-10.157/1987 as quais permitem a confinamento segura em termos de controle da poluição ambiental que se dará através de confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente terra, formando células, de modo que haja uma alternância entre os resíduos e o material de cobertura. Este aterro apresenta solo impermeabilizado através de argila e lona plástica para evitar infiltrações de líquidos percolados. Estes líquidos percolados são captados, drenados por tubulações e escoados para lagoas de tratamento. Ainda, para evitar o excesso de umidade pluvial, são colocados tubos para drenagem ao redor do aterro. A quantidade de lixo depositada no aterro é controlada através de uma balança e é proibido o acesso de pessoas estranhas ao local. Os gases liberados são captados e podem ser queimados com sistema de purificação de ar ou utilizados como fonte de energia. A Figura 5 mostra a ilustração de um aterro sanitário.



Figura 5 – Ilustração de um aterro sanitário. Fonte: lixo.com.br, 2010.

Aterro Controlado consiste de técnicas que buscam minimizar os impactos ambientais da disposição a céu aberto. Este método absorve alguns princípios de engenharias utilizadas para confinar os RSU cobrindo-os com camadas de material inerte. Este método não possui impermeabilização e nem sistema de tratamento do chorume ou de dispersão de gases gerados. Este processo é preferível ao lixão, mas, é inferior ao aterro sanitário.

A Figura 6 apresenta a ilustração de um aterro controlado.

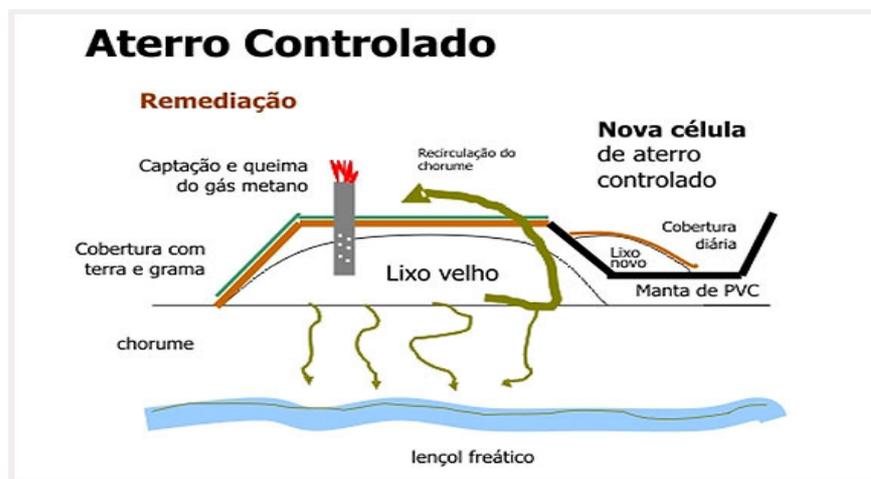


Figura 6 – Representação de um aterro controlado. Fonte: lixo.com.br, 2010.

Aterro Industrial utilizado para deposição dos resíduos enquadrados na classe 1 – perigosos (Norma ABNT NBR 10.004), como produtos tóxicos, corrosivos, inflamáveis e reativos. Deve seguir as recomendações orientadas pelas normas da ABNT, citadas abaixo:

- NBR – 8.418/84: apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos;
- NBR – 10.157/87: aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação (LANDIM, 2006).

3.4 Aproveitamento dos RSU

Através da estimativa do Plano Decenal de Produção de Energia 2008/2017, o lixo das 300 maiores cidades brasileiras poderia produzir 15% da energia elétrica total que é consumida no Brasil (LOBATO, 2008).

Em curto prazo, as melhores alternativas para o aproveitamento dos RSU são a reciclagem e a recuperação energética (OLIVEIRA, 2004).

A reciclagem, conforme mostrado na Figura 7 é o ganho de eficiência, seja pela redução de consumo de recursos naturais pelas indústrias, seja pela otimização das áreas destinadas a depósitos de resíduos ou, ainda, pela conservação de energia.



Figura 7 – Reciclagem em esteira. Fonte: Oliveira, 2004.

A recuperação energética, ou seja, o aproveitamento energético amplia a segurança do sistema elétrico nacional (OLIVEIRA, 2004) e provoca uma redução de custos, pois a oferta de energia elétrica ocorre de maneira descentralizada, em virtude de o lixo estar, muitas vezes, disponível próximo dos centros consumidores evitando custos com longas linhas de transmissão de energia elétrica.

Esta recuperação pode ser obtida de duas maneiras:

- a) Compostagem da fração orgânica: neste processo é liberado o biogás, também chamado de GDL, que é uma mistura resultante da fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais e vegetais, lixo ou efluentes industriais, como vinhaça, restos de matadouros, curtumes e fábricas de alimentos. A Figura 8 mostra um exemplo de compostagem onde aparece uma célula de um aterro sendo entulhada por RSU.



Figura 8– Compostagem numa célula do aterro de Sorocaba. Fonte: UNESP, 2007.

Dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40 e 60% de metano. Esse gás pode ser coletado e utilizado como fonte energética em máquinas de combustão interna (Ciclo Otto), células a combustível e em microturbinas adaptadas para biogás. Estudos para melhorar as condições de desenvolvimento biológico nos aterros de lixo, de maneira a acelerar a produção de metano de três a dez vezes em relação aos índices alcançados em aterros convencionais vêm sendo desenvolvidos para que a decomposição acelerada reduza o volume do aterro e crie novas possibilidades para o gerenciamento do lixo urbano permitindo a geração de energia a um custo de 3,5 centavos de dólar por kWh (UDAETA et al., 2002);

b) Por tratamento térmico ou incineração do lixo, sendo o calor gerado utilizado em processo de vaporização gerando energia através de fornalhas. É um processo de decomposição térmica onde ocorre redução de peso, de volume e das características de periculosidade dos resíduos, com a consequente eliminação da matéria orgânica e características de patogenicidade.

O processo de geração de energia por tratamento térmico (*waste-to-energy*) é considerado como uma tecnologia limpa, pois destrói termicamente os gases poluentes liberando para a atmosfera apenas vapor de água e gás carbônico (CO₂). Este processo compreende duas fases: na primeira o lixo é separado, já que, apenas matéria orgânica e resíduos não recicláveis (papel e plástico que tiveram contato com matéria orgânica) são fragmentados e triturados num

moinho, dando forma ao combustível derivado dos resíduos. Na segunda fase, esse combustível é incinerado a uma temperatura de cerca de 1000 graus Célsius (°C) e os gases quentes são aspirados para uma caldeira de recuperação, onde é produzido o vapor que aciona o turbogerador. Esta tecnologia de conversão consiste na energia química contida nas moléculas do biogás em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Os gases extraídos da caldeira tais como as dioxinas e os furanos (poluentes que tiveram sua emissão limitada em recente convenção em Estocolmo, Suécia) são neutralizados por processos de filtração cada vez mais sofisticados como o plasma térmico² os quais são responsáveis pelo encarecimento do processo e muitas vezes inviabilizando o mesmo;

c) A reciclagem tem estreita relação com a incineração, pois a redução da percentagem de plásticos diminui a capacidade energética e conseqüentemente a energia gerada elevando o custo da tonelada incinerada.

A empresa denominada “Usina Verde S/A” é a primeira a montar usinas para tratamento térmico do lixo no país. Instalada no Rio de Janeiro, na ilha do Fundão, no campus da UFRJ, como um projeto-piloto capaz de processar 30 toneladas de lixo, por dia, com uma geração de energia que seria suficiente para atender 20 mil habitantes (VARANDA, 2008).

3.5 Biomassa

Como descrito no Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), a biomassa é conceituada como qualquer matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, pode ser dividida em três classes: sólida, líquida e gasosa.

A sólida tem como fonte os produtos e resíduos da agricultura, os resíduos das florestas e a fração biodegradável dos resíduos industriais e os RSU.

Na líquida existe em uma série de bicomcombustíveis líquidos, tais como: biodiesel obtido a partir de óleos como o girassol; etanol e metanol.

² Gases que se apresentam parcialmente ionizados quando aquecidos a altas temperaturas (entre 5000 e 50.000 K), em pressões próximas à atmosférica.

Em estado gasoso é encontrada nos efluentes agropecuários provenientes da agroindústria e do meio urbano. Em se tratando dos resíduos da pecuária, por exemplo, a utilização da biomassa sólida em biodigestores resulta na produção de biomassa gasosa (biogás). Sua produção também ocorre em aterros de RSU, chamado de gás de lixo (GDL).

A biomassa gasosa (biogás) é resultado da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, sendo constituído por uma mistura de metano e gás carbônico.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto a nível internacional quanto nacional, a biomassa é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (ANEEL - Atlas de Energia Elétrica, 2008).

3.6 Biogás

A descoberta do biogás se deu com Shirley em 1667, que o chamou de gás dos pântanos. No entanto, foi só um século mais tarde que Volta reconheceu a presença de metano no gás dos pântanos. No século XIX, Ulysse Grayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia (decomposição sem presença de oxigênio) de uma mistura de estrume e água a 35°C, obtendo então 100 litros de gás por metro cúbico de matéria (COSTA, 2006).

No ano de 1884, Louis Pasteur apresentou à academia das Ciências os trabalhos de seu aluno, o qual considerou que a fermentação anaeróbia poderia dar origem a uma fonte de aquecimento e iluminação (COSTA, 2006, COELHO, 2001).

O Biogás (biomassa gasosa) é um combustível renovável que surge da decomposição anaeróbia de resíduos, em nosso caso dos RSU.

3.6.1 Composição do biogás de aterro

O biogás de aterro apresenta-se composto de vários gases, uns presentes em maior escala que outros. Os principais componentes para a fase metagênica - (BORBA, 2006 e OLIVEIRA, 2009) são:

- Metano (CH₄) - de 45 a 60%;
- Dióxido de Carbono (CO₂) – 40 a 60%;
- Nitrogênio (N) – 2 a 5%;
- Oxigênio (O₂) – 0.1% a 1%;
- Enxofre (S) – 0 a 1%;
- Amônia (NH₃) – 0.1 a 1%;
- Hidrogênio (H) – 0 a 0.2%;
- Monóxido de Carbono (CO)– 0 a 0.2%;
- Gases em menor concentração – 0 a 0.6%

Segundo Leme (2010), com base no nível de tratamento e no processamento do biogás no aterro, o mesmo pode ser classificado nas seguintes categorias:

- Combustível de baixo teor: o gás sofre pouco tratamento, ou seja, em seu percurso passa por uma ou mais câmaras de remoção de condensado e potes de decantação de líquidos para reduzir a quantidade de umidade no biogás.
- Combustível de médio teor: o gás passa por tratamentos químicos de purificação para a retirada de mais umidade e de compostos gasosos indesejáveis como compostos de enxofre e compostos orgânicos voláteis.
- Combustível de alto teor: processo mais complexo onde ocorre compressão do gás para retirada da umidade do gás e para a separação do dióxido de carbono e outros importantes gases constituintes do biogás. Apresenta poucas impurezas (compostos de enxofre, sulfatos de hidrogênio orgânicos voláteis).

O combustível de baixo e médio teor proveniente do biogás de aterro com pouco ou quase sem tratamento tem um valor energético de aproximadamente 16,8MJ/m³, praticamente metade do valor energético do gás natural. O biogás que tenha sido processado e tratado para produzir combustível de alto teor possui um conteúdo energético maior, em torno de 37.3MJ/m³ (LEME, 2010).

O volume de biogás gerado em um aterro sanitário não é constante ao longo dos meses e dos anos, isto por que as células do aterro vão sendo preenchidas gradualmente durante anos de operação. O biogás total produzido em um aterro sanitário, em um determinado tempo, é a soma das capacidades individuais de cada célula que foram preenchidas em diferentes

períodos no aterro. Este fato tem como consequência um aumento na produção do gás até o último ano em que foram depositados os resíduos no aterro (LEME, 2010).

3.6.2 Fatores que influenciam na produção do biogás

Segundo (BORBA, 2006 e FIGUEIREDO, 2007), os fatores que influenciam na produção do biogás são:

Composição do resíduo: Logo que chega ao aterro, este afeta a produção de gases de forma qualitativa e quantitativa, pois quanto maior o percentual de material biodegradável, maior será a quantidade de substrato para os micro-organismos responsáveis pela biodegradação do resíduo. O restante são materiais inertes tais como concreto, cinzas, solos, materiais que não se decompõem.

A umidade: esta pode ser a inicial que já vem com o resíduo, ou da pluviosidade do local e até mesmo da reposição pelo esguicho do chorume após tratamento.

O tamanho das partículas: quanto menor o tamanho das partículas maior a velocidade de degradação, daí a utilização de trituradores.

A temperatura: a mesma atua na cinética das reações bioquímicas responsáveis pela conversão de resíduos em gases. Têm-se dois aspectos a considerar, a temperatura dentro da massa de resíduos e a externa. A faixa ótima para geração de metano é de 30 a 40°C, sendo que temperaturas abaixo dos 15°C acarretam severas limitações nas atividades metanogênicas.

O pH: as bactérias metanogênicas são mais sensíveis à variação do pH, sendo a faixa de 6,5 a 7,6 ótimas para a digestão anaeróbia. Para valores abaixo de 6 e acima de 8 a produção de metano é severamente limitada.

A idade do lixo: como a geração de gás se dá em cinco fases, sendo que a geração do metano se dá na terceira fase e se intensificando na quarta que é a metanogênica, os resíduos novos possuem maior potencial de geração de metano do que resíduos antigos.

O projeto do Aterro: deve contemplar a impermeabilização de fundo para impedir a infiltração do chorume no solo evitando a contaminação do lençol freático.

A drenagem do chorume: ocorre para evitar o excesso de umidade na massa do lixo, que reduz a degradação da matéria orgânica e conseqüentemente a geração de biogás.

A cobertura adequada: impede a lixiviação diminuindo a produção de chorume e o aumento da entrada de oxigênio reduzindo a fase aeróbia e acelerando o processo anaeróbio, onde começa a produção de metano.

A operação: a perfeita compactação reduz a entrada de oxigênio (O_2) e diminui a passagem dos líquidos e gases. A recirculação do chorume pode recuperar a umidade dos resíduos nos períodos mais secos da estação, diminuindo as concentrações de DBO^3 e DQO^4 , proporcionando o desenvolvimento rápido da população de bactérias anaeróbias, produtoras de metano (BORBA, 2006).

Resumo do Capítulo 3

Neste capítulo abordaram-se os conceitos de Lixo e RSU, tipos e formas de disposição, seu aproveitamento para a geração de biomassa, em que neste trabalho dará origem ao biogás em aterros sanitários, sua composição e fatores que influenciam em sua produção.

³ DBO: Sigla para Demanda Biológica (ou Bioquímica) de Oxigênio. É a medida que calcula a quantidade do oxigênio dissolvido num corpo d'água, consumido pela atividade bacteriana.

⁴ DQO: Sigla para *Demanda Química de Oxigênio*. Índice que dá a quantidade necessária de Oxigênio, fornecido por um agente oxidante, para oxidar totalmente a matéria orgânica presente num meio

4 USO DO BIOGÁS DE RSU COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA ELÉTRICA

A utilização do biogás é a forma energética mais simples dos RSU, bem como a mais utilizada mundialmente. Apesar de ser vantajosa e agregar valor ao GDL, a transformação do deste em energia elétrica, de forma isolada (sem cogeração), apresenta uma eficiência de 20 a 50% (HENRIQUES, 2004).

A geração de energia elétrica a partir dos RSU não pode ser encarada como a solução global para os problemas energéticos, mas sim uma opção tecnológica de geração de energia e de destinação de RSU para determinados nichos de mercado, principalmente no âmbito da geração distribuída de energia elétrica, em função da atual tendência de procura por meios de geração de menor porte, com menores impactos ambientais e por elevada eficiência, qualidade e confiabilidade (FURTADO e SERRA, 2009).

Na prática, o biogás produzido em aterro não é aproveitado em sua totalidade. Parte é emitida diretamente para a atmosfera, como gás fugitivo; outra parte é transportada lateralmente, concentrando-se na periferia do aterro e uma terceira parte ainda sofre oxidação pela ação de bactérias aeróbias existentes nas porções mais superficiais do maciço.

Os lixões e aterros existentes já estão, em sua maioria, saturados. Apesar disso, quase nada dos resíduos brasileiros é transformado em energia, ao contrário dos países ricos que processam 130 milhões de toneladas de lixo, gerando energia elétrica e térmica.

Somente na União Européia são gerados em torno de 8.800MW de 50,2 milhões de toneladas (Ton.) por ano em 301 usinas, dados esses retirados da *Waste to Energy International exhibition & Conference from Waste and Biomass*, conferência internacional sobre novidades e tecnologias ligadas à geração de energia a partir do lixo, realizado em maio de 2007 na Alemanha (BIODIESEL BR, 2008).

No Brasil, em novembro de 2008 existiam em operação apenas duas usinas termelétricas movidas a biogás proveniente de aterros, conectadas a sistemas de distribuição de energia elétrica. Ambos os sistemas fazem uso de motores de combustão interna, que possuem elevadas taxas de emissão de gases poluentes. A primeira delas, inaugurada em 2003, no aterro sanitário Bandeirantes, na cidade de São Paulo, com capacidade instalada de 20MW. O outro no interior do aterro sanitário da cidade de São Paulo, denominado de usina

São João, com capacidade instalada é de 24,6MW, distribuídos em 16 grupos de motores geradores do tipo OTTO com 1,54MW cada.

4.1 Sistemas para extração e tratamento do biogás de aterro

Segundo o ICLEI (2009), o sistema de extração do biogás de aterro é composto basicamente por drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros para a remoção de material particulado e tanques separadores de condensado. Estes dois fazem parte de um pré-tratamento do biogás para a remoção de particulados e líquidos com a finalidade de proteger os sopradores e aumentar a vida útil dos mesmos.

Os drenos existentes na grande maioria dos aterros sanitários brasileiros e que apresentam boa vazão de biogás poderão ser adaptados e integrados ao sistema de captação. A adaptação consiste na impermeabilização da parte superior dos drenos, instalação de um cabeçote e interligação ao sistema de coleta.

As tubulações provenientes dos drenos são interligadas a pontos de regularização de fluxo e estes são interligados a uma linha principal, que conduz o biogás para os sistemas de queima em *flare* e/ou reaproveitamento energético. A força motriz utilizada para a extração do biogás é a própria pressão negativa gerada por um soprador, na qual a linha principal está interligada.

Na linha de entrada do sistema, a vazão de biogás pode ser controlada diretamente por uma válvula borboleta ou indiretamente por um inversor de frequência acoplado ao motor do soprador, o qual é acionado através de um transmissor de pressão, instalado na linha de sucção. Assim, o inversor de frequência regula o ponto de operação do motor do soprador em função da pressão, mantendo a vazão do processo constante. Nesta mesma linha, no interior da tubulação, normalmente, é instalado um termômetro com a finalidade de indicar a temperatura do gás (ICLEI, 2009).

A primeira etapa de tratamento do biogás extraído ocorrerá pela passagem do mesmo através de um filtro, para a remoção de material particulado eventualmente arrastado juntamente com o gás. A montante e a jusante deste filtro são instalados medidores de pressão que possibilitam o monitoramento do aumento da perda de carga e permitem identificar o momento da troca do elemento filtrante. Após passagem pelo filtro, o biogás é encaminhado a um tanque separador de líquidos, denominado desumidificador. O biogás isento de partículas

sólidas e de gotículas, passa pelo soprador e é encaminhado para a queima controlada no *flare* e/ou para outros sistemas de aproveitamento energético.

A Figura 9 mostra um desenho ilustrativo de um sistema de captação de biogás em aterro.

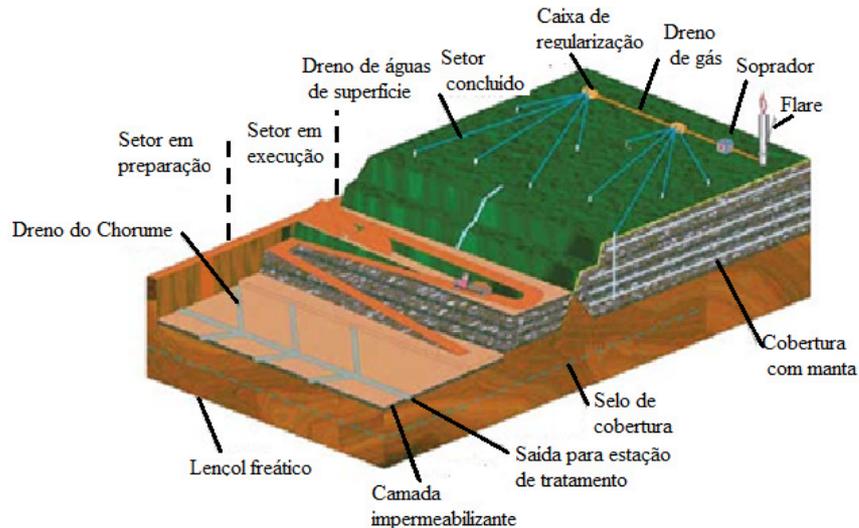


Figura 9 – Estrutura de captação de biogás em um aterro. Fonte: ICLEI, 2009

Um item muito importante a ser cuidado nos projetos de aterros é a taxa de recuperação do biogás pelo sistema de drenagem. Este valor geralmente é da ordem de 75% a 90% em aterros planejados e com o emprego de modernas tecnologias. Nos aterros sem planejamento o valor cai para até menos de 50% (LEME, 2010).

De Almeida et al.(2008) cita que o biogás com um teor de metano entre 50 e 80% apresentará um poder calorífico de 5.000 a 7.000Kcal/m³ (5 a 7 kWh/m³), decorrente da maior ou menor pureza (maior ou menor quantidade de metano) e que o biogás altamente purificado pode alcançar até 12.000Kcal/m³. Estes dados permitem-nos fazer comparações de que: 1m³ de biogás representa em média 0,61L de gasolina; 0,58L de querosene; 0,55L de óleo diesel; 0,45L de GLP; 0,79L de álcool hidratado; 1,54kg de lenha; 20Kg de lixo e 1,43kWh de energia elétrica.

Leme (2010) cita que: num aterro com recuperação do biogás na ordem de 75% a 90%, sendo o combustível de baixo a médio teor, o valor do poder calorífico é de 16,8MJ/m³. Para um gás com alto teor, o valor passa a 37,7MJ/m³. Sabendo que 1kWh corresponde a

$3,6 \times 10^6 \text{J}$ e que 1m^3 de biogás apresenta poder calorífico igual a 16,8MJ (Leme, 2010), conclui-se que 1m^3 de biogás produz 4,66kWh.

4.2 Tecnologias para geração de energia elétrica em aterros

As principais tecnologias envolvidas para geração de energia elétrica através da recuperação de metano são: grupo motor gerador com a máquina térmica de combustão interna alternativa (Ciclo Otto), adaptada para biogás; turbinas a vapor (Ciclo Rankine); turbinas a gás (Ciclo Brayton), motores de combustão externa denominados de Stirling e finalmente as células a combustível.

Neste estudo, em função da existência de diversos trabalhos divulgados por pesquisadores de diferentes instituições nacionais como OLIVEIRA (2004), FIGUEIREDO (2007), PECORA (2008), DE SOUZA (2004), se dará ênfase para a utilização como propulsor do gerador, o motor ciclo Otto, cuja máquina primária é de combustão interna e adaptada para o biogás coletado no aterro. As demais tecnologias serão citadas apenas como ilustração.

4.2.1 Motor de combustão interna (MCI)

Popularmente chamado de motor à explosão, é uma máquina térmica, que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. O processo de conversão se dá através de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura de gases. São considerados motores de combustão interna aqueles que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são estes gases que realizam os processos de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e finalmente exaustão.

O MCI realiza trabalho queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. O trabalho mecânico é gerado com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim. É um mecanismo amplamente utilizado, por ser um processo prático e apresenta grande durabilidade (FIGUEIREDO, 2007).

Os MCI, acoplados a geradores, necessitam uma vazão superior a 150 m³/h ano de CH₄ para gerar uma potência de 5.000kW e em torno de 5.000m³/h para a geração de 12 MW (LEME, 2010).

A principal desvantagem deste sistema é representada pelas altas quantidades de emissões de monóxido de carbono (CO⁵) e de óxidos de nitrogênio (NO_x⁶) que são liberados ao meio ambiente.

Nestes motores o processo ocorre dentro de arranjos cilindro-êmbolo, com movimentos alternativos. Existem dois tipos de MCI: o motor com ignição por centelha e por elevação de temperatura. O motor com ignição por centelha foi desenvolvido em 1876 pelo Engenheiro alemão chamado Nikolaus August Otto o qual originou e denominou de Ciclo Otto, no qual o combustível juntamente com o ar é incendiado por uma faísca. O motor com ignição por elevação de temperatura ocorre com a elevação da temperatura e da pressão até que o combustível injetado incendeie espontaneamente (compressão). Desenvolvido em 1892, por outro Engenheiro alemão, chamado Rudolph Diesel, o qual denominou o motor de Ciclo Diesel (FIGUEIREDO, 2007).

Os motores ciclo Otto são relativamente mais leves e de menor custo, por isso, são utilizados em automóveis e são mais vantajosos quando utilizados em aplicações com potência até 225kW ou 300hp. Já o motor Diesel é utilizado em operações de grande potência e economia de combustível como, por exemplo, ônibus e caminhões (PIEROBON, 2007).

4.2.1.1 Motor Ciclo Otto

Conforme citado anteriormente, são máquinas térmicas de combustão interna e alternativas, isto é, possuem válvulas que abrem ou fecham, alterando as condições ao longo do ciclo. A combustão ocorre dentro da câmara formada pelo conjunto cilindro-pistão. O pistão desloca-se dentro do cilindro, variando o volume interno da câmara, desde o ponto morto inferior, quando o volume interno da câmara atinge seu valor máximo – até o ponto morto superior, quando o volume interno da câmara atinge seu valor mínimo. Cada cilindro é

⁵ CO é um gás altamente venenoso para as pessoas e animais, pois se une totalmente com o ar e é difícil de se detectar. É incolor, inodoro e insípido, não irrita os olhos, nem o nariz.

⁶ NO_x é um gás nocivo à saúde, causa irritação nos olhos e no sistema respiratório, sendo ainda parcialmente responsável pelas chuvas ácidas e formação do smog (processo fotoquímico de oxidação da atmosfera), juntamente com material particulado, ozônio e hidrocarbonetos.

dotado de uma válvula de admissão, por onde entra a mistura ar-combustível e uma válvula de exaustão (ou escape), por onde saem os gases resultantes da queima. Uma das principais características que diferenciam o motor Otto de outros, é a aspiração de uma mistura ar-combustível. Para iniciar a queima dentro da câmara, deve ser produzida uma centelha elétrica (faísca), através de um ignitor (vela).

O ciclo Otto consiste detalhadamente em quatro etapas:

1 - Aspiração: abre-se a válvula de admissão, aspirando a mistura ar combustível (isobárica); ao chegar ao ponto morto inferior, fecha-se a válvula de admissão; toda a mistura combustível encontra-se dentro da câmara, a baixa pressão;

2 - Compressão: o pistão sobe até o ponto morto superior, pressurizando a mistura ar-combustível (adiabática);

3 - Expansão: a vela solta a faísca, explodindo a mistura; a pressão na câmara sobe bruscamente (isométrica); impulsionado pela pressão, o pistão desce até o ponto morto inferior, expandindo os gases queimados (adiabática);

4 - Exaustão: abre-se a válvula de escape, e a pressão na câmara cai bruscamente (isométrica); o pistão sobe, expulsando os gases queimados; ao chegar no ponto morto superior, a válvula de escape fecha, e inicia-se um novo ciclo. O movimento linear do pistão é convertido em movimento rotacional, através do dispositivo conhecido como “virabrequim”.

O controle de rotação é obtido através da injeção de combustível. Enriquecendo-se a mistura (mais combustível), aumenta-se a rotação, e vice-versa.

Na Figura 10 estão demonstrados os quatro tempos do motor Ciclo Otto, citados acima.

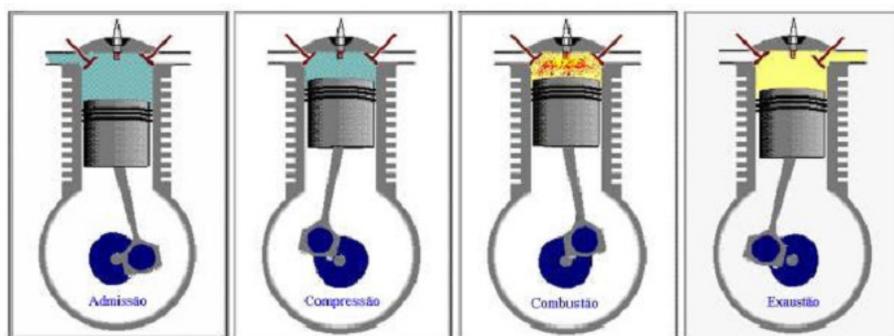


Figura 10 – Os quatro tempos do motor Otto. Fonte: Figueiredo, 2007.

Desempenho de um motor Ciclo Otto utilizando biogás como combustível:

A oferta de motores a gás para geração de energia elétrica no Brasil é composta exclusivamente por motores produzidos no exterior. A importação desses equipamentos, que são fabricados em baixa escala, e demandam um maior aporte de tecnologia em relação aos motores diesel, representa um custo muito elevado (ARAPONGAS, 2009).

A alternativa para este problema envolve a transformação de motores originalmente a diesel, para uso exclusivo de gás natural ou biogás. Para isso, são utilizados motores de médio porte de fabricação nacional, que são amplamente difundidos no país, e possuem boa oferta de peças de reposição para servirem de base para a chamada “ottolização”, de modo a tornar o equipamento totalmente livre do uso de óleo diesel (ARAPONGAS, 2009).

Segundo (DE SOUZA et al, 2004), os motores a gás, conforme a ilustração da Figura 11, funcionam segundo os princípios dos motores diesel e gasolina. Para tanto, algumas modificações para a conversão ocorrem nos sistemas de alimentação, de ignição e também na taxa de compressão. Os motores a gás, de ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor com combustível de petróleo, pelo fato da adição de gás reduzir o volume de ar aspirado. Contudo, a menor eficiência volumétrica é, geralmente, compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas.



Figura 11 – Foto ilustrativa do grupo motor gerador de 150 kW. Fonte: www.arapongas.org/servicos/motor.htm.

4.2.1.2 Turbinas a gás

As turbinas a gás, de um modo geral, pertencem ao grupo de motores de combustão cuja faixa de operação se estende desde pequenas potências (100 KW) até 180 MW (350 MW), desta forma elas concorrem com os motores alternativos de combustão interna (Diesel e Otto).

Suas principais vantagens são o pequeno peso e volume, tudo isto aliado à versatilidade de operação. Sendo compostas de máquinas rotativas, as turbinas a gás apresentam uma vantagem bastante grande quando comparadas aos motores alternativos: ausência de movimentos alternativos e de atrito entre superfícies sólidas (pistão/camisa do cilindro), ou seja, a quase inexistência de problemas de balanceamento e, ao mesmo tempo, um baixo consumo de óleo lubrificante (uma vez que o mesmo não entra em contato direto com partes quentes, e nem com os produtos de combustão). Disso decorre outra vantagem: a elevada confiabilidade. Além disso, quando comparadas às instalações a vapor, as turbinas a gás praticamente não necessitam de fluido refrigerante o que facilita muito sua instalação. Outro aspecto bastante favorável das turbinas a gás é a baixa inércia térmica que lhes permite atingir sua carga plena em um espaço de tempo bastante reduzido. No caso de estar pré-aquecida, por exemplo, o tempo entre carga nula e carga plena varia de 2 a 10s. Este aspecto faz com que as turbinas a gás sejam particularmente indicadas para sistema de geração de energia elétrica, onde o processo de partida e necessidade da plena carga no menor tempo possível é de suma importância.

Seu campo de aplicação é o mais variado possível e o mais amplo dentre os diversos tipos de motores. Inicialmente elas foram desenvolvidas objetivando fornecimento de trabalho mecânico. Entretanto, o desenvolvimento efetivo só ocorreu em virtude de sua aplicação na aeronáutica como elemento propulsor (reator) e também na geração de eletricidade.

Como desvantagens das turbinas a gás têm-se o baixo rendimento e a alta rotação, fatores bastante desfavoráveis no caso de aplicação industrial (JÚNIOR, 2010).

As turbinas a gás podem ser classificadas, de acordo com o ciclo de operação, em ciclo fechado (Brayton) e ciclo aberto (Rankine), sendo o último, o mais comum. No modo aberto o fluido de trabalho é comprimido (no compressor) elevando-se a pressão. Este processo não tem nenhum calor adicionado, visto que o compressor, em condições ideais, opera em regime adiabático, fazendo com que o trabalho de compressão aumente a temperatura do ar. Este então entra na câmara de combustão e, em contato com o combustível,

reage, iniciando o processo de queima. Os gases resultantes da combustão, à elevada temperatura, expandem-se na turbina gerando energia mecânica, além de acionar o compressor. O trabalho útil produzido é calculado pela diferença entre o trabalho da turbina e o consumido pelo compressor. No ciclo fechado, os gases que deixam a turbina passam por um trocador de calor onde sofrem resfriamento para entrar novamente no compressor (FIGUEIREDO, 2007).

Em se tratando do biogás de aterro, a turbina a gás faz uso do processo de gaseificação de biomassa através da queima dos materiais combustíveis, ricos em carbono, junto com oxigênio e vapor da água, para produzir gás de síntese. Essa mistura combustível de gases, depois de limpa e resfriada, alimenta a câmara de combustão de turbina a gás, acoplada a um gerador de energia elétrica.

4.2.1.3 Turbina a vapor (Ciclo Rankine)

São máquinas de combustão externa, ou seja, os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho (vapor de água sob pressão e a alta temperatura) que escoam no interior da máquina os quais realizam os processos de conversão da energia do combustível em potência de transmissão no eixo (DE BONA, 2004).

Nas turbinas a vapor, o calor necessário para a ebulição do condensado e para o superaquecimento posterior deve ser transferido dos produtos de combustão ao fluido de trabalho através de serpentinas existentes no interior da caldeira (DE BONA, 2004).

A faixa de potência destas turbinas varia desde poucos kW até em torno de 1GW.

Os principais sistemas que compõem este ciclo são:

- caldeiras geradoras de vapor;
- turbinas a vapor de simples ou múltiplos estágios;
- condensadores de linha e de resfriamento principal;
- geradores de eletricidade.

Devido às características operacionais, a instalação de um sistema baseado no ciclo Rankine está projetada para funcionamento contínuo, sem paradas para manutenções preventivas, como acontece no Ciclo OTTO, tendo sua vida útil calculada como triplo de

outros processos. Sua produção é nacional, com os fabricantes localizados próximos ao centro de demanda de serviços e reposição, assim como permitem operacionalidade nos estudos de expansões e outros.

4.2.1.4 Microturbinas a gás

As microturbinas possuem o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de circuito aberto, apresentando possibilidade de geração de eletricidade em pequena escala. São compactas, apresentam alta confiabilidade, simplicidade de projeto, são de fácil instalação e manuseio. Foram, inicialmente, construídas para aplicações em transporte como motores de ônibus e turbinas de aviões e, posteriormente, aplicadas em sistemas de geração de energia elétrica e cogeração (FIGUEIREDO, 2007).

Conforme Costa (2006), estas microturbinas são derivadas da tecnologia utilizada para fornecer energia elétrica para os sistemas centrais dos aviões, quando estes estão no solo com as turbinas principais desativadas.

São pequenas turbinas de aproximadamente 2m de altura por 70cm de diâmetro com potência de 30kW, operando em ciclo Brayton, ou seja, utilizando o mesmo princípio de funcionamento das turbinas de grande porte (COSTA, 2006).

Funcionam com a entrada do ar atmosférico no compressor, onde a pressão é elevada e este ar comprimido dirige-se para a câmara de combustão, onde o biogás é injetado e se mistura com o ar. Esta mistura é então inflamada por meio de queimadores. Os gases aquecidos e em alta pressão são então expandidos através das pás da turbina, as quais giram em alta velocidade. Construtivamente, a turbina de expansão é montada no mesmo eixo do compressor e do gerador de energia elétrica (COSTA, 2006).

O princípio de funcionamento da microturbina baseia-se no fato de que parte da energia gerada pela turbina é utilizada para mover o compressor, já que ambos estão conectados ao mesmo eixo girante. O compressor pressiona o ar para dentro da câmara de combustão na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta um processo de combustão contínua. O gás quente e pressurizado proveniente do combustor se expande na turbina, transformando energia térmica em energia mecânica. No mesmo eixo da turbina, como se vê na Figura 12 é conectado um gerador síncrono de ímã permanente (poderia ser de corrente contínua ou de indução), que gera energia com tensão em alta frequência (até 1.600Hz, que corresponde a uma velocidade angular de 96.000 rpm para um

gerador de 2 pólos). A tensão terminal compatível com a rede elétrica e com os equipamentos elétricos convencionais (60Hz) é obtida mediante o uso de um conversor CA/CC (retificador), um elo de corrente contínua e um conversor CC/CA (inversor) ligados em cascata nos terminais do gerador elétrico (DE BONA, 2004).

O diagrama esquemático da Figura 12 mostra o funcionamento de uma microturbina bem como seus principais componentes enquanto que a Figura 13 apresenta a visualização em corte da mesma.

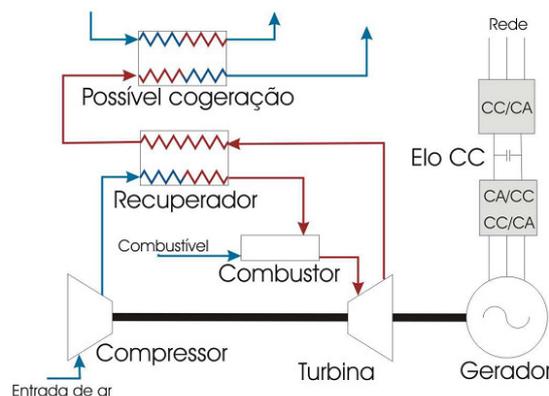


Figura 12 – Diagrama de funcionamento da microturbina Capstone. Fonte: De Bona,2004.

Conforme (DE BONA, 2004), a microturbina não dispõe de uma grande reserva de energia na forma de energia cinética como os grandes geradores do sistema elétrico. Essa característica, aliada com sua resposta relativamente lenta, faz necessário que haja alguma forma de armazenamento de energia para atender uma abrupta alteração da carga quando operando sem conexão com a rede. Para isso, normalmente são utilizadas baterias chumbo-ácido ligadas ao elo de corrente contínua. Outras formas de armazenamento de energia como supercapacitores também são aceitos.

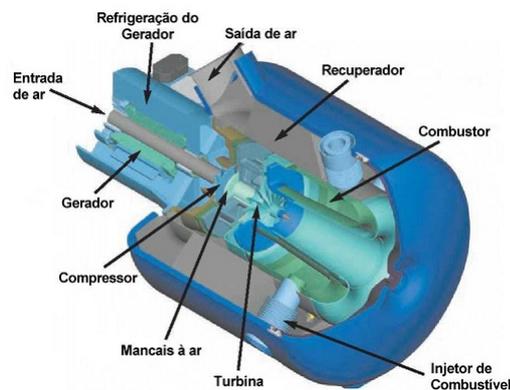


Figura 13 – Representação em corte de uma microturbina Capstone. Fonte: De Bona, 2004.

Em sistemas estacionários, o gás depois da expansão na turbina contém grande quantidade de energia térmica. Esta energia pode ser utilizada em trocadores de calor para produzir frio ou vapor consolidando a cogeração.

Com relação à faixa de potência de operação, denominam-se microturbinas as turbinas com capacidade entre 30kW e 500kW, embora comercialmente ainda não sejam encontradas microturbinas superiores a 400kW (BARIN, 2009).

A maior instalação de microturbinas no mundo fica localizada em Los Angeles, no aterro de Lopez Canyon, e o gás proveniente da decomposição dos RSU é tratado e utilizado para alimentar 50 unidades de microturbinas da marca Capstone com potência de 30kW cada, que operam em paralelo (De BONA, 2004).

No Brasil, na estação de tratamento de esgoto da cidade de Barueri, região da Grande São Paulo (Energ Biog) possui um dos poucos processos utilizando microturbinas Capstone com potência de 30kW para geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto.

Dentre as principais características das microturbinas, pode-se citar:

- pequeno porte alocadas facilmente, externa ou internamente;
- faixa de Potência: 30 e 400 kW;
- flexibilidade com a utilização de diferentes combustíveis: uso de gases como propano, gás natural, biogás; ou combustíveis líquidos como querosene e diesel;
- baixa emissão de gases poluentes como óxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e monóxido de carbono (CO);
- maior confiabilidade para o sistema, proporcionando um fornecimento contínuo de energia elétrica mesmo durante quedas na rede;

- facilidade na implementação da Cogeração, a partir de tecnologias como CHP (*Combined Heating e Power*) e CCHP (*Combined Cooling Heat e Power*);
- alta frequência de saída: 1600 Hz (alta rotação, 100.000 rpm);
- manutenção simples em intervalos relativamente longos, seu sistema mecânico não é complexo; sendo composto apenas por uma coluna móvel, sem bombas ou radiadores e não necessitando de lubrificação por óleos, pois a coluna é lubrificada por um sistema de ar filtrado (*Air-Bearing*).

Existem hoje diversos fabricantes no mundo com unidades disponíveis para comercialização, entre os quais a Capstone, a Elliot e a Ingersoll-Rand nos E.U.A, a Bowman na Inglaterra e a Turbec na Suécia. A Capstone é a atual líder de vendas no mundo, tendo comercializado mais de 3.000 unidades desde 1998. Atualmente, o produto custa cerca de US\$ 1,1 mil por kW nominal (valor fornecido pelo representante da Capstone no Brasil), sendo somente competitivo em instalações com cogeração. É importante ressaltar que não há fabricantes de microturbinas no Brasil e havia em torno de 13 unidades operando no país (DE BONA, 2004).

A grande vantagem da utilização deste tipo de tecnologia está diretamente vinculado ao ganho ambiental, quando comparada com a tecnologia de grupos geradores ciclo Otto, responsáveis por uma taxa de emissão de NOx bem maior (COELHO et al., 2006).

No entanto quando a análise financeira da tecnologia é considerada, o resultado é extremamente desfavorável para a microturbina. Além do custo do equipamento em si, a microturbina exige que o gás combustível apresente propriedades mais controladas que os motores convencionais, acarretando o uso de sistemas de purificação do gás, o que não se faz necessário para o grupo-gerador, pois, além de suportar o uso de um biogás “in-natura” dispensa a necessidade de compressão uma vez que o seu princípio de funcionamento se dá por aspiração.

Na Figura 14 está apresentado um conjunto de microturbinas da marca Capstone.



Figura 14– Microturbinas Capstone.

Fonte: Figueiredo, 2007.

4.2.2 Motor Stirling

O motor Stirling foi inventado em 1816, pelo pastor de igreja, o escocês Robert Stirling. Tal invenção ocorreu nesta época devido à procura de um motor mais seguro, pois nesta época ocorreram sucessivos acidentes com explosão em caldeiras de motores a vapor.

O motor Stirling possui, basicamente, dois lados devido ao estado do gás ou fluido de trabalho durante o ciclo termodinâmico na sua expansão e compressão, absorvendo e liberando calor. O ciclo Stirling, no seu lado quente aproveita a energia térmica (calor) de outra fonte, que pode ser proveniente da queima de algum combustível ou de certas quantidades de calor rejeitadas em outros ciclos. A partir desse calor, o ciclo Stirling é capaz de produzir trabalho, que pode ser aproveitado para a geração de energia. A parte fria do motor Stirling é o congelador.

O princípio de funcionamento é simples, trata-se de um motor de combustão externa selado, que utilizava inicialmente como elemento gasoso de acionamento o ar, posteriormente substituído por gases não condensáveis como o Hélio e o Hidrogênio.

A Figura 15 apresenta a máquina em corte.

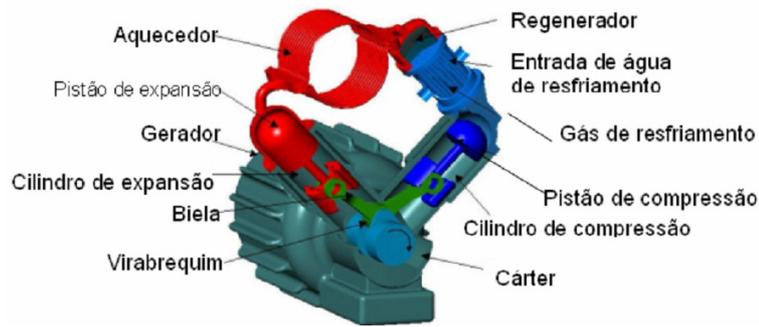


Figura 15– Motor Stirling em corte. Fonte: Lora, 2005.

No século XIX, após sua invenção, o desenvolvimento da máquina a vapor e o surgimento do motor de combustão interna levaram o motor Stirling à extinção. Após 1970, o Ministério da Energia americano procurava por um motor que possibilitasse economia substancial de combustível, com isso, o foco das atenções se concentrou no motor Stirling e na turbina a gás. O Japão, nos anos de 1970, iniciou o "Desenvolvimento da Pesquisa do Motor Stirling para Navios", por iniciativa do Ministério de Transportes. Em comparação ao motor de combustão interna, o motor Stirling apresenta as desvantagens do peso e da capacidade.

Operacionalmente, apresenta ainda defeitos vitais no acionamento e na resposta à variação da carga. Assim, é compreensível que ele não seja adequado ao atendimento da demanda maior do que a prevista nos motores para automóveis. Além do mais, as esperanças do futuro para esse mercado estão depositadas nas células a combustível, cuja comercialização já se iniciou.

Dentre as vantagens do uso do motor Stirling, podem-se citar:

- capacidade de utilização de vários combustíveis;
- funcionamento silencioso, pois, não existem válvulas e nem muitos elementos móveis ou explosões periódicas, o que causa um baixíssimo nível de ruído e vibração;
- baixo desgaste interno e consumo de lubrificante como os produtos da combustão não entram em contato direto com as partes móveis do motor (combustão externa), não há contaminação do lubrificante.

Em se tratando das desvantagens, têm-se:

- custo: o motor Stirling ainda é aproximadamente duas vezes mais caro se comparado a um motor Diesel de mesma potência. O que encarece a fabricação é a produção dos trocadores de calor ideais;
- perfeita vedação: os motores Stirling necessitam de boa vedação das câmaras que contém o gás de trabalho para evitar a contaminação do gás de trabalho pelo lubrificante.

A Figura 16 mostra a foto de um motor Stirling acoplado a um gerador síncrono.



Figura 16– Foto de um grupo motor gerador com a utilização do motor Stirling. Fonte: Lora, 2005

4.2.3 Células a combustível

Uma célula combustível é uma célula eletroquímica, podendo ser considerada como uma bateria em que os reagentes são alimentados continuamente. Os reagentes típicos são o hidrogênio e o oxigênio. O hidrogênio é fornecido do lado do ânodo e o oxigênio no lado do cátodo. As baterias comuns têm que ser recarregadas de tempos em tempos porque os reagentes esgotam-se. As células a combustível estacionárias não portáteis, pelo contrário, não necessitam ser recarregadas, uma vez que seus reagentes são fornecidos de forma contínua. Estas células possuem a vantagem de serem eficientes e pouco poluentes. Podem ser utilizadas como sistemas de emergência, em locais onde não existe rede elétrica, em aparelhos portáteis e veículos. Uma de suas principais desvantagens é o seu custo, que atualmente ainda é elevado em comparação com outras fontes alternativas de energia (BARIN, 2007).

O principal combustível utilizado pelas células a combustível é o hidrogênio.

A obtenção do H₂ é normalmente realizada através da eletrólise da água, embora possa haver uma produção através do metano, componente principal do gás natural, obtendo aproximadamente 80% de rendimento. Todavia, o método de conversão do metano liberta gases para o meio ambiente, não sendo um processo ecologicamente correto.

A eletrólise é um processo que separa os elementos químicos de um composto através do uso da eletricidade. De maneira sumária, procede-se primeiro à decomposição (ionização ou dissociação) do composto em íons. A partir disso, há a passagem de uma corrente contínua através destes íons, resultando na obtenção dos elementos químicos. Em muitos casos, dependendo da substância a ser eletrolisada e do meio em que ela ocorre, além da formação destes elementos ocorre também a formação de novos compostos. O processo da eletrólise é uma reação de oxirredução oposta àquela que ocorre numa célula eletrolítica, sendo, portanto, um fenômeno físico-químico não espontâneo.

A Figura 20 mostra uma célula de combustível.



Figura 17 – Célula de combustível. Fonte: LORA, 2005.

Neste trabalho não será dado ênfase ao estudo detalhado dos tipos de células e seus mecanismos de funcionamento, apenas serão citados os modelos de células para a geração de energia elétrica com o uso do biogás proveniente do tratamento de RSU:

- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cells*);
- MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cells*);
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*).

Após descrever os principais tipos de tecnologias para a recuperação do metano, na Tabela 5, são mostradas algumas comparações entre as características das tecnologias.

Tabela 5 – Comparação de algumas tecnologias de conversão do biogás em energia elétrica.

Tecnologia de conversão	Potência instalada	Rendimento elétrico	Emissões NO _x em PPM
Motor Ciclo Otto	30 a 20 MW	30% a 40%	250 a 3.000
Turbina a gás	500 a 150 MW	20% a 30%	35 a 50
Microturbina	30 a 100 kW	24% a 28%	< 9
Célula de combustível	500 a 5000kW	≈83%	< 50

Fonte: Dados da célula a combustível adaptado pelo autor de Franchi e Júnior (2009), Braga et al. (2009) e , as demais tecnologias retiradas de Figueiredo (2007).

Resumo do Capítulo 4

Neste capítulo foi abordado o modo de extração e tratamento do biogás do aterro sanitário, seu uso como fonte alternativa de energia, a equação utilizada para o cálculo da energia disponível em MW e as tecnologias de conversão do biogás em energia elétrica. Neste trabalho optou-se pelo uso do motor de combustão interna denominado de Ciclo Otto, adaptado para biogás, devido a sua robustez, simplicidade e baixo custo de manutenção. A demais tecnologia como turbina a gás, microturbinas a gás, motor Stirling e células a combustível foram apenas citadas como referência.

5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA E O MOMENTO PARA DESPACHO DA GD.

A metodologia utilizada neste trabalho é dividida em duas partes: A primeira estima os valores anuais de vazão do biogás do aterro sanitário através do modelo matemático empregado pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) e consequentemente a potência que pode ser gerada em virtude da recuperação energética do biogás. Nesta dissertação optou-se pela utilização da ferramenta computacional denominada de BIOGÁS® que é utilizada para a estimativa de geração, recuperação e uso energético do biogás. Escolheu-se este *software* por ser livre e utilizado pelo governo do estado de São Paulo, por meio da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, e em convênio com o Governo Federal, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia.

Os dados inseridos no *software* foram cedidos pela empresa responsável pela administração do aterro. Com estes dados o *software* gera um relatório contendo várias informações, dentre elas a curvas de vazão e do aproveitamento energético do biogás do aterro, além de outros dados menos relevantes a este trabalho.

A segunda parte deste trabalho é destinada a obtenção do *ranking* dos melhores horários para o despacho da GD ao sistema de distribuição da concessionária de energia elétrica, através do uso da lógica *fuzzy*, para definir pesos às prioridades das grandezas elétricas do alimentador (critérios quantitativos), consideradas relevantes para uma possível melhora na qualidade e na confiabilidade do sistema de distribuição em que se encontra este alimentador. Utiliza-se em conjunto com a análise anterior, a avaliação de critérios qualitativos, ponderados pela Estimativa de Especialistas, em que técnicos da concessionária (AD) avaliam e valoram estes critérios definidos e que serão utilizados neste trabalho, no caso a possibilidade de utilização e fornecimento de alguns SA's ao AL.

5.1 Metodologia usada para a estimativa da vazão de metano, responsável pela potência que pode ser gerada no aterro sanitário.

Ao inserir dados referentes ao AS na planilha do *software* BIOGÁS®, o mesmo gera valores e a curva de vazão de metano em relação ao tempo (ano) através da utilização do

modelo matemático empregado pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (USA), com algumas aproximações, para estimar a geração de metano dos nossos aterros. O modelo é dado pela equação 1.

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

Onde:

Q_x : vazão de metano no ano x pela quantia em toneladas de resíduo depositado no ano $[m^3CH_4/ano]$;

k : constante de decaimento, ou seja, constante de geração de metano a qual define a velocidade ou inclinação de decaimento de produção do gás após alcançar seu valor de pico. Depende de funções relativas a componentes misturados ao lixo, disponibilidade de nutrientes no material para a metanogênese, ph e temperatura $[1/ano]$;

R_x : fluxo de resíduos no ano x $[kg_{rsd}]$;

L_0 : potencial de geração de metano, que leva em conta os resíduos em geral e depende da quantidade de celulose presente no lixo $[m^3_{biogás}/kg_{rsd}]$;

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

x : ano atual $[ano]$;

rsd : resíduo sólido domiciliar;

Para calcular a Equação 1 necessita-se calcular a variável R_x que representa o fluxo de resíduos ao ano, conforme Equação 2.

$$R_x = Pop_x \cdot T_{rsd} \cdot T_{coleta} \quad (2)$$

Onde:

R_x : Fluxo de resíduos no ano x $[tonelada/ano]$;

Pop_x : População atendida pelo aterro no ano x $[hab]$;

T_{RSD} : Taxa de geração de resíduos $[Trsd/hab.ano]$;

T_{coleta} : Taxa de coleta de resíduo $[%]$.

Avaliando a Equação 2 observa-se a necessidade de calcular a população atendida pelo aterro ao ano (Pop_x), calculada a partir da Equação 3, fornecida pelo manual do programa.

$$Pop_x = Pop_0 \cdot (1+i)^{x-ano0} \quad (3)$$

Onde:

Pop_0 : População atendida pelo aterro no ano atual [hab];

i : taxa de crescimento populacional no período considerado [%];

x : ano atual [ano];

ano_0 : ano atual [ano].

5.2 Estimativa da potência que pode ser gerada no aterro sanitário

Segundo ICLEI (2009) e PECORA et al. (2008), pode-se determinar a potência (P) e a energia (E) disponível em função da vazão de biogás do aterro, através das equações 4 e 5.

$$P = \frac{Q \times PCI \times \eta}{860.000} \quad (4)$$

$$E = P \times \eta_{pc} \times t_o \quad (5)$$

Em que:

P é a potência disponível em MW;

Q é a vazão de metano no ano, dada em m^3CH_4 /ano;

PCI é o poder calorífico inferior do CH_4 ;

η indica o rendimento da máquina primária, no caso motor Ciclo Otto;

860.000 é o valor de conversão da unidade kcal para MW.

Em 13, E representa a energia gerada (MWh/dia), η_{pc} é o rendimento de motor operando a plena carga (estimado em 87%), t_o indica o tempo de operação do motor referente a 24h por dia.

5.3 Determinação do período de despacho da GD ao sistema de distribuição

5.3.1 Análise quantitativa e regras *fuzzy*

Neste trabalho, a metodologia utilizada faz uso de critérios quantitativos representados pelas características elétricas relevantes ao alimentador. Alguns dos critérios quantitativos

influenciados pela inserção da GD às redes de distribuição são: perdas de potência e de energia, carregamento dos cabos condutores ou limite térmico dos cabos condutores, níveis de tensão, custo da tarifa de energia, regime de trabalho da GD, etc.

A lógica *fuzzy* é uma técnica inteligente que utiliza a representação da forma humana de pensar, simulando a habilidade de tomar decisões em ambientes imprecisos, permitindo-se lidar com problemas de natureza incerta ou nebulosa (SHAW, 1995).

Neste trabalho, a lógica *fuzzy* será aplicada na análise de critérios quantitativos, levando em consideração que esses resultados podem ser quantificados e devidamente aplicados. Com relação aos conjuntos *fuzzy*, seus modelos de curva podem variar de acordo com o comportamento de cada parâmetro (SHAW, 1995).

Os critérios quantitativos escolhidos neste trabalho se deram em função de suas importâncias em relação ao sistema de distribuição, sendo que a não observância de seus patamares definidos no PRODIST (2010) pode refletir em multas elevadas à concessionária de distribuição e possíveis contingências no sistema de distribuição. Tais critérios são: níveis de tensão (ΔV), carregamento térmico dos cabos condutores (C_{tcc}) e perdas de potência (ΔW).

Para a avaliação dos critérios citados anteriormente, foram utilizadas funções de pertinência denominadas de funções trapezoidais, conforme Figura 18.

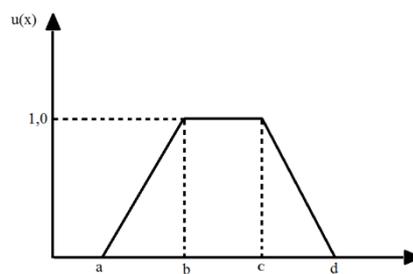


Figura 18 – Função Trapezoidal para analisar os níveis de prioridade dos critérios quantitativos.

A função mostrada na Figura 18 estabelece um conjunto de regras demonstradas na Equação 6 que apresenta as relações entre os valores dos critérios x com seus níveis de prioridade $\mu(x)$ que podem variar do algarismo 0 a 1, sendo este de maior valor.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \text{ ou } \text{se } x > d \\ 1 & \text{se } b < x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)}{(b-a)} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & \text{se } c < x \leq d \end{cases} \quad (6)$$

Para a análise dos parâmetros de C_{tcc} e ΔW utiliza-se a função de pertinência linear crescente, representada na Figura 18 pelo gráfico representado pelas letras de “a” a “c”. O critério ΔV é avaliado da mesma forma que o anterior, a diferença está na função de pertinência que é decrescente, apresentada também pela Figura 18, representada no gráfico de “b” a “d”. A relação entre os valores reais dos parâmetros x e os níveis de prioridade $\mu(x)$ provém diretamente da análise gráfica da mesma.

5.3.2 Análise qualitativa e estimativa de especialistas

Crítérios qualitativos são aqueles que apresentam imprecisão em seus valores e/ou dificuldades em sua quantificação. Como exemplo de critérios qualitativos tem-se os seguintes: serviços ancilares (SA’s), impactos ambientais, e etc. (CANHA, 2004).

Neste trabalho utilizaram-se como critérios qualitativos os SA’s que poderão ser disponibilizados pela GD à rede de distribuição de energia elétrica da concessionária em diferentes horários do dia, dependendo das condições técnicas do AL.

Os SA’s escolhidos pelos AD se enquadram na Resolução 265 da ANEEL (2003), que, mesmo não sendo praticados a nível de sistemas de distribuição, servirão como exemplo neste trabalho. Como SA’s tem-se: reserva operativa, ou seja, reposição de potência ativa ao sistema de distribuição em momentos de demanda elevada, fornecimento de reativos, ou seja, injeção de potência reativa no sistema de distribuição em momentos em que o nível de tensão está abaixo do patamar estabelecido pelo PRODIST (2010) e capacidade de restabelecimento, ou seja, envergadura para, em instantes muito rápidos de tempo, alimentar e sustentar momentaneamente o AL que está em situação de contingência.

Estes critérios, identificados e valorizados por especialistas da concessionária de energia elétrica em conjunto com técnicos responsáveis pela GD no AS, serão utilizados na

pela “estimativa de especialistas” em que o resultado apresentará valores horários para as prioridades finais deste critério.

Os passos para o desenvolvimento da estimativa de especialistas estão demonstrados no Anexo B.

A metodologia desenvolvida, utilizando os critérios quantitativos e qualitativos para a definição do *ranking* final dos horários para despacho da GD ao sistema de distribuição da concessionária, segue os passos descritos no fluxograma da Figura 19.



Figura 19 – Fluxograma representando a metodologia proposta para determinar o *ranking* horário para o despacho da GD à rede de distribuição.

6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

6.1 Introdução

A metodologia foi aplicada de forma a permitir a identificação do melhor regime operacional de uma GD a ser conectada à rede de distribuição de energia elétrica. Esta geração será proveniente do biogás produzido no aterro sanitário no município de Minas do Leão que absorve os RSU da região da Grande Porto Alegre. Este aterro sanitário recebe diariamente 2.500Ton. de RSU provenientes de 135 municípios gaúchos que representam 35% da população do Rio Grande do Sul. A área total do aterro é de 75 hectares (ha), dos quais 26 estão sendo utilizados na deposição dos resíduos, perfazendo uma quantia que atingirá 8,9 milhões de toneladas, num total de 25 milhões de Ton. até a cobertura total da área. O empreendimento tem um prazo estimado de operação de 23 anos.

A empresa responsável constitui-se num consumidor com demanda contratada de 1.450kW, classificado como subgrupo A4 (2,3kV/25kV), classe industrial e tarifa horosazonal verde.

6.2 Determinação da vazão de metano e da potência que pode ser gerada no aterro sanitário

Os dados obtidos com a empresa responsável pela administração do aterro sanitário, pelo *site* do IBGE e CETESB foram inseridos e simulados pelo BIOGÁS®, que no final de seu preenchimento gera um relatório contendo várias informações, dentre elas a curvas de vazão e do aproveitamento energético do biogás do aterro, além de outros dados menos importantes a este trabalho.

Os dados inseridos no programa são:

- Ano de abertura do aterro: 2008;
- Ano de encerramento ou fechamento das atividades: 2031;
- Taxa de crescimento populacional do estado do RS: 4,98% (IBGE, 2010);

- População atual da região do aterro: 3.742.875 habitantes (próximo a 35% da população do estado do RS);
- Taxa de geração de resíduos na região do aterro: 0,18Ton./hab.ano. Este valor foi estimado da seguinte maneira: quantidade de RSU (Ton./dia) depositados no aterro, dividido por 35% do total de habitantes do estado, percentagem de habitantes dos municípios que dispõem seus RSU no aterro.
- Taxa de coleta: 88% (valor sugerido pelo BIOGÁS®).

Após os dados citados anteriormente serem inseridos no *software*, o mesmo calcula o fluxo de resíduos R_x que resulta no valor de em 960.858Ton./ano.

O BIOGÁS® utiliza o modelo matemático empregado pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (USA), com algumas aproximações, para estimar a geração de metano dos nossos aterros. O modelo é dado pela Equação 7.

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)} \quad (7)$$

Em que:

Q_x : vazão de metano no ano x pela quantia em toneladas de resíduo depositado no ano [m^3CH_4 /ano];

k : constante de decaimento, ou seja, constante de geração de metano a qual define a velocidade ou inclinação de decaimento de produção do gás após alcançar seu valor de pico. Depende de funções relativas a componentes misturados ao lixo, disponibilidade de nutrientes no material para a metanogênese, pH e temperatura [1 /ano];

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

L_0 : potencial de geração de metano, que leva em conta os resíduos em geral e depende da quantidade de celulose presente no lixo [$m^3_{biogás}/kg_{rsd}$];

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

x : ano atual [ano];

rsd : resíduo sólido domiciliar;

As variáveis k e L_0 são retiradas da Tabela 20.

Tabela 6– Valores das variáveis em função do índice de pluviometria

Pluviometria anual	> 635mm	< 635mm
k	0,04	0,02
L_0	100 m ³ /t	100m ³ /t

Fonte: USEPA AP,42,1998

Considerando a pluviometria do Rio Grande do Sul, são adotados os valores de 0,04 para K e de 0,1m³/kg para L₀.

Demais dados a serem especificados:

- Linha de base de queima, que significa o número de drenos e quantos deles queima regularmente o metano. Valor utilizado: 20%;
- Energia elétrica evitada em Ton.CO₂/MWh, que considera-se a emissão de gases de efeito estufa evitada através da economia de energia elétrica gerada por fontes não renováveis. Valor estipulado: 0,2782;
- Recuperação do Biogás ou eficiência da coleta: 75%;
- Eficiência de queima do biogás: 95%;

Com a inserção dos dados, descritos anteriormente, no BIOGÁS®, o programa gera duas tabelas com dados do AS. A primeira - Tabela 7, contém informações para a estimativa dos valores de vazão de metano no aterro.

Analisando a Tabela 7 verifica-se que a estimativa da vazão de metano para o ano de 2011 foi de 8.462.000m³h de CH₄ e para o ano de 2012 será de 10.655.000m³h. Com estes valores de produção de metano, estima-se que o combustível disponível no aterro seja capaz de alimentar grupos motores geradores para a geração de energia elétrica.

Outra avaliação é o tempo de produção do metano, que atinge o ápice no ano de 2031, quando começa a decair, até não mais produzir.

Tabela 7– Dados apresentados pelo *software* para o AS em análise, dentre eles a estimativa da vazão de metano.

Ano	Vazão 10 ³ m ³ h/ano	Coleta 10 ³ m ³ /ano	População	Lixo gerado kg	Lixo coletado kg	Lixo acumulado kg
2008	2.078	1.559	3.235.084	590.402.906	519.554.558	519.554.558
2009	4.178	3.134	3.396.192	619.804.971	545.428.375	1.064.982.932
2010	6.305	4.729	3.565.322	650.671.259	572.590.708	1.637.573.640
2011	8.462	6.347	3.742.875	683.074.688	601.105.725	2.238.679.365
2012	10.655	7.991	3.929.270	717.091.807	631.040.790	2.869.720.155
2013	12.887	9.665	4.124.948	752.802.979	662.466.621	3.532.186.777
2014	15.163	11.372	4.330.370	790.292.567	695.457.459	4.227.644.236
2015	17.489	13.117	4.546.023	829.649.137	730.091.241	4.957.735.477
2016	19.869	14.902	4.772.415	870.965.664	766.449.784	5.724.185.261
2017	22.308	16.731	5.010.081	914.339.754	804.618.984	6.528.804.245
2018	24.812	18.609	5.259.583	959.873.874	844.689.009	7.373.493.254
2019	27.387	20.540	5.521.510	1.007.675.593	886.754.522	8.260.247.776
2020	30.036	22.527	5.796.481	1.057.857.837	930.914.897	9.191.162.673
2021	32.768	24.576	6.085.146	1.110.539.158	977.274.459	10.168.437.131
2022	35.587	26.690	6.388.186	1.165.844.008	1.025.942.727	11.194.379.858
2023	38.499	28.875	6.706.318	1.223.903.039	1.077.034.675	12.271.414.533
2024	41.513	31.134	7.040.293	1.284.853.411	1.130.671.001	13.402.085.534
2025	44.633	33.475	7.390.899	1.348.839.111	1.186.978.417	14.589.063.952
2026	47.867	35.900	7.758.966	1.416.011.298	1.246.089.943	15.835.153.894
2027	51.223	38.417	8.145.363	1.486.528.661	1.308.145.222	17.143.299.116
2028	54.707	41.031	8.551.002	1.560.557.788	1.373.290.854	18.516.589.970
2029	58.329	43.747	8.976.841	1.638.273.566	1.441.680.738	19.958.270.708
2030	62.096	46.572	9.423.888	1.719.859.590	1.513.476.439	21.471.747.147
2031	66.016	49.512	9.893.198	1.805.508.597	1.588.847.566	23.060.594.712

Fonte: BIOGÁS®.

Os dados da Tabela 7 permitem ao BIOGÁS® gerar a curva de vazão de metano em função do tempo, demonstrada na Figura 20. Nesta ilustração a área entre as linhas de geração e coleta representa o valor estimado das perdas do biogás no AS.

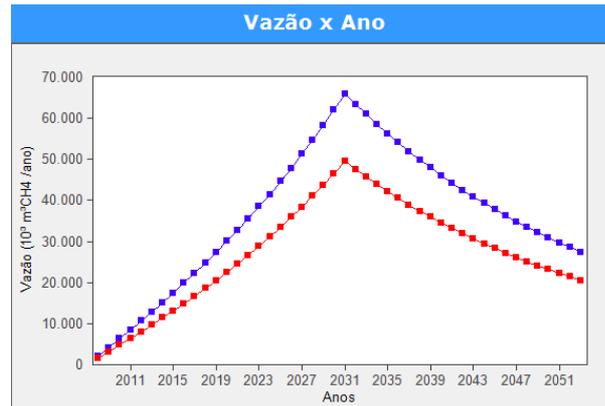


Figura 20 – Curva de geração de CH₄ (superior) e curva de coleta de CH₄ (inferior). Fonte: BIOGÁS®.

6.2.1 Estimativa da potência que pode ser gerada no aterro e o MDL

Baseado na Equação 12, o BIOGÁS® apresenta os valores estimados da potência que pode ser gerada no AS - Tabela 8.

Tabela 8- Estimativa da potência em função da vazão de metano no aterro.

Ano	Potência (kW)	Vazão (m ³ /h)	Ano	Potência (kW)	Vazão (m ³ /h)
2008	1.756	200	2032	53.596	6.118
2009	3.531	403	2033	51.494	5.878
2010	5.328	608	2034	49.475	5.648
2011	7.150	816	2035	47.535	5.426
2012	9.003	1.028	2036	45.671	5.214
2013	10.889	1.243	2037	43.880	5.009
2014	12.813	1.463	2038	42.160	4.813
2015	14.778	1.687	2039	40.507	4.624
2016	16.789	1.917	2040	38.918	4.443
2017	18.850	2.152	2041	37.392	4.269
2018	20.966	2.393	2042	35.926	4.101
2019	23.141	2.642	2043	34.518	3.940
2020	25.380	2.897	2044	33.164	3.786
2021	27.688	3.161	2045	31.864	3.637
2022	30.070	3.433	2046	30.614	3.495
2023	32.532	3.714	2047	29.414	3.358
2024	35.078	4.004	2048	28.261	3.226
2025	37.714	4.305	2049	27.152	3.100
2026	40.447	4.617	2050	26.088	2.978

Ano	Potência (kW)	Vazão (m ³ /h)	Ano	Potência (kW)	Vazão (m ³ /h)
2027	43.282	4.941	2051	25.065	2.861
2028	46.227	5.277	2052	24.082	2.749
2029	49.287	5.626	2053	23.138	2.641
2030	52.470	5.990	2054	22.231	2.538
2031	55.783	6.368			

A próxima ilustração, Figura 21, gerada pelo *software*, apresenta a curva em função dos valores da Tabela 8.

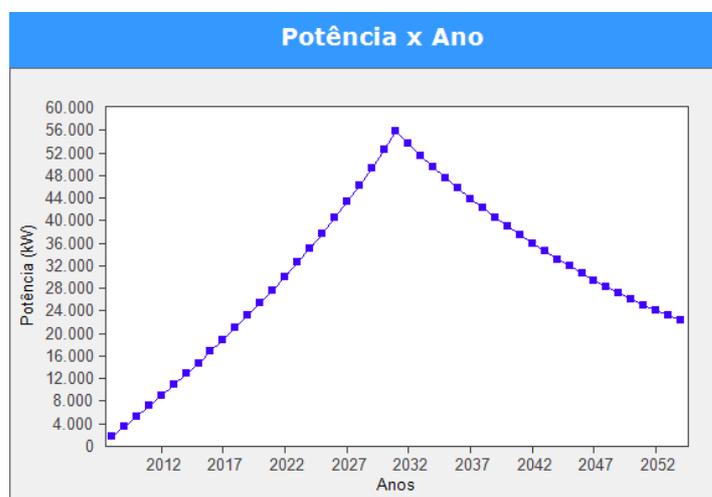


Figura 21 - Curva da estimativa de potência que pode ser gerada no AS. Fonte: BIOGÁS®.

A partir dos valores estimados, apresentados na Tabela 9 e registrados na curva da Figura 21, calcula-se a potência elétrica que realmente pode ser produzida no AS através do valor do rendimento elétrico (η) do grupo motor gerador Ciclo Otto, adaptado para biogás que se situa na faixa de 33%.

Pode-se verificar na Tabela 9 que no ano de 2010 já era possível o aterro ser autossustentável em energia elétrica, pois a potência gerada ultrapassa o valor consumido pelo aterro, que possui uma demanda contratada de 1.500kW.

Conclui-se também que o início da geração com excedente poderá ocorrer no ano de 2012, com um valor estimado de 2.971kW, sendo de 1.471kW o valor disponível para despachar para a rede de distribuição da concessionária.

Tabela 9 – Estimativa da potência elétrica convertida pelo grupo motor gerador em função do tempo (ano).

Ano	Potência (kW)	Potência $\eta = 33\%$ (kW)	Ano	Potência (kW)	Potência $\eta = 33\%$ (kW)
2008	1.756	579	2.031	55.783	18.408
2009	3.531	1.165	2.032	53.596	17.687
2010	5.328	1.758	2.033	51.494	16.993
2011	7.150	2.360	2.034	49.475	16.327
2012	9.003	2.971	2.035	47.535	15.687
2013	10.889	3.593	2.036	45.671	15.071
2014	12.813	4.228	2.037	43.880	14.480
2015	14.778	4.877	2.038	42.160	13.913
2016	16.789	5.540	2.039	40.507	13.367
2017	18.850	6.221	2.040	38.918	12.843
2018	20.966	6.919	2.041	37.392	12.339
2019	23.141	7.637	2.042	35.926	11.856
2020	25.380	8.375	2.043	34.518	11.391
2021	27.688	9.137	2.044	33.164	10.944
2022	30.070	9.923	2.045	31.864	10.515
2023	32.532	10.736	2.046	30.614	10.103
2024	35.078	11.576	2.047	29.414	9.707
2025	37.714	12.446	2.048	28.261	9.326
2026	40.447	13.348	2.049	27.152	8.960
2027	43.282	14.283	2.050	26.088	8.609
2028	46.227	15.255	2.051	25.065	8.271
2029	49.287	16.265	2.052	24.082	7.947
2030	52.470	17.315	2.053	23.138	7.636
2031	55.783	18.408	2.054	22.231	7.336

Um dado importante, estimado pelo *software*, está mostrado na Tabela 10 e relaciona o valor da potência que poderá ser gerada em função do tempo de duração do metano no aterro (vida útil).

Tabela 10– Tempo de vida útil do aterro em função da potência gerada.

Potência (kW)	Ano inicial	Ano final	Potência (kW)	Ano inicial	Ano final
550	2008	2054	6900	2018	2054
1150	2009	2054	7600	2019	2053
1750	2010	2054	8350	2020	2050
2350	2011	2054	9100	2021	2048
2850	2012	2054	9900	2022	2046
3550	2013	2054	10700	2023	2044
4200	2014	2054	11550	2024	2042
4850	2015	2054	12400	2025	2041
5500	2016	2054	13300	2026	2039
6200	2017	2054	14250	2027	2037

Fonte: Biogás®.

Pela Tabela 10 tiram-se as seguintes conclusões: mesmo sabendo que a vazão de metano é sazonal e descontínua e que o gerador não permanecerá 24 horas do dia em funcionamento, estima-se que o aterro poderá iniciar sua geração de energia elétrica, diariamente, com potência suficiente para suprir a demanda do AL03 (6,18MW), a partir do ano de 2017 (6.2MW) e finalizará sua geração em 2054, logo produzirá uma energia em torno de 53,6GWh por ano e 2,2TWh até se extinguir, aproximadamente aos 37 anos.

Baseado nos dados da Tabela 10 e utilizando a curva de potência da Figura 22, montou-se três tipos de aproveitamento de geração mostrados na Figura 22. Através de um planejamento pode-se definir qual a potência que se deseja gerar e qual sua finalidade, como exemplo, para autossustentação do aterro, comercialização com a concessionária local ou com consumidores livres, com venda de energia e de SA's.

Na Figura 22 o retângulo inferior representa a geração contínua de potência na faixa dos 3,5MW com estimativa de duração além do ano de 2053. O retângulo acima mostra que, a partir do ano de 2020, pode-se gerar em torno de 8,3MW, mas o tempo de vida útil reduz para 2047. Finalmente no retângulo superior, estaria à disposição uma geração de 14,2MW num período de 8 anos.

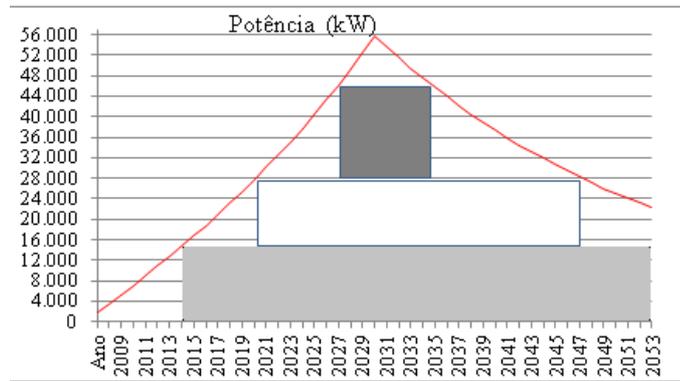


Figura 22 – Ilustração com várias opções de potências para gerar em relação à vida útil do aterro.

As considerações feitas no parágrafo anterior devem passar por uma análise que avalie principalmente os ambientes de comercialização, o custo e benefício com a compra e manutenção dos grupos motores geradores e seus quadros de comando e proteção para inserção da GD à rede de distribuição.

Em relação ao MDL, a estimativa das certificações dos créditos de carbono referentes à queima e recuperação do CH₄ neste trabalho está mostrada na Tabela 11, em que o valor do crédito de carbono estava cotado em R\$ 22,00 a Ton. de CO₂ (ICLEI, 2009).

Tabela 11 – Valores referentes aos créditos de carbono de 2014 até 2037 - período de 23 anos.

Total de CH ₄	429.833Ton.
Total de CH ₄	641.541.530 x 10 ³ m ³ hCH ₄
Total de Ton.CO ₂ eq.	9.026.489
Crédito de carbono pela queima do CH ₄	R\$ 198.582.765,00
Crédito de carbono pela geração de eletricidade	R\$ 7.398.829,15

Fonte: Biogás®.

Conforme Tabela 11 pode-se verificar que a estimativa de CO₂ sequestrados do meio ambiente no período de 23 anos é de 9.026.489. Neste mesmo período de 23 anos, o valor estimado a receber pelos créditos de carbono em relação à queima do CH₄ é de R\$ 198.582.765,00 e pela geração de energia elétrica a soma de R\$ 7.398.829,15.

A cifra total que poderá ser recebida pela administração do aterro sanitário de Recreio pelas certificações em créditos de carbono referente ao MDL, no período de 23 anos, está estimada em R\$ 205.981.594,15 - valor este que representaria para o aterro sanitário de Recreio um crédito anual estimado de R\$ 17.165.132,84.

6.3 Método de apoio à decisão, para definir o despacho da GD à rede de distribuição.

Apesar de a GD ser apontada como uma das soluções para a crescente solicitação de incremento de energia ao sistema deve-se ter muita atenção no momento de sua conexão, pois se devem observar certas restrições existentes para sua aplicação. A GD ao despachar energia para a rede de distribuição no período de carga leve irá desencadear um aumento dos níveis de tensão na rede, cujos valores poderão atingir valores que irão transgredir os limites estabelecidos pelo PRODIST (2010) – Módulo 8. No período de carga pesada os níveis de tensão se mantêm nos limites aceitáveis, reduzindo o carregamento do AI e com isso a redução das perdas de potência ao longo deste. A utilização dos SA's pela GD poderá facilitar o incremento de potência no período de ponta do AL, possibilitar a manutenção dos níveis de tensão através da inserção de reativos à rede e também ser utilizada como reserva de capacidade em caso de aumento momentâneo da carga em algum ponto do alimentador e por último poderá ser utilizada sua capacidade de restabelecimento em situação de contingência do sistema provocada por alguma falha momentânea no AL.

Com o objetivo de obterem-se resultados mais adequados, leva-se em consideração não apenas os critérios de natureza quantitativa, mas também qualitativa. A resposta obtida será, então, uma classificação ou *ranking* dos melhores períodos ou horas do dia em que é mais vantajoso o despacho da energia gerada pela GD no sistema. O conjunto de critérios a serem utilizados na definição das regras e as restrições associadas devem ser avaliadas de acordo com os interesses da concessionária de energia e da GD.

6.3.1 Critérios quantitativos

O aterro sanitário, local em que será conectada a GD, denominada doravante de GD AS, possui uma subestação com medição em média tensão conectada ao alimentador (AL03). Este alimentador apresenta tensão de trabalho de 23kV e parte da SE chamada de Areal (SE AR), de propriedade da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica - CEEE-D. Esta SE AR dista 17Km da GD AS e supre o sistema de distribuição ao qual está conectada a carga do aterro sanitário e diversos consumidores residenciais, industriais, comerciais e rurais. O AL03 com suas ramificações estão mostrados na Figura 23.

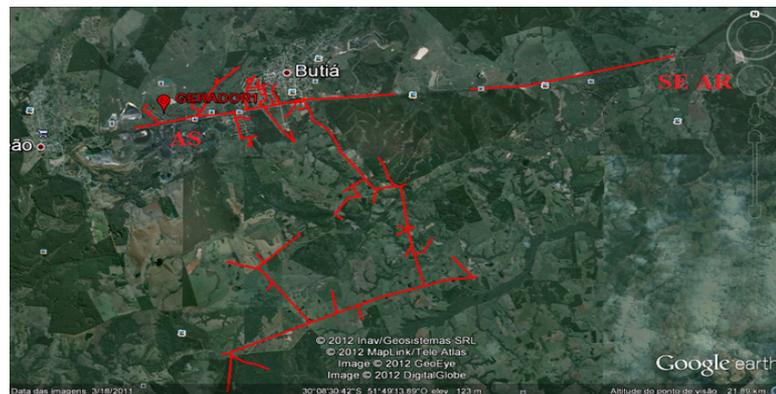


Figura 23 – Ilustração do AL03 e suas ramificações com a conexão do aterro onde se encontra a GD AS, georreferenciado pelo *software* Google Earth®. Fonte: PSL®DMS, versão Demo 1.0.1.1 da Powersyslab Engenharia e Sistemas Ltda.

Com os valores correspondentes aos dados da memória de massa do AL03, medidos na SE AR nos meses de janeiro de 2011 e junho de 2011, observou-se que os maiores valores de demandas ocorrem no mês de janeiro. Baseado neste fato utilizou-se os valores de janeiro para gerar a curva horária da demanda ativa do mês de janeiro de 2011 (média diária típica) - Figura 24, e a curva horária média de corrente por fase num dia típico deste mesmo mês, Figura 25.

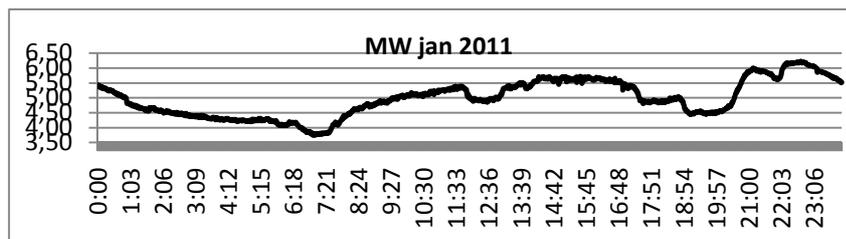


Figura 24 – Curva da demanda ativa média diária típica do mês de janeiro de 2011, gerada no *software* MicroSoft EXCEL. Fonte: Memória de massa do AL03.

Verifica-se que o alimentador apresenta uma demanda máxima de 6,2 MW e o momento de pico ocorre no horário das 22h12min às 22h50min e que as maiores demandas ocorrem das 21h às 00hmin e das 12hmin às 16h50min. Pela curva verifica-se que a demanda deste alimentador apresenta um comportamento misto, ou seja, residencial, rural e industrial.

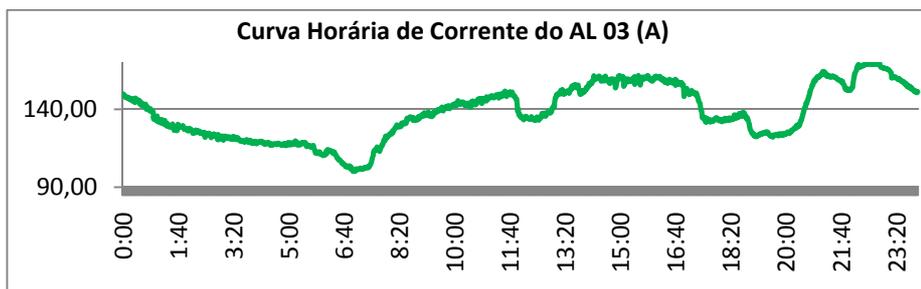


Figura 25 – Curva horária média de corrente por fase num dia típico de janeiro de 2011, gerada no MicroSoft EXCEL®. Fonte: Memória de massa do AL03.

Os critérios quantitativos definidos como parâmetros relevantes para a estabilidade e confiabilidade do sistema no AL03, conforme explanado no capítulo das metodologias e escolhidos para este trabalho, são: níveis de tensão (ΔV) medidos no ponto mais crítico do AL03, carregamento térmico dos cabos condutores (C_{cc}) e perda de potência (ΔW) medidos na saída da SE AR.

Para a análise e avaliação dos critérios quantitativos definidos, necessita-se realizar simulações no PSL®DMS a fim de se obter os parâmetros elétricos ao longo do AL03, em qualquer horário do dia. Para que este *software* realize as simulações desejadas, necessita-se informar os valores das curvas horárias de demandas ativa e reativa, provenientes das

medições das potências médias demandas por este alimentador no mês de janeiro de 2011, obtidos da memória de massa do AL03.

As simulações para análise das grandezas elétricas do AL03 foram baseadas em três diagnósticos e estão apresentadas no Apêndice A:

- 1) Alimentador suprindo toda carga do sistema de distribuição a ele conectada (6,2MW);
- 2) Alimentador sem a carga do aterro sanitário (1,32MW), ou seja, a geração distribuída supre esta carga, operando como autoprodutor de energia elétrica, sem despacho do excedente de energia (4,68MW) ao alimentador;
- 3) Alimentador com a geração distribuída suprindo a carga do aterro sanitário (1,32MW), como autoprodutor de energia elétrica, com despacho do excedente de energia (4,68MW) ao alimentador;

Em relação ao primeiro diagnóstico, observou-se que: em quatro locais do AL03 os níveis de tensão permanecem cerca de 80% do dia com níveis inadequados de tensão, segundo o Módulo 8 do PRODIST (2010); O carregamento dos cabos (limite térmico) transgride em torno de 58% do dia percentuais acima do estabelecido pelos técnicos da concessionária (acima de 50% do limite térmico do cabo), e as perdas de potência, cujos índices de transgressão foram definidos de 4 a 6%, atingiram no máximo 0,5% de perda, não transgredindo em nenhum momento o percentual mínimo definido também pelos especialistas da concessionária.

No segundo caso, os valores dos níveis de tensão transgridem apenas 16% do dia com valores de 7,6% de queda de tensão, ou seja, 0,6% além do limite imposto, conforme normatiza o Módulo 8 do PRODIST (2010). O Carregamento dos cabos condutores, assim como as perdas de potência não transgridem em nenhum momento do dia os percentuais definidos.

Com a GD AS despachando o excedente de potência ao Al03, todas as transgressões que vinham ocorrendo no AL03 deixam de existir.

Como o trabalho se propõe a definir o melhor momento para o despacho da GD na rede de distribuição da concessionária, se utilizará dos parâmetros elétricos do AL03 baseado

no primeiro diagnóstico, em que ocorrem diversas transgressões das características elétricas do AL03.

De posse dos valores horários das tensões (V) e das perdas de potência (ΔW) no local mais crítico do AL03, distante 30Km da SE AR, das correntes na barra do AL03 (saída da SE AR) - grandeza que origina o C_{cc} , montou-se a Tabela 12.

Tabela 12 – Valores característicos do AL03 sem a contribuição da GD AS.

Período (horas)	V - pior caso do AL03 (kV)	I na saída da SE AR (A)	C_{cc} dos cabos (%)	Demanda do AL03 (kW)	ΔW no AL (kW)	ΔW no AL (%)
0:00	21,19	148,70	52,73	4.200	13,44	0,32
1:00	21,37	131,30	46,56	3.570	10,11	0,28
2:00	21,43	124,90	44,29	3.387	9,12	0,27
3:00	21,49	119,50	42,38	3.201	8,25	0,26
4:00	21,52	116,80	41,42	3.123	7,89	0,25
5:00	21,52	117,90	41,81	3.213	8,28	0,26
6:00	21,64	112,70	39,96	3.225	8,01	0,25
7:00	21,77	101,80	36,10	2.880	6,48	0,23
8:00	21,42	125,30	44,43	3.516	10,08	0,29
9:00	21,22	140,20	49,72	3.942	12,81	0,32
10:00	21,14	147,00	52,13	4.170	14,04	0,34
11:00	21,01	150,60	53,40	4.272	14,85	0,35
12:00	21,27	140,60	49,86	4.035	12,75	0,32
13:00	21,16	147,80	52,41	4.266	14,55	0,34
14:00	20,99	160,60	56,95	4.656	17,43	0,37
15:00	20,88	168,00	59,57	4.809	18,96	0,39
16:00	20,91	164,80	58,44	4.695	18,18	0,39
17:00	20,98	160,30	56,84	4.587	17,25	0,38
18:00	21,28	138,50	49,11	3.933	12,33	0,31
19:00	21,41	127,70	45,28	3.588	10,26	0,29
20:00	21,48	124,70	44,22	3.534	9,66	0,27
21:00	21,10	163,20	57,87	4.848	17,40	0,36
22:00	21,20	156,10	55,35	4.611	15,57	0,34
23:00	21,02	167,90	59,54	4.890	17,91	0,37

Fonte: PSL@DMS.

Com os dados mostrados na Tabela 12, inicia-se o método para avaliação dos níveis de prioridade para cada critério quantitativo $u(x)$ com a utilização da lógica *fuzzy* em relação às funções trapezoidais, mostradas na

Figura 26, em que os valores escolhidos são definidos pelos AD e pelo Módulo 8 do PRODIST (2010).

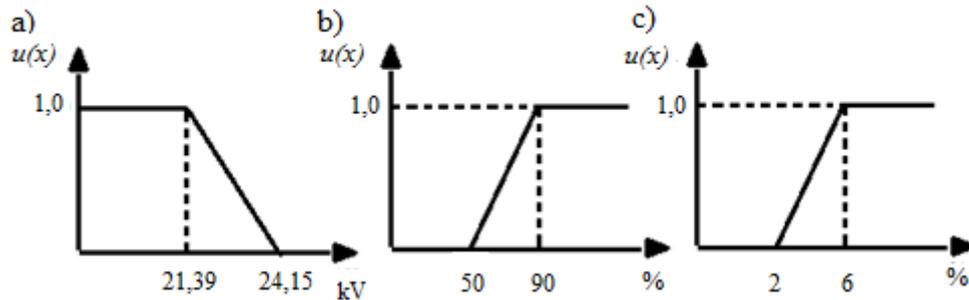


Figura 26 – Gráficos de três funções trapezoidais utilizadas na lógica *fuzzy* para a definição das regras que resultarão nos valores das prioridades dos critérios.

Referente à Figura 26-a os valores estipulados representam os valores adequados de tensão, cujo parâmetro TN significa tensão nominal (valores de tensões medidas ao longo do AL):

- Nível de tensão **adequado** em kV: $21,39 \leq TN \leq 24,15$;
- Nível de tensão **precário** em kV: $20,7 \leq TN \leq 21,39$;
- Nível de tensão **crítico** em kV: $TN < 20,7$ ou $TN > 24,15$.

Os pesos das prioridades do critério ΔV , representados por $u(x)$, cujos valores podem variar do algarismo 0 ao 1, sendo este de maior peso, estão mostrados na Tabela 13 e são calculados através das regras *fuzzy* mostradas na Equação 8, originada da Equação 6, que segue a função trapezoidal decrescente mostrada na Figura 26-a, em que x representa os valores das tensões nominais medidas no AL03.

$$u(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x < 21,39 \\ \frac{(24,15 - x)}{(24,15 - 21,39)} & \text{se } 21,39 < x < 24,15 \\ 0 & \text{se } x > 24,15 \end{cases} \quad (8)$$

O segundo critério utilizado para definição do momento de inserção da GD AS no AL03 é o percentual do comprometimento do limite térmico do cabo. A seção de cada cabo é 4/0 MCM CAA, o qual apresenta uma capacidade de condução de corrente de 282A, para uma temperatura final de 50°C.

Neste trabalho, definiu-se o percentual de 50 e 90% como limite mínimo e máximo para o carregamento dos cabos - valor definido pelo autor após discussões sobre o assunto com técnicos da concessionária. Conforme a Figura 26-b, a corrente ao atingir 50% do valor nominal do cabo, dispara a necessidade de despacho de energia da GD AS ao AL03, para aliviar o sistema.

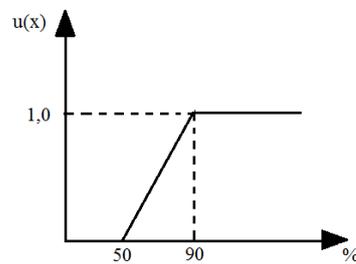


Figura 26-b – Função trapezoidal crescente com os limites percentuais de carregamento dos cabos condutores do AL03.

Na Equação 9 são apresentadas as regras *fuzzy* para o cálculo das prioridades do critério C_{icc} , em que x é a percentagem da corrente de fase que percorre os cabos do AL03.

$$u(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq 50 \\ 1 - \frac{(90 - x)}{(90 - 50)} & \text{se } 50 < x \leq 90 \\ 1 & \text{se } x > 90 \end{cases} \quad (9)$$

O último critério, mostrado na Figura 26-c é inerente às perdas de potência (ΔW) que podem ocorrer ao longo do AL03. Conforme observado na Tabela 12, as perdas no alimentador não atingem, em nenhum momento dos diagnósticos, o patamar mínimo definido pelos técnicos da concessionária. Logo este critério não será motivo de solicitação de despacho da GD à rede de distribuição.

Todo o desenvolvimento descrito acima se refere aos valores dos critérios analisados em períodos de 24 horas. Os resultados obtidos das Equações 8 e 9 estão mostrados na Tabela 13.

Tabela 13– Níveis de prioridade dos critérios quantitativos provenientes da aplicação da lógica *fuzzy*.

Período (horas)	ΔV	C_{tcc}	Período (horas)	ΔV	C_{tcc}
0:00	1,00	0,07	12:00	1,00	0,00
1:00	0,99	0,00	13:00	1,00	0,01
2:00	0,96	0,00	14:00	1,00	0,10
3:00	0,94	0,00	15:00	1,00	0,16
4:00	0,93	0,00	16:00	1,00	0,14
5:00	0,93	0,00	17:00	1,00	0,09
6:00	0,89	0,00	18:00	1,00	0,00
7:00	0,85	0,00	19:00	0,97	0,00
8:00	0,97	0,00	20:00	0,95	0,00
9:00	1,00	0,00	21:00	1,00	0,15
10:00	1,00	0,01	22:00	1,00	0,10
11:00	1,00	0,04	23:00	1,00	0,20

6.3.2 Critérios qualitativos

Os critérios qualitativos escolhidos pelos especialistas ou AD referem-se à disponibilização dos SA's, por parte da GD, à rede de distribuição da concessionária de energia elétrica. As escolhas derivam de análises e pesos dados por quatro AD, os quais estabelecem as necessidades específicas para cada parâmetro, em função dos dados da curva de carga do AL03, num período de 24h. São eles:

- Suporte de reativos para controle de tensão;
- Reservas operativas (tanto de potência ativa como reativa);
- Restabelecimento autônomo ou *black start*.

As notas, ministradas individualmente pelos AD, para cada tipo de SA que poderá vir a ser utilizado estão mostradas na Tabela 14.

Tabela 14– Notas dadas pelos AD aos critérios qualitativos em função de suas prioridades.

Agentes de decisão	Suporte de reativos SA ₁	Reservas operativas SA ₂	Restauração autônoma SA ₃
AD ₁	8,00	9,00	7,00
AD ₂	7,00	9,00	8,00
AD ₃	9,00	8,00	8,00
AD ₄	9,00	8,00	7,00

Para o desenvolvimento do método devem ser realizadas, por parte dos AD, comparações entre os pares de notas estipuladas e para isto utiliza-se a Equação 10.

$$\begin{aligned}
 X_i \succ X_j &\rightarrow x_{ij} = 1,5; x_{ji} = 0,5 \\
 X_i \approx X_j &\rightarrow x_{ij} = x_{ji} = 1
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

A partir destes valores aplicam-se as Equações 11 e 12 para o cálculo dos coeficientes k_1 e k_2 . Os valores destes coeficientes são inseridos na Tabela 15.

$$k_1 = \frac{\sum X_{ij}}{n}
 \tag{11}$$

$$k_2 = 2 - k_1
 \tag{12}$$

Tabela 15– Valores das comparações aos pares dos pesos estipulados pelos AD e os valores dos coeficientes k_1 e k_2 .

Comparações	AD ₁	AD ₂	AD ₃	AD ₄	K_1	K_2
SA ₁ -SA ₂	0,50	0,50	1,50	1,50	1,0	1
SA ₁ -SA ₃	1,50	0,50	1,50	1,50	1,25	0,75
SA ₂ -SA ₃	0,50	1,50	1,00	1,50	1,125	0,875

O cálculo dos valores dos coeficientes k_1 e k_2 , provenientes das Equações 11 e 12 serão empregados no desenvolvimento do método para o cálculo dos valores dos coeficientes k_p , para cada critério.

A Tabela 16 apresenta os valores dos coeficientes das estimativas médias dos critérios (k_1 e k_2), agrupados segundo aplicação do método da diagonal da matriz principal (CANHA 2004), em que se posicionam os valores dos coeficientes k_1 acima da diagonal principal e os valores de k_2 abaixo. Os valores dos somatórios de cada critério são aplicados à Equação 13 para calcular a coeficiente de prioridade de cada critério k_p .

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^p k_i}{p(p-1)} \quad (13)$$

Tabela 16– Método da diagonal da matriz principal e cálculo de k_p .

	SA ₁	SA ₂	SA ₃	Σ	K _p
SA ₁	xxxxxx	1	1,25	2,25	0,37
SA ₂	1	xxxxxx	1,12	2,12	0,35
SA ₃	0,75	0,87	xxxxxx	1,62	0,27

Para a sequência da metodologia, as médias das notas aplicadas pelos AD, para cada SA, em função do tempo, dividido em cinco períodos, estão demonstradas na Tabela 17.

Tabela 17 – Pesos referenciados pelos AD para os SA's em função da curva de carregamento do AL03.

Período (horas)	AD	SA ₁	SA ₂	SA ₃	Período (horas)	AD	SA ₁	SA ₂	SA ₃
	1	2	1	4		1	8	7	10
1-7h	2	1	2	5	19-21h	2	9	8	9
	3	3	1	6		3	8	7	9
	4	1	0	6		4	8	6	10
média		1,75	1	5,25			8,25	7	9,5
	1	8	7	9		1	10	8	8
8- 12h	2	7	6	9	22-24h	2	9	9	8
	3	9	7	8		3	9	8	7
	4	8	8	9		4	10	8	8
média		8	7	8,75			9,5	8,25	7,75
	1	9	10	9					
13-18h	2	10	10	9					
	3	9	9	9					
	4	10	9	8					
média		9,5	9,5	8,75					

Para o cálculo das prioridades finais dos critérios qualitativos (P_{icq}) – Tabela 18, multiplicam-se os valores de cada coeficiente de prioridade k_p pelas médias das notas aplicadas pelos AD aos SA's. O somatório destes valores, em cada horário, será normalizado pela Equação 14.

$$\mu(x) = \left[\frac{F(x) - \text{mín}F(x)}{\text{máx}F(x) - \text{mín}F(x)} \right] \quad (14)$$

Em que: $u(x)$ representa o valor normalizado da prioridade final do critério qualitativo, $F(x)$ é o valor da prioridade final do critério no horário definido, $\text{máx}F(x)$ representa o maior valor das prioridades finais dos critérios e $\text{mín}F(x)$ representa o menor valor das prioridades finais dos critérios.

Tabela 18– Valores das médias das notas dadas pelos AD multiplicadas pelo valor do coeficiente de prioridade k_p de cada critério que somadas e aplicadas ao critério dos mínimos múltiplos determinam as prioridades horárias finais dos critérios qualitativos.

Período (h)	SA1	SA2	SA3	Σ	P_{fcq}	Período (h)	SA1	SA2	SA3	Σ	P_{fcq}
01:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	13:00	3,56	3,36	2,37	9,30	1,00
02:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	14:00	3,56	3,36	2,37	9,30	1,00
03:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	15:00	3,56	3,36	2,37	9,30	1,00
04:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	16:00	3,56	3,36	2,37	9,30	1,00
05:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	17:00	3,56	3,36	2,37	9,30	1,00
06:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	18:00	3,56	3,36	2,37	9,30	1,00
07:00	0,66	0,35	1,42	2,43	0,00	19:00	3,09	2,48	2,57	8,15	0,83
08:00	3,00	2,48	2,37	7,85	0,79	20:00	3,09	2,48	2,57	8,15	0,83
09:00	3,00	2,48	2,37	7,85	0,79	21:00	3,09	2,48	2,57	8,15	0,83
10:00	3,00	2,48	2,37	7,85	0,79	22:00	3,56	2,92	2,10	8,58	0,90
11:00	3,00	2,48	2,37	7,85	0,79	23:00	3,56	2,92	2,10	8,58	0,90
12:00	3,00	2,48	2,37	7,85	0,79	00:00	3,56	2,92	2,10	8,58	0,90

O próximo passo é a análise conjunta dos critérios quantitativos e qualitativos para se obter o posicionamento dos melhores horários (*ranking*) para o despacho da GD AS à rede de distribuição de energia elétrica da concessionária. A Tabela 19 apresenta os valores dos critérios quantitativos (ΔV e C_{cc}) e os valores das prioridades finais dos critérios qualitativos (P_{fcq}), bem como a análise do *ranking* dos melhores momentos para o despacho da GD AS, pelos três métodos de operadores, citados em “Análise Final” - Anexo B.

Tabela 19– Análise para o *rankiamento* dos melhores horários para o despacho da GD AS na rede de distribuição da concessionária utilizando os métodos dos \langle 's, Σ e Π :

Período (h)	ΔV	C_{icc}	Pfcq		Y(x) \langle 's	X°	Y(x) Σ	X°	Y(x) Π	X°
0:00	1,00	0,07	0,90		0,07	7	1,96	8	0,06	7
1:00	1,00	0,00	0,00		0,00		1,00	15	0,00	
2:00	0,99	0,00	0,00		0,00		0,99	16	0,00	
3:00	0,96	0,00	0,00		0,00		0,96	17	0,00	
4:00	0,95	0,00	0,00		0,00		0,95	18	0,00	
5:00	0,95	0,00	0,00		0,00		0,95	18	0,00	
6:00	0,91	0,00	0,00		0,00		0,91	19	0,00	
7:00	0,86	0,00	0,00		0,00		0,86	20	0,00	
8:00	0,99	0,00	0,79		0,00		1,78	14	0,00	
9:00	1,00	0,00	0,79		0,00		1,79	13	0,00	
10:00	1,00	0,05	0,79		0,05		1,84	10	0,04	8
11:00	1,00	0,09	0,79		0,09	6	1,87	9	0,07	6
12:00	1,00	0,00	0,79		0,00		1,79	13	0,00	
13:00	1,00	0,06	1,00		0,06	8	2,06	5	0,06	7
14:00	1,00	0,17	1,00		0,17	4	2,17	3	0,17	3
15:00	1,00	0,24	1,00		0,24	1	2,24	1	0,24	1
16:00	1,00	0,21	1,00		0,21	2	2,21	2	0,21	2
17:00	1,00	0,17	1,00		0,17	4	2,17	3	0,17	3
18:00	1,00	0,00	1,00		0,00		2,00	7	0,00	
19:00	0,99	0,00	0,83		0,00		1,82	11	0,00	
20:00	0,97	0,00	0,83		0,00		1,80	12	0,00	
21:00	1,00	0,20	0,83		0,20	3	2,03	6	0,16	4
22:00	1,00	0,13	0,90		0,13	5	2,03	6	0,12	5
23:00	1,00	0,24	0,90		0,24	1	2,13	4	0,21	2

6.4 Análise dos resultados

Observando o resultado apresentado na Tabela 19 - definição do *ranking* dos melhores momentos do dia para a conexão da GD à rede de distribuição - verifica-se que é possível adotar qualquer um dos métodos (\langle 's, Σ ou Π), pois, todos convergem para um resultado semelhante. O método escolhido foi o do Σ em virtude de ser o que engloba as prioridades de todos os critérios de forma abrangente. O método dos \langle 's é o mais adequado para a situação

em que se apresentam muitos critérios concorrentes cujos valores das prioridades são relevantes, neste caso, o critério carregamento (C_{cc}) é pouco priorizado em função AL03 estar superdimensionado. O método produtivo ficou prejudicado, pois, seria contaminado pelos valores de C_{cc} .

A escolha do *ranking* final está mostrada na Tabela 20.

Tabela 20– *Ranking* final para o despacho da GD AS ao AL03.

Horas	ΔV	C_{cc}	P_{fcq}	$Y(x)\Sigma$	X°	Horas	ΔV	C_{cc}	P_{fcq}	$Y(x)\Sigma$	X°
0:00	1,00	0,07	0,90	1,96	8	12:00	1,00	0,00	0,79	1,79	13
1:00	1,00	0,00	0,00	1,00	15	13:00	1,00	0,06	1,00	2,06	5
2:00	0,99	0,00	0,00	0,99	16	14:00	1,00	0,17	1,00	2,17	3
3:00	0,96	0,00	0,00	0,96	17	15:00	1,00	0,24	1,00	2,24	1
4:00	0,95	0,00	0,00	0,95	18	16:00	1,00	0,21	1,00	2,21	2
5:00	0,95	0,00	0,00	0,95	18	17:00	1,00	0,17	1,00	2,17	3
6:00	0,91	0,00	0,00	0,91	19	18:00	1,00	0,00	1,00	2,00	7
7:00	0,86	0,00	0,00	0,86	20	19:00	0,99	0,00	0,83	1,82	11
8:00	0,99	0,00	0,79	1,78	14	20:00	0,97	0,00	0,83	1,80	12
9:00	1,00	0,00	0,79	1,79	13	21:00	1,00	0,20	0,83	2,03	6
10:00	1,00	0,05	0,79	1,84	10	22:00	1,00	0,13	0,90	2,03	6
11:00	1,00	0,09	0,79	1,87	9	23:00	1,00	0,24	0,90	2,13	4

Como resultado da metodologia, estima-se que o melhor momento para a GD AS despachar energia elétrica para o AL03 se dá no horário das 15h. Num *ranking* até a 10^a posição, o despacho poderia ocorrer no período compreendido das 10h até às 24h, cujos horários das 12h às 13h e das 19h às 21h podem ser aproveitados para manutenção das máquinas.

6.5 Análise dos parâmetros elétricos do AL03 após despacho da GD AS

Nesta parte do trabalho serão realizadas análises das características elétricas do AL03, considerando os seguintes casos:

- 1) despacho da GD AS com potência fixa de 6MW nos períodos horários definidos pelo *ranking*;
- 2) despacho da GD AS com a potência excedente da demanda do AS, de modo contínuo, ou seja, em todo o período horário.

Análise do caso 1 – GD As despachando modo *ranking*, cujas simulações estão apresentadas no **APÊNDICE C**:

Comparando-se as curvas de corrente na troncal do AL03, mostradas na Figura 56 em que esta curva não sofre influência do despacho da GD AS e na Figura 57 com a GD AS despachando para o AL03, verifica-se que as correntes sofrem redução em torno de 33%.

As perdas acumuladas no AL03, que já apresentavam um valor baixo sem o despacho da GD AS, no período de despacho reduziram seu valor em torno de 5 a 15%, conforme análise das curvas da Figura 58 e da Figura 59.

Referente aos níveis de tensão nos quatro pontos críticos do AL03, mostrados na Figura 60, Figura 61, Figura 62 e na Figura 63, verifica-se o seguinte:

Nos períodos de despacho, a tensão permanece na faixa de tensão de 22,3kV a 23,13kV, dentro dos padrões estipulados pelo PRODIST (21,3 a 24,15kV).

Nos períodos sem despacho, a tensão se apresenta 16,6% do dia com quedas de 0,93% abaixo do nível denominado de adequado pelo PRODIST.

Observando as curvas de carga do AL03, apresentadas na Figura 64 e na Figura 65, verifica-se que o valor da potência ativa excedente no AL03 atinge, aproximadamente, 1,39MW no período das 18h. Na Tabela 21 são apresentadas algumas comparações dos valores das potências na barra da SE AR.

Tabela 21– Potência ativa na barra da SE AR – comparação com despacho e sem despacho da GD AS ao AL03.

Potência ativa sem despacho (MW)	Período horário (h)	Potência ativa com despacho (MW)	Período horário (h)
5,66	1:00	5,66	1:00
3,86	7:00	3,86	7:00
5,37	10:00	-0,83	10:00
6,46	23:00	-1,6	23:00

Referente à análise do caso 2 – GD AS ininterrupta- cujas simulações estão apresentadas no **APÊNDICE B**, apresenta-se o que segue:

Avaliando a curva de corrente dos cabos da troncal do AL03, conforme Figura 46 e Figura 47, observa-se que ocorrem reduções na corrente do cabo na troncal do AL03 de 22% a 52%, dependendo do período horário.

Analisando a Figura 48 e a Figura 49, observa-se que houve uma redução das perdas no AL03, que já se apresentavam baixas, de 0,26% sem despacho da GD AS para 0,04% com a mesma despachando o excedente de potência para o AL03.

Verifica-se na Figura 50, Figura 51, Figura 52 e na Figura 53, que as curvas dos níveis de tensão nos quatro pontos mais críticos do AL03, em nenhum período horário transgridem os níveis de tensão estabelecidos pelo PRODIST (2010) - (21,3 a 24,15kV).

Conforme se observa nas curvas da Figura 54 e da Figura 55, em 54% do dia o AL03 apresenta valores de potência que excedem à solicitação da carga. Estes excedentes variam de 1,19 a 2,1MW e estarão presentes na barra da SE AR podendo ser absorvidos ou não pelo sistema de distribuição integrante da SE AR, dependendo do planejamento. Dos restantes 46%, que fazem parte do *ranking* do despacho, 8,36% do dia a potência ativa absorvida pelo AL03 apresenta-se em 109kW e os restantes 37,64% apresenta valores excedentes de até 1,4MW de potência ativa.

Portanto o despacho contínuo da GD AS ao AL03 não impõe restrições quanto aos critérios definidos como relevantes ao sistema de distribuição, porém ocorrerá um excedente grande de potência ativa ao sistema. Este fato poderá ser positivo ou negativo e dependerá das condições do sistema interligado a SE AR e ao seu planejamento.

Resumo do capítulo 6

O *software* BIOGÁS®, utilizado para a estimativa da vazão de biogás e da potência que pode ser gerada no aterro sanitário, revelou os seguintes resultados:

- O volume da vazão de biogás, mesmo apresentando descontinuidades e diferentes valores ao longo do ano, é suficiente para alimentar conjuntos de motores geradores para a geração de energia elétrica;
- Os valores estimados de potências que podem ser geradas no aterro variam de importância em função da vida útil do aterro, como exemplo: 2MW a partir de 2011, por um período de 43 anos ou 6MW iniciando em 2017 e gerando energia até 2054 (37 anos).

As análises realizadas no AL03, através do PSL®DMS, utilizadas para a definição das prioridades dos critérios quantitativos, basearam-se em dois diagnósticos: AL03 à plena carga, suprindo a carga do AS e a outra com o AL03 sem a carga do AS, ou seja, com a GD AS em operação suprindo a carga do AS, sem despachar energia para o AL03.

É importante salientar que apenas os valores das características elétricas do AL03 utilizados com o primeiro diagnóstico estão contidos no escopo do trabalho e a análise propriamente dita está inserida no **APÊNDICE A** – Diagnóstico do AL03.

Através da análise dos resultados dos diagnósticos, pode-se afirmar que, para o critério carregamento dos cabos condutores (C_{tcc}) com o AL03 suprindo a carga do AS, sem a GD AS inserida, ocorrem intervalos do dia em que o percentual de carregamento do AL03 chega a 60%, ratificando a necessidade da conexão da GD AS no AL03. Porém quando a GD AS supre a carga do AS, o percentual de carregamento do cabo do AL03 nunca atinge o patamar mínimo de 50% de carregamento. Sendo assim este critério não implica em despacho da GD AS no AL03. Para o critério níveis de tensão (ΔV), quando o AL03 alimenta a carga do AS, quatro locais específicos, denominados de pontos críticos, apresentam cerca de 80% do dia com ΔV abaixo do nível adequado, em alguns casos com valores em torno de 10% de queda de tensão. Com a GD AS suprindo a carga do AS, ocorre a transgressão do critério somente 16% do dia e o valor da queda de tensão máxima ultrapassa em 0,6% o patamar mínimo, que indica a necessidade de despacho da GD AS para o AL03.

Como o AL03 apresenta-se em ótimo estado, as perdas de potência (ΔW) em nenhum momento, dos dois diagnósticos, transgridem o patamar mínimo definido de 6 a 10%, sendo que o valor é da ordem de 0,3% do valor da demanda média total do AL03, o que permite

afirmar que este critério, neste caso específico, não afeta o *ranking* do melhor momento para o despacho da GD AS ao AL03.

Verificou-se que os valores das características elétricas do AL03 não sofrem nenhuma restrição quando o despacho da GD AS obedece ao ranking horário – **APÊNDICE B** ou ao modo contínuo de geração - **APÊNDICE C**. Apenas este último apresentará valores de potência ativa excedente maior que no caso do despacho por *ranking* e haverá alguma restrição ou não em função do planejamento do sistema de distribuição por parte da concessionária.

CONCLUSÃO

A produção de biogás com a decomposição de RSU é uma forma de reduzir as emissões de CH_4 para a atmosfera, pois o CH_4 é um dos gases mais agressivos ao meio ambiente. Muitas literaturas afirmam ser o CH_4 21 vezes mais agressivo que o CO_2 . Em muitos casos o CH_4 é queimado em equipamentos que não atendem às normas estabelecidas pelos órgãos ambientais ou é lançado diretamente na atmosfera, sem aproveitamento energético.

A recuperação energética do CH_4 proveniente dos RSU, no contexto nacional, mostra-se substancial para diminuir os impactos ambientais de sua disposição e de seu tratamento. Este processo é importante para reduzir os problemas sociais que envolvem reciclagem e recuperação de materiais, bem como os problemas econômicos com a utilização do biogás para a geração de energia elétrica a partir de aterros sanitários, o que acarreta a sustentabilidade do projeto, pois, o excedente de energia gerada pode ser comercializado com a concessionária de energia elétrica local.

Sabe-se que o valor da geração de energia elétrica depende diretamente da vazão e da pureza do biogás do AS, sendo esta vazão sazonal e descontínua, em função das temperaturas locais, das quantidades de chuva, do tipo de RSU e etc., podem ocorrer períodos de variação nos valores da geração de energia elétrica por parte da GD.

Neste trabalho estimou-se que a potência elétrica que pode ser gerada pela GD AS, utilizando conjuntos de motores geradores Ciclo Otto está na ordem dos 6MW, num período estimado de 37 anos (2017 a 2054).

O interesse do Brasil pela GD vem aumentando consideravelmente nos últimos anos, isto em função da reestruturação do setor elétrico com a desverticalização do sistema, necessidade de aproveitamento de diferentes fontes primárias alternativas de energia, novas tecnologias da eletrônica, novos sistemas de comunicação (envio de dados) e uma maior conscientização sobre a questão ambiental. É inegável que a crise de energia elétrica no Brasil no ano de 2001 também pesou para o aumento desse interesse.

O estudo do despacho da GD AS ao AL03 utilizou-se dos dados da curva de demanda e de corrente médias diárias do alimentador no mês de janeiro de 2011, medidos no barramento da SE AR. Com estes dados inseridos no PSL®DMS, partiu-se para as simulações das grandezas do AL03 em duas situações diferenciadas: AL03 suprindo toda a carga do circuito e AL03 sem a carga do aterro, com a GD AS operando como APE. Com estas

simulações concluiu-se que:

No primeiro diagnóstico, quatro pontos do AL03 apresentaram transgressões nos níveis de tensão (ΔV) estabelecidos pelo PRODIST, em torno de 80% do dia, cujas quedas de tensão chegaram a atingir o valor de 10%. Referente ao critério - carregamento térmico dos cabos condutores (C_{tcc}), nestes mesmos pontos críticos do AL03, houve transgressões do percentual mínimo definido (50%) em 58% do dia. Referente às perdas de potência (ΔW), em momento algum houve transgressão dos valores percentuais de perdas definidos (2 a 6%).

No segundo caso, critério ΔV , nos locais citados anteriormente, ocorreu transgressões dos limites estabelecidos em torno de 16% do dia, sendo que os valores ultrapassam 0,6% além do limite estipulado pelo PRODIST (2010). O critério C_{tcc} e o ΔW em nenhum momento transgrediram os percentuais estipulados.

Como resultado dos dois diagnósticos realizados para a definição dos critérios quantitativos, concluiu-se que com a autossuficiência do aterro, que é a maior carga do AL03, haveria pouca necessidade de despacho de energia para este alimentador.

Esta constatação se deu com a simulação mostrada no APÊNDICE B – GD AS despachando potência fixa de 6MW para o AL03 em tempo integral - em que os parâmetros do AL03 mantêm-se dentro das normas estabelecidas pelo PRODIST e a potência ativa na barra da SE AR apresenta valores excedentes que não serão absorvidos pelo AL03, logo este excedente circulará pelas barras da SE AR, dependendo do planejamento da concessionária.

Pode-se dizer que o *ranking* está relacionado à curva de demanda do AL03 e suas relações com as possibilidades de aplicação dos SA's. Um exemplo claro mostrado é que a maior solicitação de despacho da GD AS para o AL03 ocorreria no horário das 15h, completamente fora do horário de maior demanda do AL03, que ocorre às 22h30min.

Mesmo com os resultados das ferramentas de apoio, é necessária uma validação deste posicionamento (*ranking*) pelos AD envolvidos através de uma análise mais detalhada dos resultados, com o objetivo de avaliar a eficiência do método.

Assim, conclui-se que o melhor momento para o despacho da fonte de GD AS ao AL03 se verifica no período das 10h às 24h, com intervalos que podem ser utilizados para a parada das máquinas, haja vista que não requerem geração. Estes intervalos ocorrem das 12h às 13h e das 19h às 21h.

Finalizando, o despacho da GD AS ao AL03 da SE AR sem prévio e criterioso planejamento do ponto de conexão e do momento ideal para seu despacho, pode acarretar impactos significativos no fluxo de potência, perfis de tensão, perdas elétricas, proteção, confiabilidade e qualidade da energia e também aos consumidores conectados a esta rede.

Esses impactos podem ser positivos ou negativos, dependendo do planejamento do sistema de distribuição e das características da GD. Além dos problemas citados anteriormente, com a conexão da GD AS ao AL03, poderá existir um problema sério que é o risco de acidente com os operários que trabalham em serviços de manutenção nas redes, pois, no Ilhamento a rede seria alimentada pela GD AS e não pelo AL03. Por outro lado, em caso de desligamento acidental do AL03, a GD AS poderia permitir o abastecimento da carga do AL03 até que a operação na rede seja normalizada.

Com as modificações que vem ocorrendo nos sistemas elétricos e com o advento do conceito de medições inteligentes (*smart metering*) e principalmente das redes inteligentes (*smart grid*), o sistema elétrico poderá conter dois subsistemas: um encarregado da medição *on-line* (*net metering*), o qual detectaria as necessidades dos SA e enviaria sinais quando um serviço fosse requerido; e o outro subsistema realizaria o trabalho de fornecer o serviço ao receber os respectivos sinais de comando. Estes sinais poderiam ser enviados de uma base de controle baseada no *ranking* mostrado neste trabalho.

Principais contribuições

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre RSU, sua disposição e capacidade de recuperação energética do biogás. Proporcionou a estimativa da vazão do biogás e da potência que pode ser gerada em função da vida útil do biogás no AS.

A possibilidade de geração de energia elétrica no AS, através de uma fonte alternativa de GD obrigou a execução de uma revisão das tecnologias existentes para este fim, cuja escolhida em função da simplicidade e dos custos de operação e manutenção foi a do motor de combustão interna denominado de Ciclo Otto.

O *Ranking* dos melhores momentos para despacho da GDAS ao AL03, em função dos parâmetros elétricos da rede de distribuição e da possibilidade de utilização dos SA's, utilizando o método multicritério de apoio à decisão.

Previsão para trabalhos futuros

Para desenvolvimento de futuros trabalhos sobre este tema, aqui defendido, fica a proposta da avaliação tarifária da energia gerada com a comparação entre o valor pago à concessionária e aos consumidores livres e seus mecanismos de comercialização. Estes dados poderiam ser utilizados como novo critério quantitativo na definição do *ranking*.

A comercialização dos SA's por parte dos detentores de GD, principalmente da inserção de potência reativa para regular os níveis de tensão ao longo do AL03, que trazem como consequência a redução da injeção de potência ativa, consequentemente acarretando a redução do valor da energia comercializada com a concessionária; A capacidade de autorestabelecimento, pois, no caso, esta GD AS teria capacidade de suprir o AL03 por motivo de contingência no sistema de distribuição.

Também a análise do fluxo de potência no AL03 em virtude do despacho da GD, pois se sabe que a maioria das redes de distribuição são radiais, e esta conexão traria como consequência um fluxo de potência bidirecional o que acarretaria mudanças nas proteções do AL, pois as proteções não estão preparadas para este tipo de comportamento, o que acarretaria modificações razoáveis, implicando em custos para a concessionária.

Publicações

MARTINS, L. F. G., BARIN, A., CANHA, L. N., ABAIDE, A. da R., BRIGNOL, W. da S., ORLING, R. B. Lógica Fuzzy para Definição do Regime Operacional de Fontes de GD - Eficientização na Distribuição. IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Agosto 28 a 31, 2011, Juiz de Fora, MG – Brasil.

MARTINS, L. F. G., BARIN, A., CANHA, L. N., ABAIDE, A. da R., BRIGNOL, W. da S., ORLING, R. B. Estratégias de Gerenciamento Utilizando Métodos de Apoio à Decisão para Definição do Regime Operacional de Fontes de Geração Distribuída. Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Novembro 6 a 9, 2011, Mar del Plata – Argentina.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R., MARTINS, L. F. G., ORLING, R. B. Funções Multiatributos como Tomada de Decisão para a Análise e Seleção de Fontes de Geração de Energia Elétrica. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro 23-26, 2011, Florianópolis, SC - Brasil.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. da R., MARTINS, L. F. G., ORLING, R. B. Decision Making Process for Selection of Electrical Energy Technologies in

Landfills. Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011, Maio 11-13, Malaga – Espanha.

BARIN, A., CANHA, L. N., ABAIDE, A. da R., MARTINS, L. F.G. Análise crítica dos atuais incentivos ao uso de fontes renováveis de energia no cenário energético brasileiro – o caso do biogás. II Fórum Brasileiro de Energia, Abril 27-29, 2010.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT [Associação Brasileiro de Normas Técnicas. NBR 10.004. Rio de Janeiro: ABNT], 1987.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica** - 2ª Edição / 2008. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>> acesso: outubro de 2009.

ANEEL. Contribuição da APINE (Associação Brasileira dos Produtores Independentes de Energia Elétrica) na “**Análise preliminar à CP nº. 015/2010 – Nota Técnica nº. 0043/2010 – SRD/ANEEL**”, disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Apine%20CP%20015_2010.pdf> acesso: março 2011.

ANEEL. Decreto nº 5.025, de 30 mar. 200. **Regulamenta o PROINFA, na primeira etapa e dá outras providências**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bdec20045025.pdf>>. Acesso: julho, 2009.

ANEEL. Decreto nº 5.163, de 30 jul. 2004 - **Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões** – disponível em www.aneel.gov.br/cedoc/dec20045163.pdf - Acesso: maio, 2010.

ANEEL. **Ofício nº 015/2011- SEM/ANEEL**. Disponível em http://www.ccee.org.br/StaticFile/Arquivo/biblioteca_virtual/aneel_of_00015_sem_valor_anual_de_referencia_para_o_ano_de_2011-2011-01-18.pdf. Acesso: março, 2011.

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST** – disponível em http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=82. Acesso: maio, 2010.

ANEEL. Resolução nº 265, de 10 de junho de 2003. **Estabelece os procedimentos para prestação de serviços ancilares de geração e transmissão**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003265.pdf>>. Acesso: março, 2010.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 247 de 21 de dezembro de 2006**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006247.pdf>>. Acesso: março, 2010.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 77 de 18 de agosto de 2004**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2004077.pdf>>. Acesso: março, 2010.

ANEEL, Resolução nº 265, de 10 de junho de 2003 - **Estabelece os procedimentos para prestação de serviços ancilares de geração e transmissão** – disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003265.pdf>>. Acesso: maio, 2010.

ARAPONGAS TECNOLOGIA MECÂNICA, Rio de Janeiro/RJ. Disponível em <<http://www.gasbrasil.com.br/noticia/arquivos/ARAPONGAS%20-%20MOTORES%20ESTACION%20C3%81RIOS%20A%20G%20C3%81S.pdf>>. Acesso: outubro, 2009.

BARIN, A. **Metodologia para a Análise dos Efeitos da Geração Distribuída sobre as Características Operacionais dos Sistemas de Distribuição Utilizando Técnicas Multicriteriais** - Trabalho de defesa de Mestrado, apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2007.

BARIN, A. **Análise Multicritério para a Seleção de Sistemas de Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos** - Trabalho de Qualificação de Doutorado, apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2009.

BARIN, A; et. al. **Análise Crítica dos Atuais Incentivos ao Uso de Fontes Renováveis de Energia no Cenário Energético Nacional – O Caso do Biogás**. Segundo Fórum Brasileiro de Energia. Bento Gonçalves, RS, BR, 2010.

BARIN, A; et. al. **Seleção de Fontes Alternativas de Geração Distribuída Utilizando uma Análise Multicriterial Baseada no Método AHP e na Lógica Fuzzy**. Revista da Sociedade Brasileira de Automática - SBA: Controle e Automação. Vol 21.nº5. ISSN 0103-1759.Campinas. Outubro de 2010.

BIODIESEL BR. **Energia que vem do lixo**. Fev. 2008. Disponível em <<http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/energia-vem-lixo-11-02-08.htm>>. Acesso: jul 2009.

BIOMASSA BRASIL. **Banco de dados**. Disponível em <<http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>>. Acesso: outubro 2010.

BORBA, P. M. S. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, submetido ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro em setembro de 2006, intitulada **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso**, Acesso: julho 2009.

BRAGA, J.M.F., SEIDL, P., LONGO, W.P. - **Análise da Viabilidade Econômica da Integração de Células a Combustível nas Plantas de Cloro-Soda para Utilização do Hidrogênio Gerado no Processo**. Artigo publicado na revista ENGEVISTA, vol. 11, No 1, pags. 8-23, Universidade Federal Fluminense - Niterói, RJ, (2009). Disponível em <www.waldimir.longo.nom.br/artigos/116.doc>. Acesso:abril, 2012.

BRASIL. ICLEI. **Governos Locais pela Sustentabilidade - Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários** - São Paulo, 2009, Bibliografia ISBN: 978-85-99093-06-1.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Programa de Incentivo a Fontes de Energia alternativas (PROINFA). Lei 10.438/2002**. Anais eletrônicos. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programs_display.do?chn=877>. acesso: julho, 2010.

BRASIL. Presidência da República. **Lei 9.074 de 7 de julho de 1995**. Disponível em , http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm>. Acesso: julho, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) — **Guia de Habilitação de Projetos de Geração de Energia Elétrica - Centrais Termelétricas a Biomassa**. Disponível em <<http://www.bancor.com.br/Index/biomassa.pdf>>. Acesso: setembro 2009.

BRITO, M.P. **Geração Distribuída: Critérios e Impactos na Rede Elétrica**, Projeto de Graduação, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, fevereiro, 2007.

BRITO, M.P., FARDIN, J.F. **Geração Distribuída: Critérios E Impactos Na Rede Elétrica** – II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética –IICBEE – Vitória / ES – 2007.

CANHA, L. N. **Metodologia para localização e dimensionamento de pequenas fontes de geração distribuída em redes de distribuição a partir de uma análise multicriterial**, tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria. pp. 313, 2004.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE, **Ambiente de Contratação**, disponível em <http://www.ccee.org.br/cceeinterdsm/v/index.jsp?vgnextoid=65daa5c1de88a010VgnVCM100000aa01a8c0RCRD>. Acesso: outubro 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/biogas/biogas/220-pagina-inicial>> Acesso: abril de 2009.

CHAVES, F. D. M. **Serviços Ancilares Através da Geração Distribuída: Reserva de Potência Ativa e Suporte de Reativos**, tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos, Campinas/SP, 2009.

COELHO, S. T. et. al. **Estado da arte do biogás**. Relatório de acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001.

COELHO, S. T., et. al. **A conversão da fonte renovável biogás em energia**, Seminário Brasileiro de Planejamento Energético – V SBPE, Políticas Públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio, Brasília – DF, maio-junho, 2006.

COSTA, A. S., SOUZA. A. **Serviços Ancilares**. Labplan e GSP/Labspot. Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, [200-]. Disponível em <http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/plnjop/Servicos_Ancilares.pdf>. Acesso: março, 2011.

DE ALMEIDA, S. C. A., DE FRANÇA, V. C., JUNIOR, L. M. **Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental de Utilização de Biodigestores em uma Fazenda no recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro** – XII Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, Fortaleza/CE, setembro 2008.

DE BONA, F. S., FILHO, E. R., **As microturbinas e a geração distribuída**, disponível em <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%2053.pdf>> acesso: out. 2009.

DE SOUZA, J. et al, **Desempenho de um motor ciclo Otto utilizando biogás como combustível**, Anais do 5º Encontro de Energia no Meio Rural, 2004.

DE SOUZA, S. N. M. et al., **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando Biogás da Suinocultura**, *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v. 26, no. 2, p. 127-133, 2004.

ECODEBATE. Reportagem de Renée Pereira, em “O Estado de S.Paulo”. **Prorrogação do PROINFA por mais um ano vai custar mais 182 milhões ao consumidor de energia.** Disponível em <<http://www.ecodebate.com.br/2011/05/18/prorrogacao-do-proinfa-por-mais-um-ano-vai-custar-mais-r-182-milhoes-a-consumidor-de-energia/>>. Acesso: julho, 2011.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA –, **Balanco energético nacional 2010 – ano base 2009: resultados preliminares** - Brasília: Graficci Programação Visual, 2010. 54p. ENERTRADE, Empresa de Consultoria na Área de Comercialização de Energia Elétrica, disponível em <<http://www.enertrade.com.br/home/faq.asp>>, acesso: outubro 2010.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica.** Santa Maria: Ed. da UFSM, 245p. ISBN 85-7391-014-3, 1999

FELIPETTO, A. V. M., **Conceito, planejamento e oportunidades, Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos** - Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

FIGUEIREDO, N. J. V., **Utilização do Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo de Caso** - Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

FILHO A.S., **Análise regulatória das condições de interconexão da geração distribuída: requisitos para os procedimentos de distribuição** – dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá – Itajubá / MG, dezembro de 2005.

FILHO, J. A. P. e da SILVA, C. L., Revista SODEBRAS, Volume 3, Nº 27, **Estimativa de Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos considerando-se a Reciclagem de Materiais**, março 2008.

FURTADO, J. G. de M., SERRA, E. T., **Avaliação tecnológica sobre a geração de Energia Elétrica Apartir de Resíduos Sólidos Urbanos** - XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife - PE, 2009.

GRUPO FOCKINK. Disponível em <<http://www.fockink.ind.br> - acesso: novembro 2010.

FRANCHI, T.P. e JÚNIOR, A.F.B. - **Utilização de Células a Combustível tipo Pem como Alternativa na Geração Auxiliar em Instalações Elétricas de Grande Porte.** XIII ERIAC - Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano da CIGRÉ, 24 a 28 de maio de 2009, Porto Iguazu – Argentina. Disponível em <<http://labplan.ufsc.br/congressos/XIII%20Eriac/B3/B3-12.pdf>>. Acesso: abril, 2012.

GASNET. Disponível em <<http://www.gasnet.com.br/conteudo/11291>> , Acesso: abril, 2011.

HADDAD, J. , Borotni, E. C., Dias, M. V. X., **Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras**, Revista Brasileira de Energia, vol.11, Nº2, SBPE, 2005, disponível em <www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=187>, acesso: maio 2010.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica** - Tese de Mestrado em Ciências em Planejamento Energético pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades@**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso: maio de 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dados do Censo 2010** publicados no Diário oficial da União do dia 04/12/2010. Disponível em: http://www.censo2010.ibge.gov.br/dados_divulgados/index.php?uf=43 Acesso: março de 2011.

INEE. **Contribuição** do Instituto Nacional de Eficiência Energética à Audiência Pública Nº 010/2006 **para alterar a Resolução Normativa nº 265/03 da ANEEL** sobre os serviços ancilares. Disponível em http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/010/contribuicao/inee_-_instituto_nacional_de_efici%C3%Aancia_energetica.pdf. Acesso: abril de 2009.

IPCC. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. Módulo 6, **Lixo, do Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, Volume 2, Livro de Trabalho**, 1996.

IPCC. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. Módulo 5, **Resíduos**, Volume 2: **Geração de Resíduos, Composição e Gestão de Dados** e Volume 3: **Disposição de Resíduos Sólidos**, 2006.

JADJISKI, D. **Geração Distribuída: direto na rede**. Agência Canal Energia, março 2010. Disponível em <http://www.gasnet.com.br/conteudos.asp?cod=8750&tipo=Artigos&categoria=7>. Acesso: maio 2010.

JUNIOR, J. M. de M., **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro, IBAM, 2007.

JÚNIOR, L. C. M. **Introdução às Máquinas Térmicas - Turbinas a Vapor e a Gás**, ISBN 978-85-908775-3-0. Disponível em < <http://pt.scribd.com/doc/37945766/Introducao-as-Maquinas-Termicas-Turbinas-a-Gas-e-a-Vapor>. Acesso: setembro, 2010.

LANDIM, A. L. P. F.e de AZEVEDO L. P., **Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Inútil ao Sustentável**, Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em MBE - Pós-Graduação Executiva em Meio Ambiente, submetido ao Corpo Docente do BEM / Coppe, Rio de Janeiro, 2006.

LEME, M.M.V., Trabalho de dissertação de mestrado intitulada **Avaliação das opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos RSU: Estudo de caso**, apresentado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, MG, BR, 2010.

LEZAMA, J. M. L ; FELTRIN A. P. ; CONTRERAS, J.. **Despacho Ótimo de Geração Distribuída em Sistemas de Energia Elétrica**. Em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010, Belem - PA. Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, v. 1, p. 1-6, 2010.

LIMA, C.F.P. et al., **Sistema de Gerenciamento de Planta Virtual de Geração**, disponível em <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/III%20SBSE%20-%202010/PDF/SBSE2010-0275.PDF>>, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2010, Belém/PA, acesso: novembro 2010.

LINO, M. A. B., **Proteção da Interconexão de um Gerador com o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**, Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 2007.

LIXO.COM.BR. **Gestão de resíduos**. Disponível em: <http://www.lixo.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=144&Itemid=251>. Acesso: 05 de março, 2010.

LOBATO, A., **Gás de Lixo pode Produzir 15% da Energia no Brasil** - jun 2008, disponível em <www.energiarenovavel.org/index.php?option=com_content&ask=view&id=Itemid=178>, acesso: março 2009.

LORA, E. S. Seminário Estadual “**O Futuro da Energia**” “**Geração Distribuída: Pequenas Termelétricas a Biomassa**” (out., 2005). Disponível em www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/GD-AMDA.pdf. Acesso: março, 2009.

MARQUES, G. dos S., Dissertação intitulada **Alternativas de Financiamento de Projetos de Biogás e Geração de Energia Elétrica em Aterros Sanitários: Estudo de Caso**, Universidade Católica de Brasília, 2006.

MENEZES, E. L., PINTO, D. P., **Fontes de Energia Alternativa no Brasil**, Anais do segundo Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, II CBEE, Vitória, ES, setembro de 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – **resolução nº 23 de 12 de dezembro de 1996**, publicada no DOU em 20/01/1997, disponível em <<http://www.ibama.gov.br/cadastro/manual/html/043600.htm>> acesso: abril de 2010.

OLIVEIRA, B.P., **Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e do Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil**, Tese de Doutorado em Ciência em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, B. V., **Incentivos Tarifários para a Conexão de Geração Distribuída em Redes de Média Tensão**, Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, submetida ao Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

PECORA, V. et al., **Aproveitamento do Biogás para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás** - IEE/CENBIO, VII INDUSCON, agosto de 2008.

PIEROBON, L. R. P., **Sistema de Geração de Energia de Baixo Custo Utilizando Biogás Proveniente de Aterro Sanitário**, tese de Doutorado em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PORTAL BRASIL. COP 16 Cancún, México, jan. 2011. Disponível em <http://www.brasil.gov.br/linhadotempo/epocas/2010/cop-16-2013-cancun-mexico>>. Acesso: setembro, 2011.

REVISTA ELO, Editada pelo Grupo SOTREQ, Energia - agosto/setembro de 2008. Disponível em http://brasil.cat.com/cda/files/1357962/12/1_Revista+Elo+N+46_Aterro+Sao+Joao.pdf> , Acesso: outubro, 2009.

SANTOS, P. E. S. et al., **Consumidor Livre: O Impacto da Migração na Receita das Distribuidoras - XII SEPEF - Seminário de Planejamento Econômico-Financeiro do Setor Elétrico**, Recife - Pernambuco – Brasil, dezembro de 2004.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G.. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1º. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999.

SOUZA, A. R. R., **Conexão de Geração Distribuída em Redes de Distribuição - Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.**

UDAETA, M. E. M. et al., **Energia de Resíduos Sólidos como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**, Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, GEPEA, USP, 2002, Acesso: maio, 2009.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Prefeitura e Walm explicam projeto do novo aterro na UNESP**. Disponível em < <http://www.sorocaba.unesp.br/noticias/?n=220>>. Acesso: 10 de março, 2010.

USEPA [United States Environmental Protection Agency], Landfill Gas Emission Model – Landgem Version 3.02, User’s Guide, Environmental Research Group, 2005.

USEPA [United States Environmental Protection Agency], 1998. Disponível em <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>>, Acesso: outubro, 2009.

VARANDA, G.. **A Energia que vem do lixo**. Planeta Sustentável, Edição: Mônica Nunes em 26/05/2008. Disponível em http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/conteudo_280524.shtml>, Acesso: outubro, 2009.

APÊNDICE A – DIAGNÓSTICO DO AL03

Esta parte do trabalho apresenta as análises realizadas com a ferramenta de suporte ao planejamento e à operação de sistemas de distribuição- PSL®DMS versão Demo 1.0.1.1, para simulação das condições técnicas do AL03 nas seguintes condições:

- AL03 suprindo toda a carga a ele conectada;
- AL03 com a GD AS alimentando a carga do aterro, sem despacho da energia excedente ao sistema de distribuição.

Para validar as simulações referentes aos dois diagnósticos, realizou-se a validação das curvas de potência dos transformadores deste AL, resultante da distribuição realizada pelo software, comparando os valores das curvas de todos os transformadores de clientes com potência instalada nominal igual e/ou maior à 500kVA ,com os valores de janeiro de 2011 das memórias de massa dos medidores de energia elétrica de propriedade da concessionária, instalados em todos estes clientes. O alimentador analisado está mostrado na Figura 27.

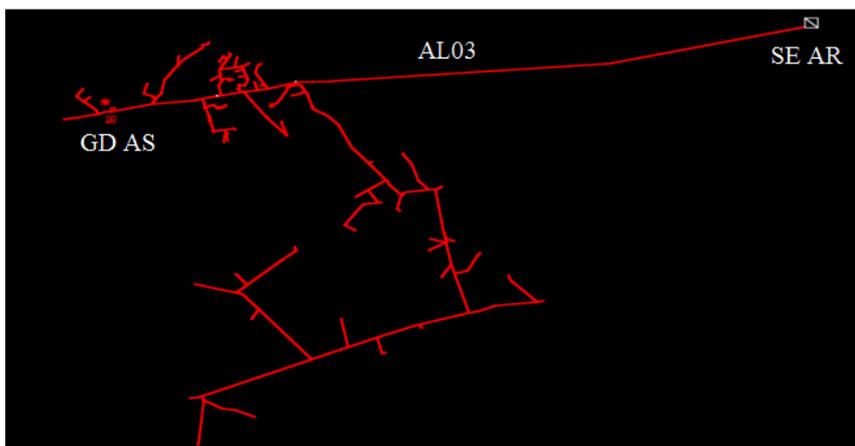


Figura 27 – AL03, proveniente da SE AR.

Condições do Al03 suprindo a carga do AS sem despacho da GD AS.

Algumas condições técnicas do AL03 da SE AR que serão apresentadas:

- Curva de demanda média de potencia ativa e reativa;

- Perdas de potência ativa e reativa;
- Curvas dos níveis de tensão em vários pontos do AL03;
- Curva de corrente na saída da SE AR;
- Curva do carregamento do cabo do AL03.

A Figura 28 e a Figura 29 apresentam as curvas da demanda ativa e reativa do AL03, conforme medições realizadas na SE AR no mês janeiro de 2011.

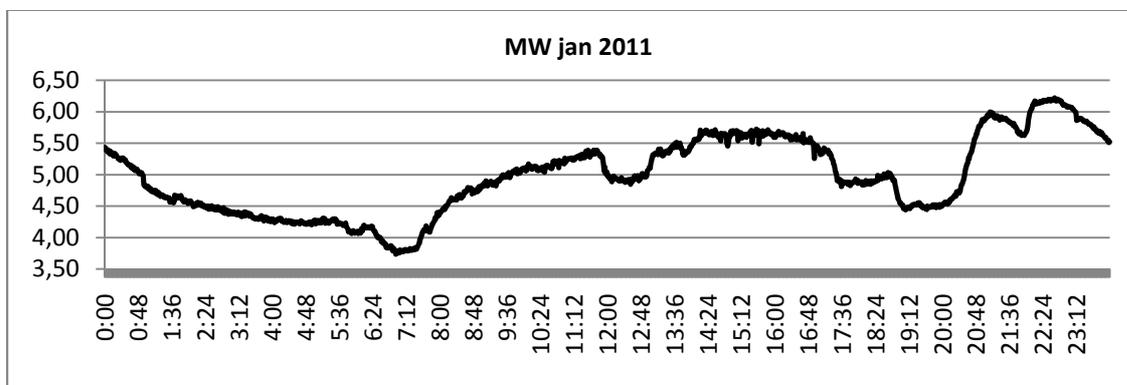


Figura 28 – Curva da demanda ativa média diária do AL03 (dia típico janeiro 2011).

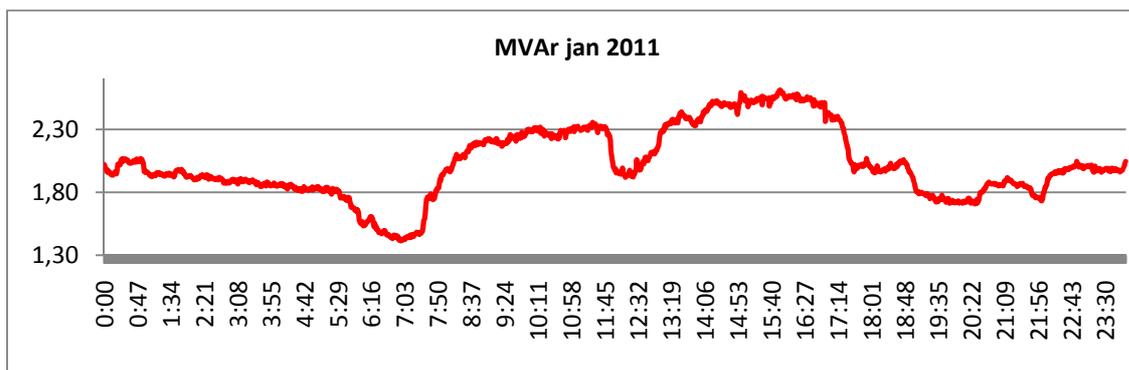


Figura 29 – Curva da demanda reativa média diária do AL03 (dia típico janeiro 2011).

Através dos dados das curvas apresentadas na Figura 28e na Figura 29, realizou-se a modelagem das curvas de demanda ativa e reativa através do *software* PSL®DMS para fazer o estudo das condições apresentada pelo AL03.

A Figura 30e a Figura 31 apresentam as curvas de demanda ativa e reativa modeladas pelo *software*.

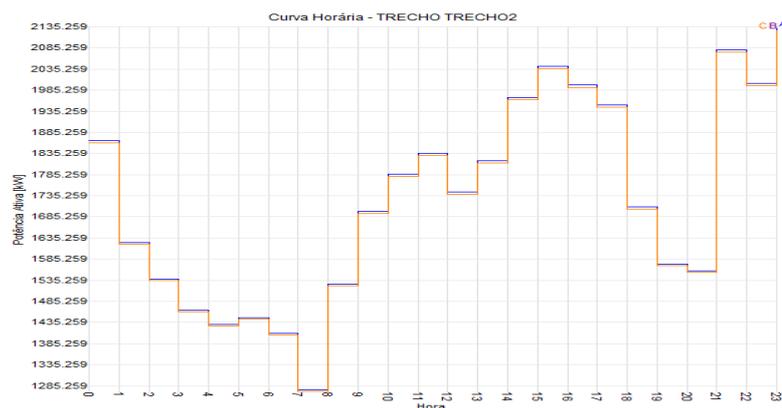


Figura 30 – Curva horária média de demanda ativa, por fase, do AL03 (dia típico - janeiro 2011).

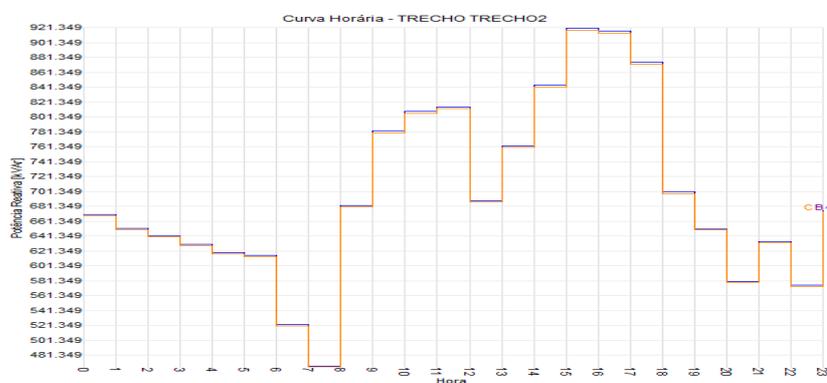


Figura 31 – Curva horária média da demanda reativa, por fase, do AL03 (dia típico - janeiro 2011).

Depois de modeladas as curvas, no *software* de simulação, para validar se os resultados apresentados demonstram a realidade, comparou-se a curva horária de corrente do AL03, medida na SE AR, com a curva horária de corrente do AL03 simulada.

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam as curvas comparadas.

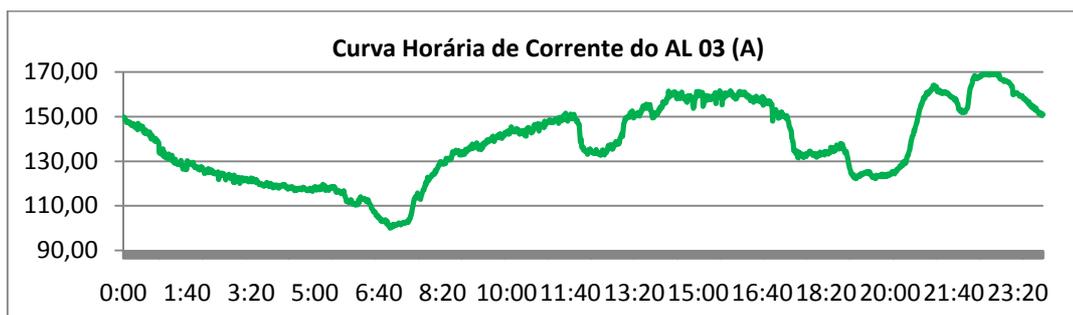


Figura 32 – Curva horária média de corrente do AL03 (dia típico - janeiro 2011).

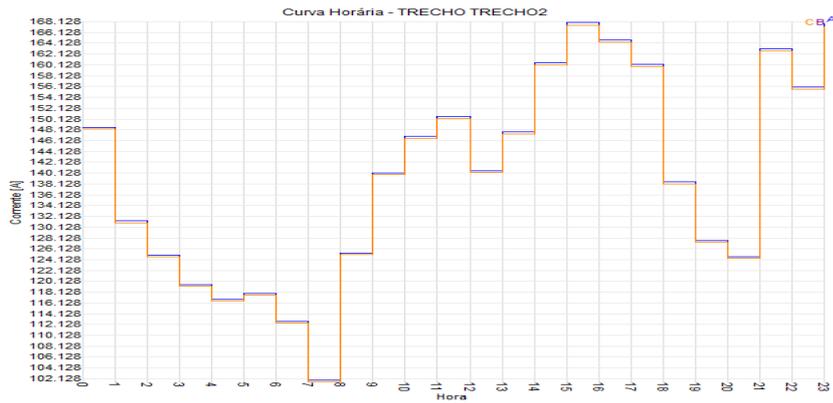


Figura 33 – Curva horária média de corrente por fase do AL03 (dia típico - janeiro 2011)

Comparando a curva da Figura 32 e da Figura 33 pode-se verificar que o resultado da simulação está muito próximo aos valores medidos na SE AR, o que nos dá confiabilidade nos resultados que serão apresentados nas demais simulações a serem realizadas.

Um dos critérios que serão utilizados para definir o momento de despacho da GD AS no AL03 é o percentual do comprometimento do limite térmico do cabo do AL03. Conforme discussões entre os técnicos da concessionária ficou definido que, a partir de 50% de carregamento do cabo, já seria necessário o despacho da GD AS no AL03.

O cabo do AL03 apresenta a seção de 4/0 MCM CAA, o qual possui uma capacidade de condução de corrente de 282 A, para uma temperatura final de 50°C.

A Figura 34 apresenta o percentual de carregamento do cabo do AL03 considerando as medidas de corrente realizadas no mês de janeiro de 2011.

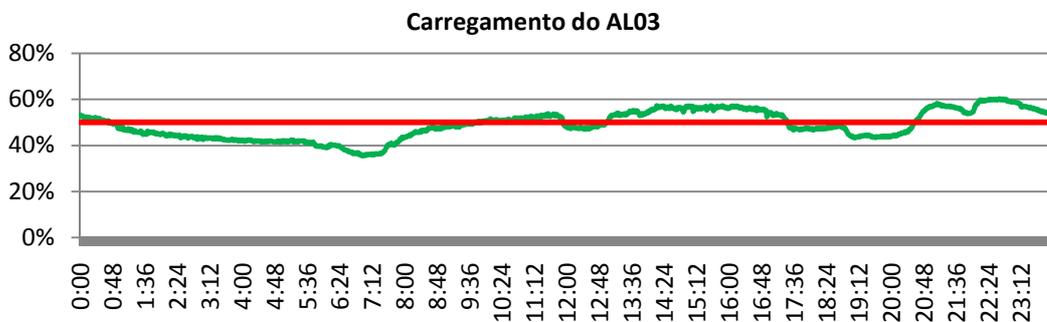


Figura 34 – Curva horária média de carregamento do cabo do AL03 (dia típico janeiro 2011).

Os horários em que a linha verde está ultrapassando a vermelha, indicadora do limite do percentual de 50% de carregamento, indicam os momentos em que seria interessante o despacho da GD AS no AL03.

Outra condição que solicita o despacho da GD AS são as perdas de potência que ocorrem na rede, sendo assim a Figura 35 e a Figura 36 apresentam os resultados das simulações das perdas ativas e reativas que ocorrem neste alimentador.

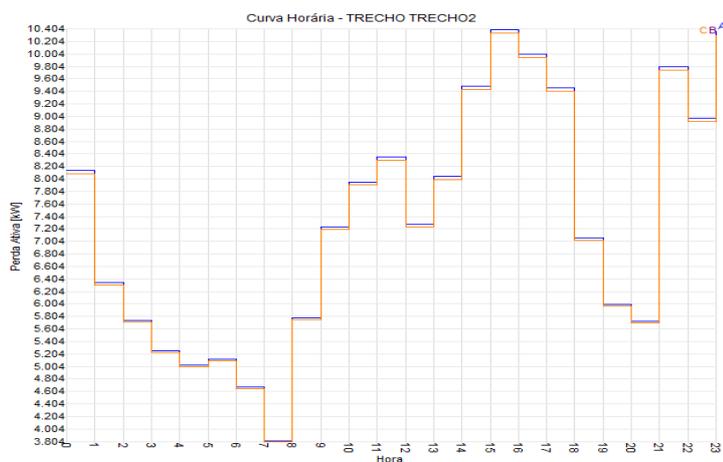


Figura 35 – Curva horária média das perdas ativas, por fase, do AL03 (dia típico janeiro 2011)

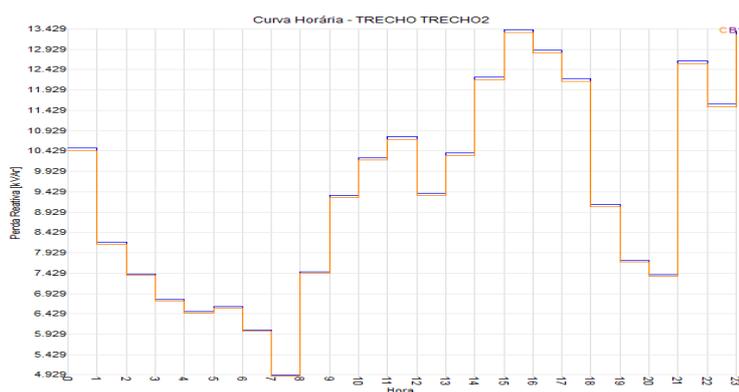


Figura 36 – Curva horária média das perdas reativas, por fase, do AL03 (dia típico janeiro 2011).

Como pode ser observado na Figura 35 e Figura 36, pelo critério perdas de potência não haveria necessidade de despacho de energia para o AL03, pois, nos piores casos as perdas não ultrapassam 0,5% do valor definido (50%).

Para determinar as condições dos NT existentes no AL03, foram realizadas várias simulações em diversos pontos do AL03, e determinaram-se quatro locais onde apresentaram os piores valores de tensão, ao longo de um dia típico do mês de janeiro de 2011.

A Figura 37 apresenta os pontos que possuem os piores níveis de tensão no AL03, assim como as curvas horárias de tensão nestes pontos - Figura 38.

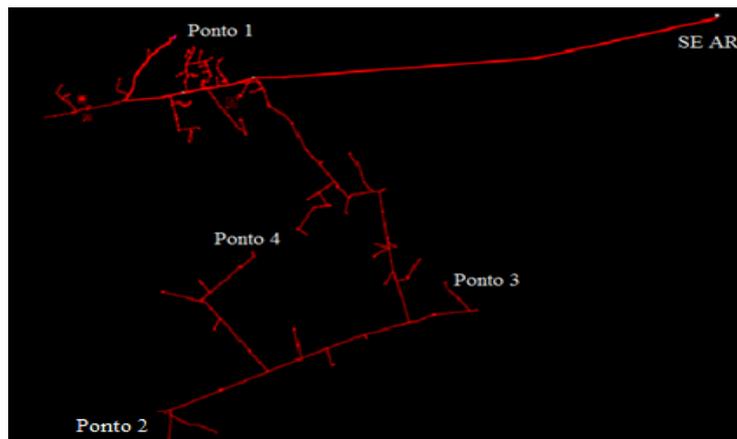


Figura 37 – Ilustração dos 4 pontos críticos do AL03.

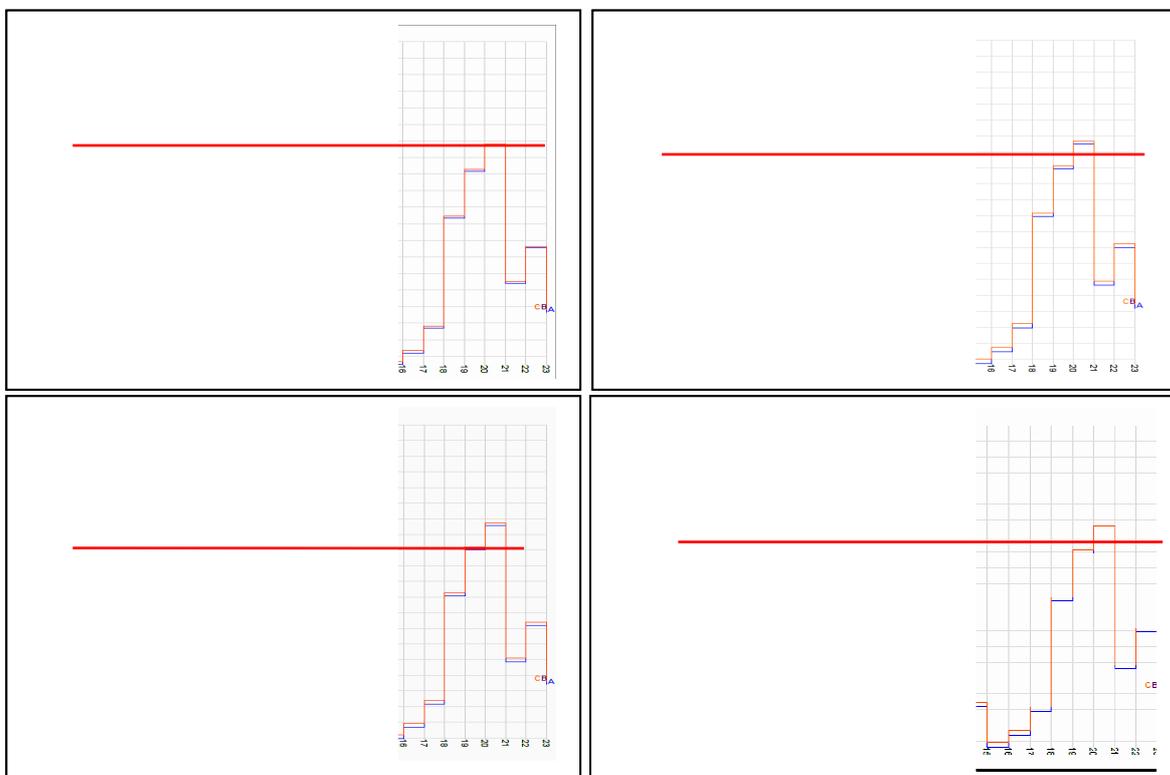


Figura 38 – NT dos 4 pontos considerados como mais críticos do AL03. Ilustração dos níveis de tensão nos 4 pontos mais críticos do AL03.

Conforme mostrado na Figura 38 pode-se notar que todos horários que estão abaixo da linha vermelha apresentaram transgressão aos 7% de queda de tensão, que é nível máximo permitido pelo Módulo 8 do PRODIST (2010).

Condições do AL03 com a GD AS suprindo somente a carga do aterro sanitário – APE.

Nesta parte do diagnóstico, serão apresentadas as condições técnicas do AL03 considerando a GD AS como um APE.

A Figura 39 e a Figura 40 apresentam as curvas horárias de demanda ativa e reativa do AL03 sem a carga do AS.

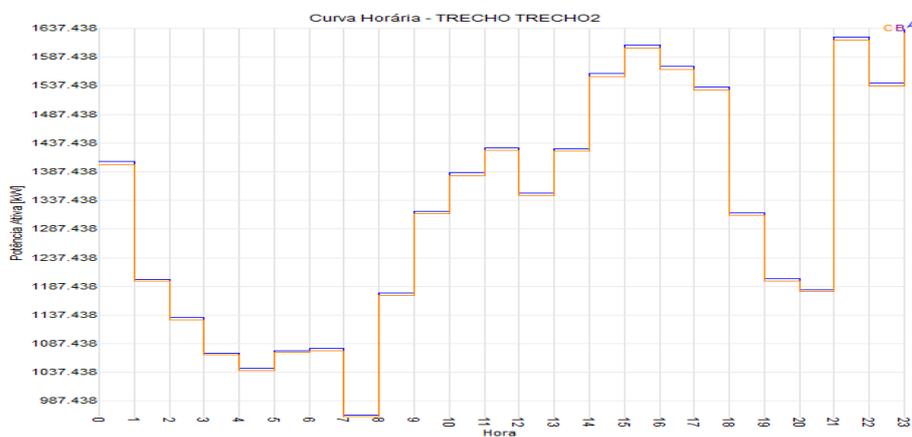


Figura 39 – Curva horária média de demanda ativa, por fase, do AL03.

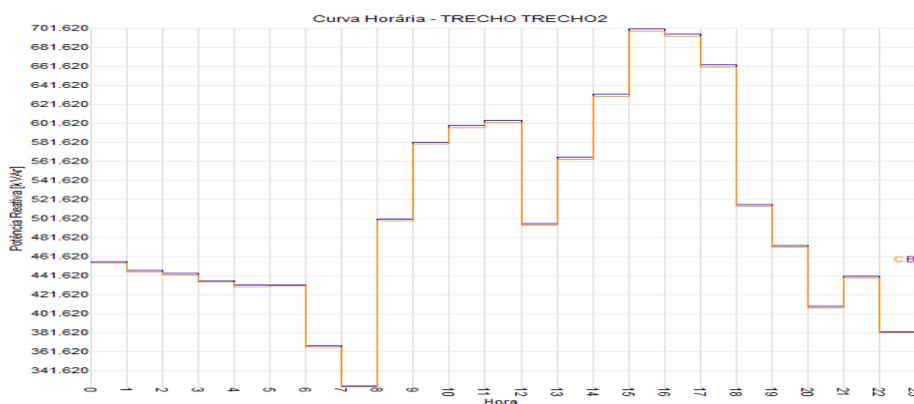


Figura 40 – Curva horária média de demanda reativa, por fase, do AL03.

De acordo com o carregamento do AL03 apresentado na Figura 39 e na Figura 40, simulou-se o comportamento da curva horária de corrente do AL03.

A Figura 41 apresenta a curva horária de corrente na saída do AL03.

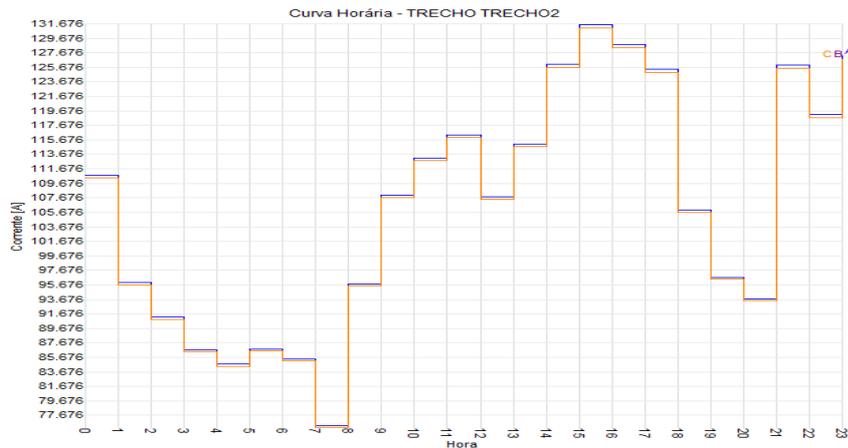


Figura 41 – Curva horária média de corrente, por fase, do AL03

Como foi abordado anteriormente, um dos critérios que serão utilizados para definir os momentos de despacho da GD no AL03 é o C_{icc} do AL03, cujo valor estabelecido pelos técnicos da concessionária é de 50% do valor nominal da corrente na saída da subestação.

A Figura 42 apresenta o percentual de carregamento do cabo do AL03 considerando a curva horária de corrente do mesmo, apresentada na Figura 41.

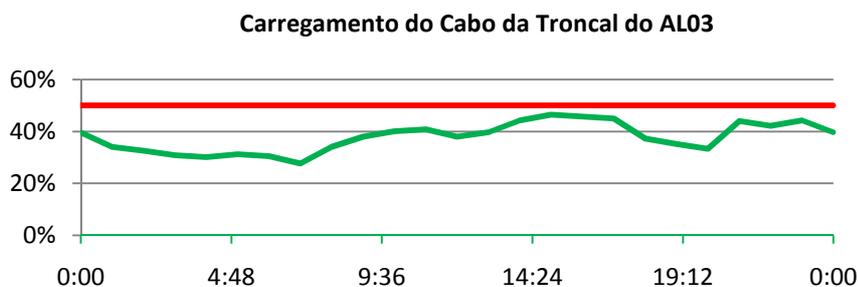


Figura 42 – Carregamento percentual do cabo do AL03.

Na Figura 42 verifica-se que o carregamento do cabo do AL03 em nenhum momento ultrapassa a faixa de 50% de utilização do limite térmico do cabo para uma temperatura final do condutor de 50°C .

Outra condição de necessidade da GD AS despachar energia elétrica ao alimentador são as perdas de potência que podem ocorrer no mesmo. A Figura 43 e a Figura 44 apresentam os resultados das simulações das perdas ativas e reativas que ocorrem.

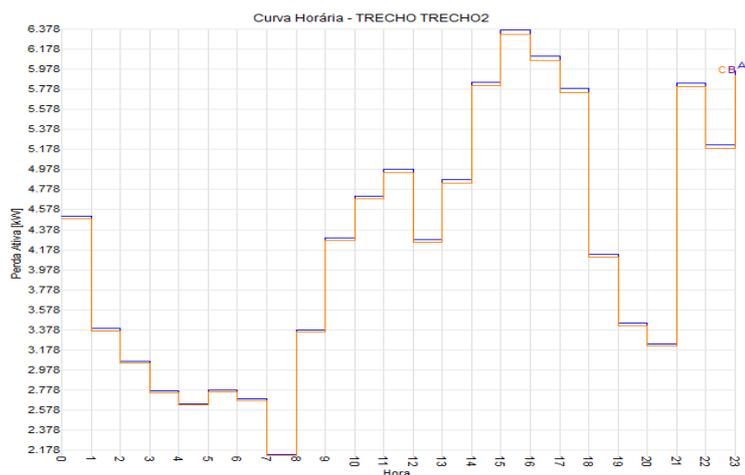


Figura 43 – Curva horária média de perdas ativas por fase do AL03.

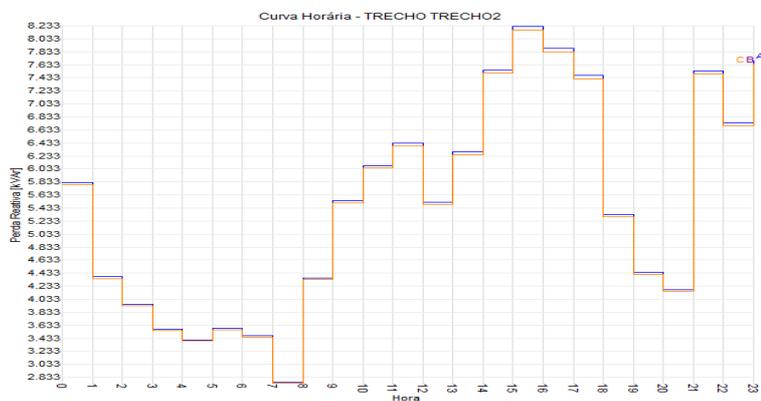


Figura 44 – Curva horária média de perdas reativas, por fase, do AL03.

Para determinar as condições dos níveis de tensão existentes neste alimentador, simulou-se os NT nos 4 pontos em que os níveis de tensão transgridem a norma estabelecida pelo PRODIST (2010), ao longo de um dia típico do mês de janeiro de 2011.

A Figura 45 apresenta os níveis de tensão nos 4 pontos críticos do AL03 ao longo de um dia típico de janeiro de 2011. Pode-se notar que em todos horários que estão abaixo da linha vermelha houve transgressão aos 7% de queda de tensão.

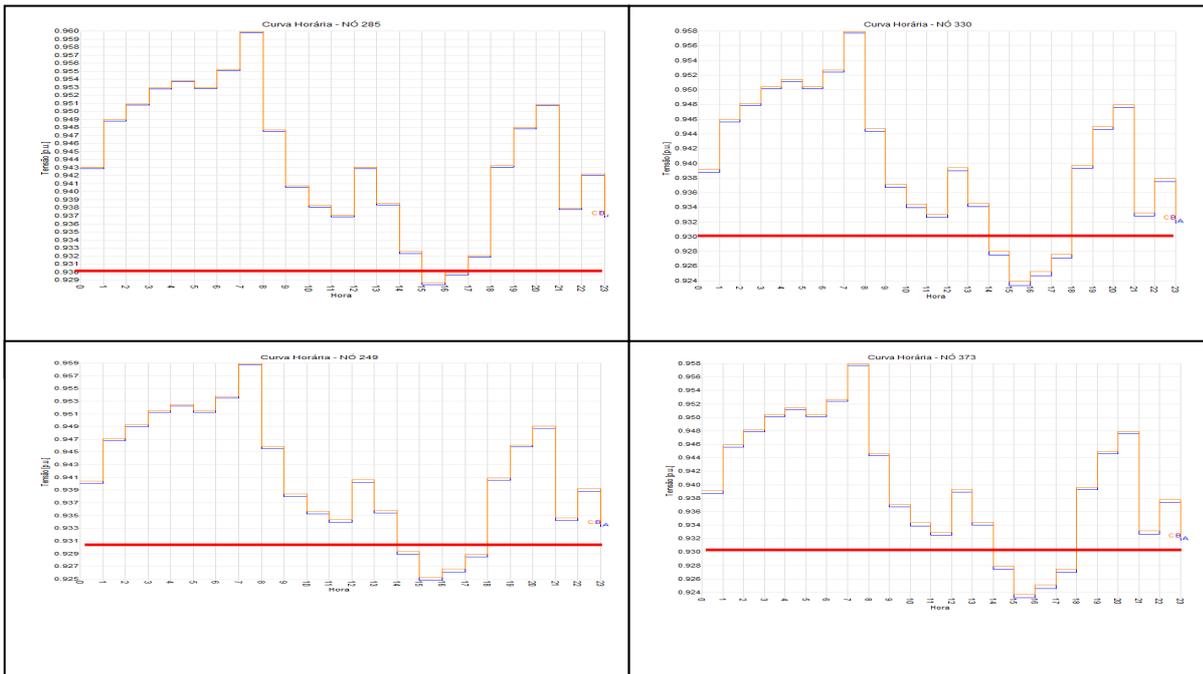


Figura 45 – NT nos 4 pontos considerados mais críticos do AL03, com a GD AS inserida como APE.

Análise dos resultados

As comparações entre os valores característicos do AL03, com e sem a carga do aterro inserida na rede de distribuição, aponta para as seguintes conclusões em relação aos critérios para o despacho:

- Percentual de carregamento dos cabos do AL03: Para este critério estabeleceu-se que, a partir de 50% do carregamento do cabo a GD AS deve despachar energia elétrica para o alimentador. Quando a carga do AL03 for total, incluindo a carga do AS, ocorrem momentos em que o percentual de carregamento atinge 60%, ratificando a necessidade do despacho da GD AS. Porém quando a GD AS supre a carga do aterro sanitário, o percentual de carregamento do cabo do AL03 nunca atinge o valor do patamar mínimo de 50% de carregamento, sendo assim este critério não implica em despacho da GDAS no AL03;
- Níveis de tensão ao longo do AL03: Neste critério estabeleceu-se que, se os níveis de tensão, em qualquer ponto do AL03, ultrapassarem 7% de queda, haverá necessidade de que a GD AS despache energia elétrica para o AL03.

Quando a SE AR estiver alimentando a carga do aterro sanitário, os 4 pontos indicados neste estudo se apresentam com transgressões em torno de 80% do dia, com níveis de tensão abaixo de 7%, chegando em alguns momentos do dia a 10%. Com a GD AS suprindo a carga do AS, os pontos indicados neste estudo ultrapassam o limite de 7% de queda de tensão em 16% do dia, sendo que a queda máxima atinge 7,6% de queda de tensão, ou seja, 0,6% além do admitido pelo PRODIST (2010) – Módulo 8.

Conclusões

Através das comparações dos resultados obtidos nas simulações no AL03, a plena carga e sem o despacho da GD AS e o AL03 sem a carga do aterro e com a GD AS suprindo a carga do mesmo, sem despachar energia elétrica para a rede de distribuição da concessionária, pode-se concluir que o valor mínimo do critério carregamento do cabo do AL03 não será atingido quando a GD AS estiver suprindo a carga do aterro sanitário, sendo assim, para este critério não haverá necessidade do despacho de energia elétrica da fonte de GD AS para o AL.

Já para o critério nível de tensão ao longo do AL03 somente em 16% do tempo do dia este critério será ultrapassado e haverá necessidade do despacho de energia elétrica da GD para o AL, e como o percentual máximo de queda de tensão atingido nestes 16% do tempo é de 7,6%, ou seja, 0,6% além do valor mínimo para que a GD AS despache energia elétrica para o AL, será necessária a injeção de uma pequena quantidade de energia elétrica à rede, quantidade esta necessária apenas para segurar a tensão no ponto de conexão da GD.

Para o critério perda de potência nunca houve transgressão e o AL03 se mostra com perdas na faixa de 0,5%.

APÊNDICE B - DIAGNÓSTICO DO DESPACHO CONTÍNUO DA GD AS AO AL03.

Este apêndice trata das análises realizadas com o PSL®DMS para simulação das condições técnicas do AL03 com a GD AS em despacho contínuo.

A Tabela 22 apresenta os dados da curva de carga do AS, da potência gerada e despachada pela GD AS ao AL03 no período horário de 24h.

Tabela 22 – Dados da curva de carga do AS, da potência gerada pela GD AS e o valor da potência despachada para o AL03.

Período	Curva de Carga do AS	GD AS		Período	Curva de Carga do AS	GD AS	
		Curva de Geração	Despacho para o AL03			Curva de Geração	Despacho para o AL03
Horas	kW	kW	kW	Horas	kW	kW	kW
0:00	1238	6000	4762	12:00	1063	6000	4937
1:00	1159	6000	4841	13:00	1051	6000	4949
2:00	1110	6000	4890	14:00	1089	6000	4911
3:00	1082	6000	4918	15:00	1148	6000	4852
4:00	1065	6000	4935	16:00	1131	6000	4869
5:00	1026	6000	4974	17:00	1104	6000	4896
6:00	914	6000	5086	18:00	1062	6000	4938
7:00	879	6000	5121	19:00	1018	6000	4982
8:00	957	6000	5043	20:00	1032	6000	4968
9:00	1021	6000	4979	21:00	1227	6000	4773
10:00	1071	6000	4929	22:00	1233	6000	4767
11:00	1092	6000	4908	23:00	1323	6000	4677

Fonte: MicroSoft Excel®.

A Figura 46 e a Figura 47 apresentam as curvas da corrente no cabo da troncal do AL03 sem despacho da GD AS e com a mesma efetuando o despacho.

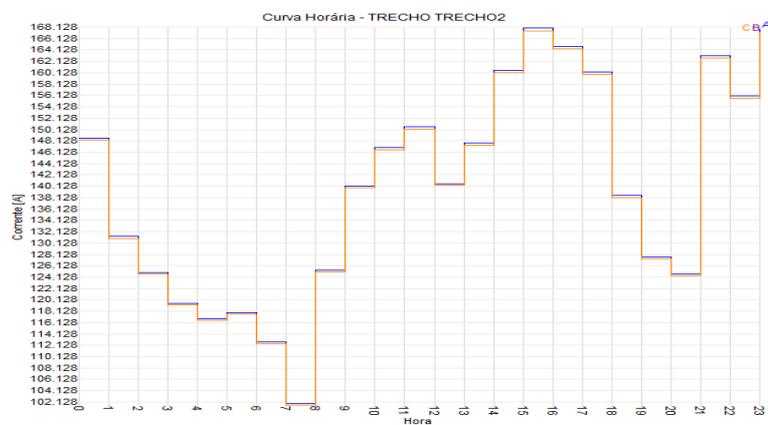


Figura 46 – Curva da corrente na troncal do AL03 sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS

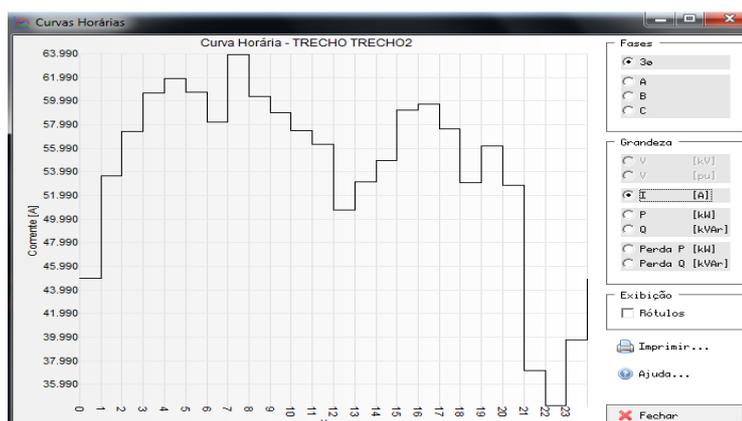


Figura 47 – Curva da corrente na troncal do AL03 com a GD AS despachando energia. Fonte: PSL®DMS.

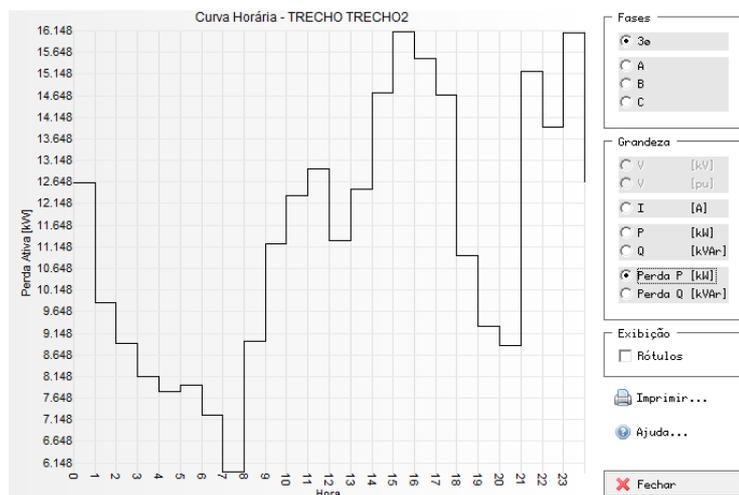


Figura 48 – Perdas acumuladas no AL03 sem o despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

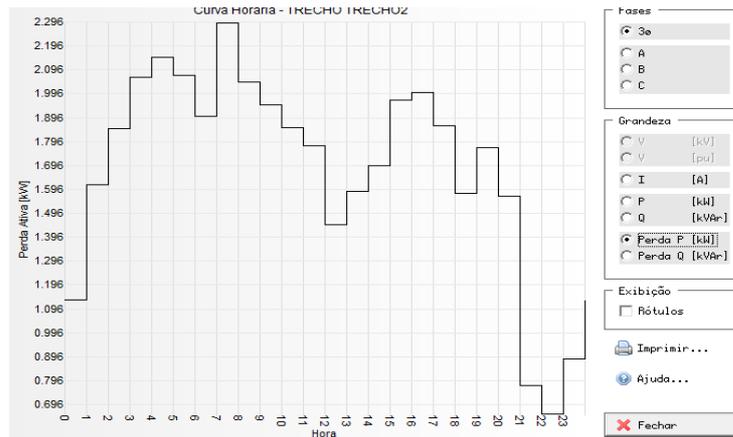


Figura 49 – Perdas acumuladas no AL03 com a GD AS despachando. Fonte: PSL®DMS.

A Figura 50, a Figura 51, a Figura 52 e a Figura 53 apresentam os níveis de tensão, ao longo do dia, com a GD AS despachando para o AL03 nos 4 pontos mais críticos deste AL.

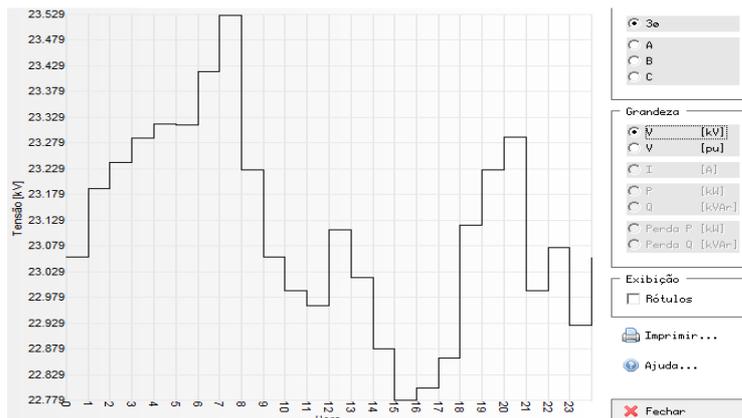


Figura 50 – Níveis de tensão no ponto crítico 1. Fonte: PSL®DMS.

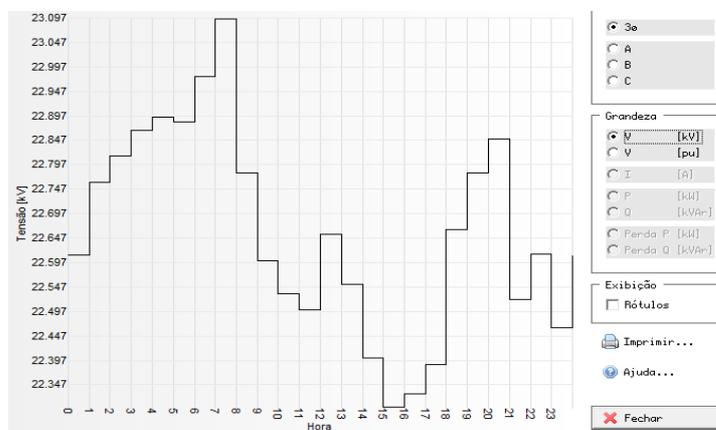


Figura 51 – Níveis de tensão no ponto crítico 2. Fonte: PSL®DMS.

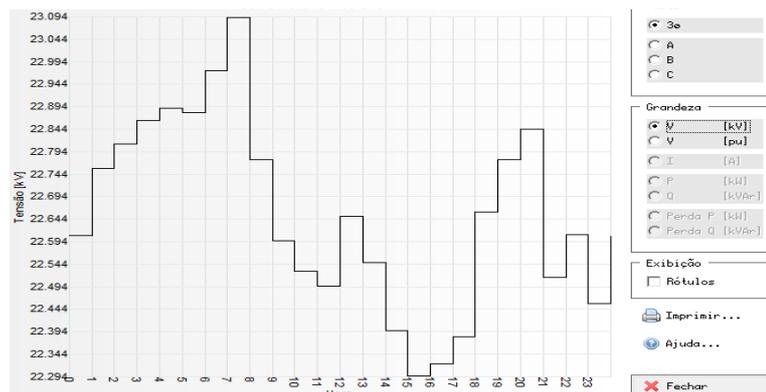


Figura 52 – Níveis de tensão no ponto crítico 3. Fonte: PSL®DMS.

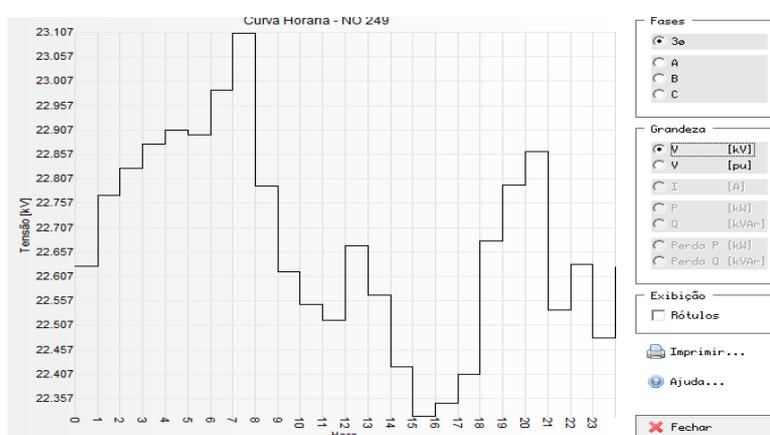


Figura 53 – Níveis de tensão no ponto crítico 4. Fonte: PSL®DMS.

As curvas da figura 56 e da figura 57 apresentam a potência ativa no AL03, na barra da SE AR sem o despacho da GD AS e com a mesma despachando, respectivamente.

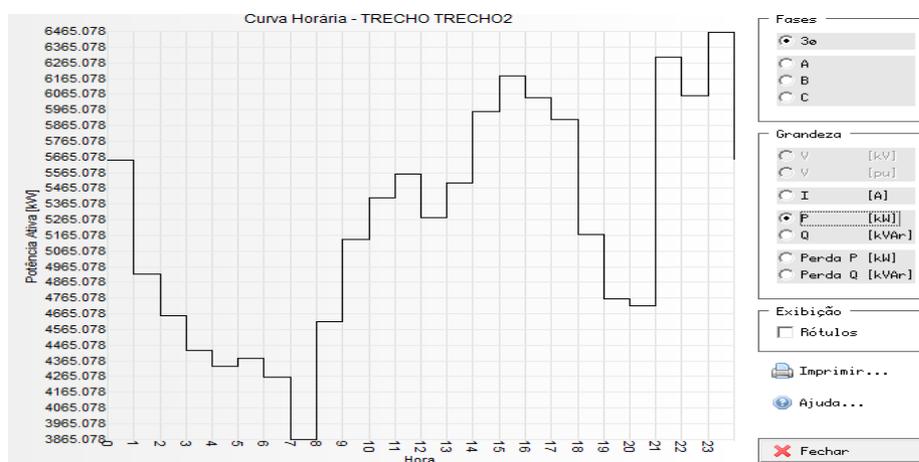


Figura 54 – Curva da potência ativa na barra da SE AR sem despacho da GD AS.

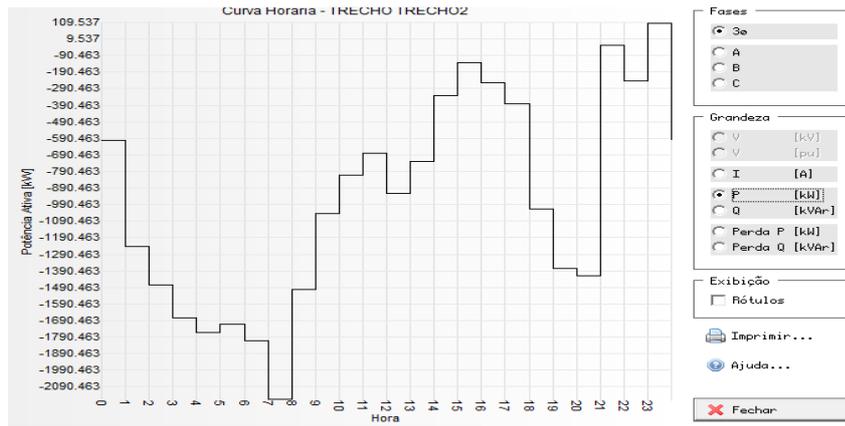


Figura 55 – Curva da potência ativa na barra da SE AR com despacho da GD AS.

APÊNDICE C - DIAGNÓSTICO DO DESPACHO DA GD AS AO AL03 PELO *RANKING* DA METODOLOGIA.

Este apêndice mostra as análises realizadas com o PSL®DMS para simulação das condições técnicas do AL03 com a GD AS despachando em função do *ranking*.

A Tabela 23 apresenta a curva de geração e despacho da GD AS ao AL03 baseada no *ranking* definido pela metodologia.

Tabela 23 – Demonstrativo das curvas de geração e despacho da GD AS ao AL03.

Período	Curva de Carga do AS	GD AS		Período	Curva de Carga do AS	GD AS	
		Curva de Geração	Despacho para o AL03			Curva de Geração	Despacho para o AL03
Horas	kW	kW	kW	Horas	kW	kW	kW
0:00	1238	6000	6000	12:00	1063	0	0
1:00	1159	0	0	13:00	1051	0	0
2:00	1110	0	0	14:00	1089	6000	6000
3:00	1082	0	0	15:00	1148	6000	6000
4:00	1065	0	0	16:00	1131	6000	6000
5:00	1026	0	0	17:00	1104	6000	6000
6:00	914	0	0	18:00	1062	6000	6000
7:00	879	0	0	19:00	1018	0	0
8:00	957	0	0	20:00	1032	0	0
9:00	1021	0	0	21:00	1227	6000	6000
10:00	1071	6000	6000	22:00	1233	6000	6000
11:00	1092	6000	6000	23:00	1323	6000	6000

Fonte: Microsoft Excel®.

A Figura 56 e a Figura 57 apresentam as curvas de corrente na troncal do AL03 sem e com o despacho da GD AS, respectivamente.

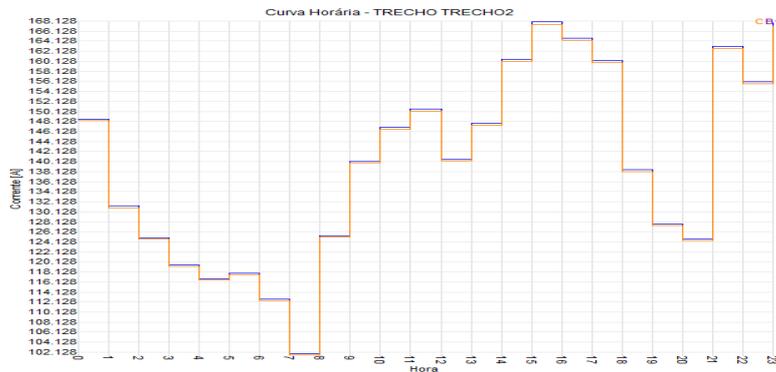


Figura 56 – Curva de corrente na troncal do AL03 sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

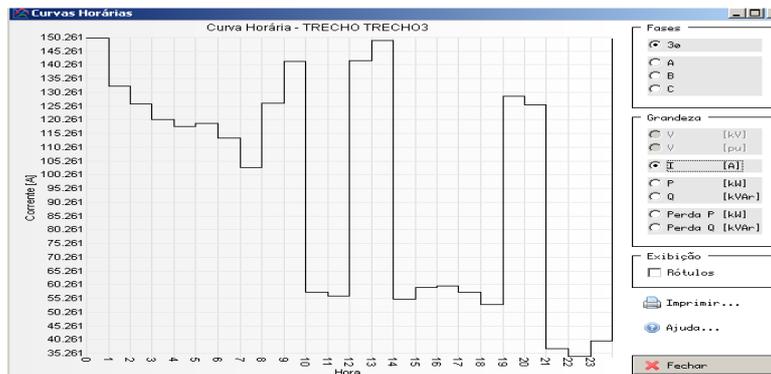


Figura 57 – Curva de corrente na troncal do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

A Figura 58 e a Figura 59 apresentam as curvas das perdas acumuladas no AL03 sem e com o despacho da GD AS, respectivamente.

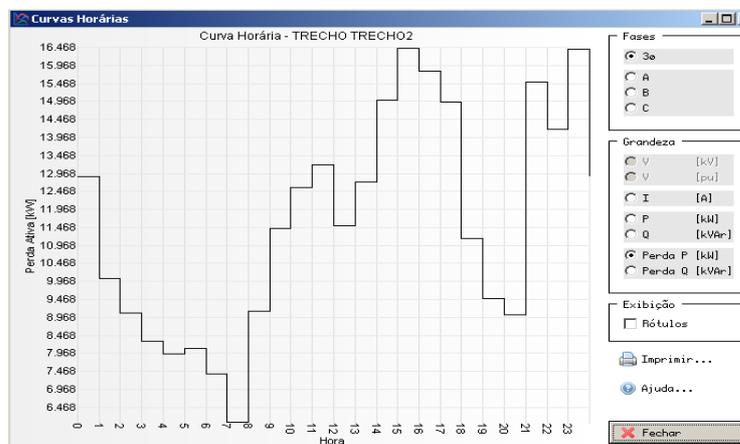


Figura 58 – Perdas acumuladas no AL03 sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

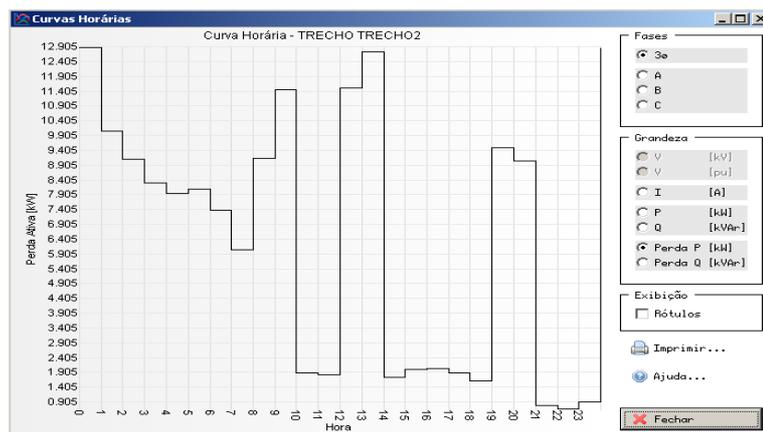


Figura 59 – Perdas acumuladas no AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

A Figura 60, Figura 61, Figura 62 e a Figura 63 mostram os níveis de tensão nos quatro pontos mais críticos do AL03.

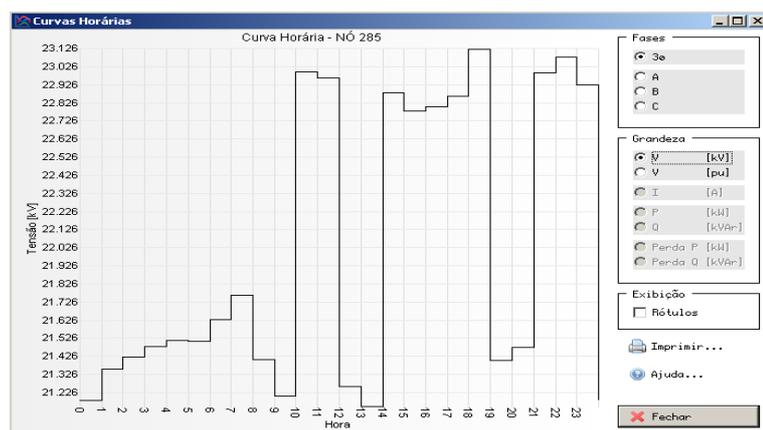


Figura 60 – Níveis de tensão no ponto crítico 1 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

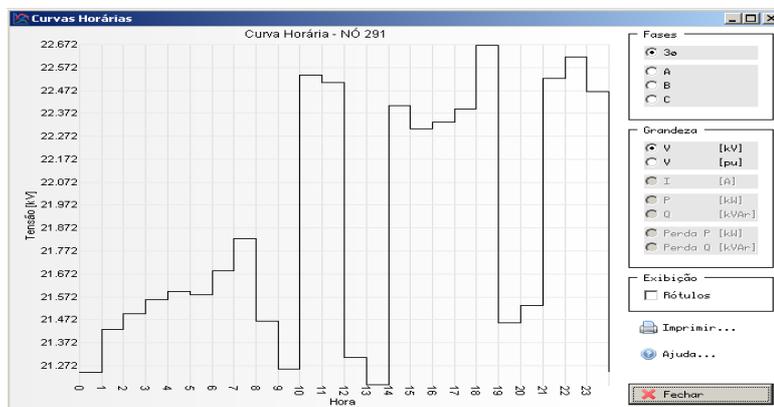


Figura 61 – Níveis de tensão no ponto crítico 2 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

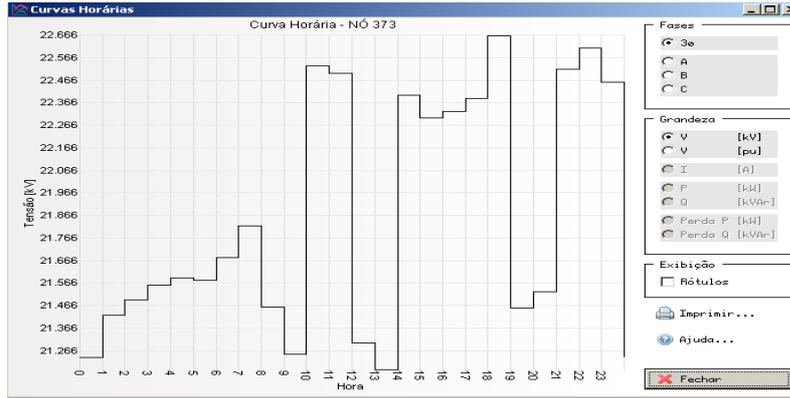


Figura 62 – Níveis de tensão no ponto crítico 3 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

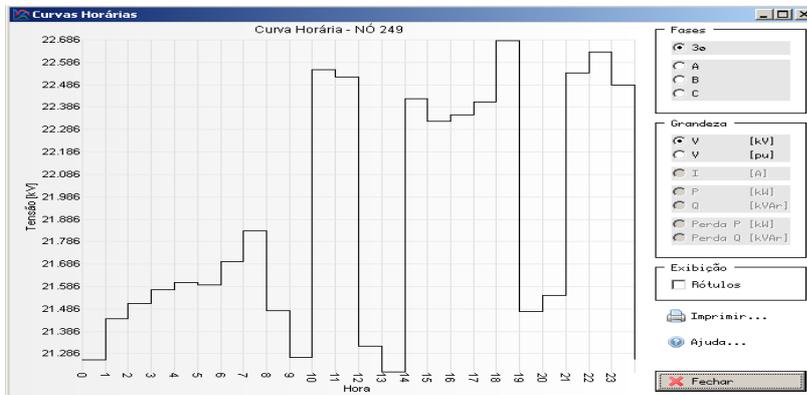


Figura 63 – Níveis de tensão no ponto crítico 4 do AL03 com despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS

A Figura 64 e a Figura 65 apresentam as curvas de carga do AL03 sem e com despacho da GD AS.

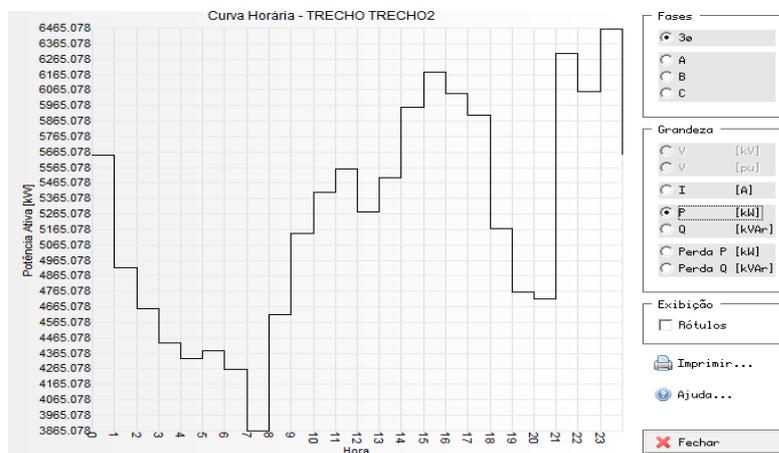


Figura 64 – Curva de potência ativa do AL03 (barra da SE AR) sem despacho da GD AS. Fonte: PSL®DMS.

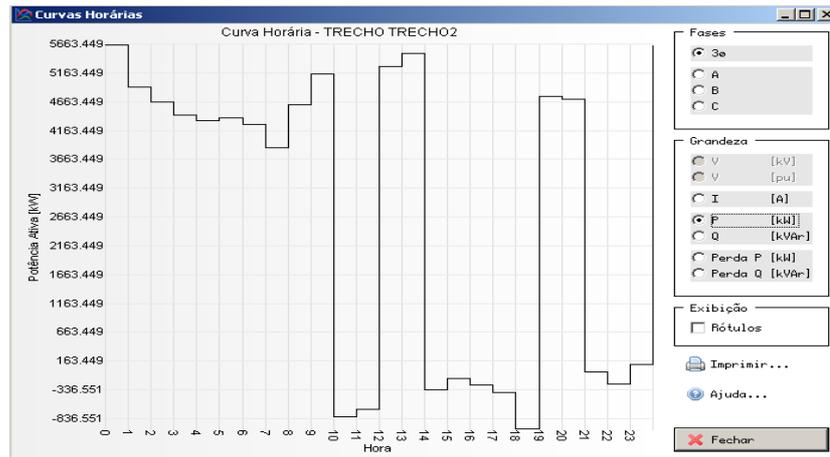


Figura 65 – Curva de potência ativa do AL03 (barra da SE AR) com despacho da GD AS.
Fonte: PSL®DMS.

ANEXO A - MODELOS NUMÉRICOS PARA O CÁLCULO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E DA POTÊNCIA QUE PODE SER GERADA.

Em Borba (2006), são descritos os três modelos utilizados para a geração de biogás os quais serão descritos a seguir:

- Usepa (*United States Environmental Protection Agency*);
- Banco Mundial;
- Ipcc (*International Panel On Climate Change*).

USEPA

Órgão de proteção ambiental dos Estados Unidos que abordam duas metodologias para o cálculo das emissões em sistemas de disposição em aterros, uma sem controle para lixões e outra para controlados. (USEPA AP. 42,1998).

A Equação 15 é utilizada para o cálculo do metano gerado para uma metodologia sem sistema de controle:

$$Q_{CH_4} = L_0 * R * (e^{-k.c} - e^{-k.t}) \quad (15)$$

Sendo:

Q_{CH_4} – metano gerado no ano t ;

L_0 – potencial de geração de metano por tonelada de resíduo depositado;

R – média anual de entrada de lixo no vazadouro (t/ano);

k – taxa de geração de metano (ano⁻¹);

c – anos desde o fechamento, sendo $c = 0$ para os anos ativos;

t – anos desde o início da atividade.

A Tabela 24 apresenta valores sugeridos pela USEPA para os coeficientes k e L_0 , na ausência de dados concretos.

Tabela 24 – Valores sugeridos pela USEPA

Pluviometria anual	> 635 mm	< 635 mm
	k	0,04
L_0	100 m ³ /t	100m ³ /t

Fonte: USEPA AP, 42,1998.

Não sendo conhecido o dado R, média anual de entrada de lixo, o mesmo pode ser estimado pela Equação 16:

$$R = C_v \times n^\circ \text{ anos} \quad (16)$$

Sendo:

C_v a capacidade do vazadouro;

n° anos o tempo de funcionamento do aterro

A variável C_v é dada pela Equação 17:

$$C_v = A_v \times h_{pl} \times d_l \quad (17)$$

Sendo:

A_v a área do vazadouro;

h_{pl} a altura da pilha de lixo;

d_l a densidade do lixo.

Não se conhecendo a densidade do resíduo (d_l), este pode ser estimado por valores definidos na Tabela 25:

Tabela 25 – Estimação da densidade do lixo

Tipo de compactação	Densidade (Kg/m ³)
Lixo compactado	742
Lixo degradado compactado	1068
Sem dados	688

Fonte: USEPA, 1998.

Pode-se estimar a quantidade de dióxido de carbono emitido à atmosfera através da Equação 18, conhecendo-se os percentuais em volume de metano e dióxido de carbono do biogás.

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} * \frac{(\% (V) CO_2)}{(\% (V) CH_4)} \quad (18)$$

Em aterros controlados, supondo um sistema de captação de biogás para produção de energia elétrica deve-se levar em conta a eficiência do sistema. Sabe-se que não é de 100% e se for desconhecido a USEPA sugere o valor de 75%. Outro detalhe a ser levado em conta é o dispositivo de controle ou aproveitamento do gás do aterro. Na Tabela 26 descreve-se a eficiência do sistema de controle.

Tabela 26 – Eficiência do sistema

Dispositivo de controle	Eficiência do dispositivo (%)
Queimador	99,2
Motores de combustão interna	97,2
Caldeiras	98
Turbinas a gás	94,4

Fonte - USEPA 1998.

As emissões podem ser estimadas quando existirem dispositivos de controle e não se dispunham de dados da própria instalação, conforme a Equação 19:

$$CM_{CH_4} = (Q_{CH_4} * (1 - \eta_{COL} / 100)) + (Q_{CH_4} * \eta_{COL} / 100 * (1 - \eta_{CONT} / 100)) \quad (19)$$

Em que:

CM_{CH_4} = emissões controladas de metano (m^3 /ano);

Q_{CH_4} = emissões não controladas de metano obtidas com a equação (1) em m^3 /ano;

η_{COL} = Eficiência do sistema de captação, 75%, valor sugerido;

η_{cont} = Eficiência do dispositivo de controle.

Para o cálculo das emissões de CO_2 utiliza-se a equação 20:

$$CM_{CO_2} = Q_{CO_2} + (Q_{CH_4} \eta_{COL} / 100 * 2,75) \quad (20)$$

Sendo:

CM_{CO_2} = Emissões controladas de CO_2 (m^3 /ano);

Q_{CO_2} = Emissões não controladas de CO_2 obtidas com a Equação (2) em m^3 /ano;

η_{COL} = Eficiência do sistema de captação, 75%, valor sugerido;

2,75 = razão do peso molecular de CO_2 e CH_4 .

Banco Mundial

Esta metodologia segue do modelo *Scholl Canyon*, que é um modelo cinético de primeira ordem com base na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável, no aterro, por unidade de tempo. Este modelo é o mais aceito nas Américas do Sul e do Norte por sua facilidade de aplicação. Tal modelo é exposto pela equação 21.

$$Q_{CH_4} = k * L_0 * m_i * e^{-k.t} \quad (21)$$

Sendo:

$Q_{(CH_4)}$ = Metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo em m^3 / ano;

k = Taxa de geração de metano em anos⁻¹;

L_0 = Potencial de geração de metano em m^3 CH₄ / t resíduo;

m_i = Massa de resíduo despejado no ano i em t / ano;

t_i = tempo de fechamento em anos.

Valores sugeridos para a constante de geração de metano k são apresentados na Tabela 27:

Tabela 27– Valores propostos de k em função das precipitações anuais

Precipitação Anual (mm)	Campo dos valores k		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250	0,01	0,02	0,03
>250 e <500	0,01	0,03	0,05
>500 e <1000	0,02	0,05	0,08
>1000	0,02	0,06	0,09

Fonte - Banco Mundial, 2003.

O valor de L_0 nessa metodologia representa a produção total de metano por tonelada de lixo. Os valores típicos são: $125m^3$ a $300m^3$ de metano/tonelada de resíduo.

Esta metodologia propõe a utilização de $L_0 = 170m^3$, conforme Tabela 28.

Tabela 28– valores mínimos e máximos para L₀.

Categorização do lixo	Valor mín. para L ₀	Valor máx. para L ₀
Lixo relativamente inerte	5	25
Lixo moderadamente degradável	140	200
Lixo altamente degradável	225	300

Fonte – Banco Mundial 2003.

IPCC

Descreve dois métodos: o simplificado, que tem como base a suposição de que o total de metano se libera durante o ano em que se produz a disposição dos resíduos e o método de decomposição de primeira ordem que gera um perfil de emissões que depende do tempo transcorrido e que reflete as verdadeiras pautas do processo de degradação ao longo do tempo (IPCC, 1996).

Método Simplificado, Equação 22.

$$CH_4(t/ano) = (RSU * RSU_f * L_0 - R(t)) * (1 - OX) \quad (22)$$

Método de Primeira Ordem - Equações 23 e 24:

$$CH_{4ger.}(t/ano) = \sum \left[\left(\frac{A * k * RSU_T(x) *}{RSU_f(x) * L_0(x)} \right) * e^{-k(t-x)} \right] \quad (23)$$

$$CH_{4emit.}(t/ano) = [CH_{4ger.} - R(t)] * (1 - OX) \quad (24)$$

Em que:

t = ano de realização do inventário;

x = ano de contribuição;

$A = (1 - e^{-k})/k$ - fator de normalização para corrigir a soma;

k = constante de geração, ano⁻¹;

$RSU_T(x)$ = total de RSU depositado no aterro x , t/ano;

$RSU_F(x)$ = fração de RSU depositado no aterro x ;

Em que: $RSU_T(x) * RSU_F(x)$, - é a massa de resíduos despejada no ano x , t/ano;

L_0 = potencial de geração de metano (Ton.CH₄/tRSU);

$L_0 = FCM(x) * COD(x) * COD_F * F * 16/12$,

$FCM(x)$ = fator de correção do metano no ano x ;

$COD(x)$ = fração de carbono orgânico degradável no ano x (tC/tRSU);

COD_F = fração de carbono orgânico que realmente se degrada ou que é assimilado;

F = fração de metano no gás do aterro, na ausência de dados pode-se usar 0,5%;

16/12 = conversão de carbono a metano;

$R(t)$ = quantidade de metano recuperado no ano t ;

OX = fator de oxidação que reflete a quantidade de metano procedente de aterros que se oxida no solo e que cobrem os resíduos.

Determinação do fator de correção para o metano – FCM (fonte CETESB, 2002): Para aterros controlados o FCM tem o valor 1 e para aterros não controlados o valor depende da altura da pilha de disposição, ou seja:

- maior ou igual a 5 m – 0,8;
- menor que 5 m – 0,4;
- locais sem classificação – 0,6.

Se a constante de geração k , que representa a velocidade de degradação da matéria orgânica não for especificada, o valor adotado é de 0,05.

O carbono orgânico degradável acessível para a decomposição bioquímica dos resíduos apresenta valores diferentes conforme o tipo de resíduo, conforme Tabela 29.

Tabela 29– Valores de COD para tipos diferentes de materiais

Componente	% de COD em massa
A – papel, papelão e tecidos	40
B – resíduos de parques e jardins	17
C – restos de alimentos	15
D - madeira	30

Fonte – IPCC (1996).

Para calcular o COD_x utiliza-se a Equação 25.

$$\text{COD}(x) = 0,4A + 0,17B + 0,15C + 0,3D \quad (25)$$

Caso não forem conhecidas as frações dos resíduos, o IPCC recomenda um valor de 12% para o COD. O valor de COD_F, que corresponde à fração do carbono orgânico que realmente se degrada, na ausência de valores, o IPCC propõe um valor de 77%. Como não apresentam valores internacionalmente aceitos, assume-se o valor zero.

ANEXO B – METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE DESPACHO DA GD AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO – ESTIMATIVA DE ESPECIALISTAS.

Análise qualitativa e estimativa de especialistas

Esta parte do trabalho apresenta a metodologia em que os AD avaliam os SA's que podem ser aplicados quando do despacho da GD ao sistema de distribuição e aplicam notas a estes critérios em função da análise de sua importância ao sistema. Os AD também impõem pesos aos SA em função do período horário baseado nas características da curva de demanda do AL. A Tabela 30, apresenta as notas apontadas pelos AD que podem variar de 0 a 10, conforme a importância dada por cada um dos especialistas aos SA's (X_i a X_n).

Tabela 30– Notas dos critérios atribuídas pelos AD.

Critérios	Notas AD ₁	...	Notas AD _n
X_i			
X_j			
.			
X_n			

Fonte: Canha 2004.

Para tornar o trabalho dos AD menos complicado, em função da definição das estimativas dos itens, muitas vezes é necessário fazer uso de comparações aos pares dos critérios X_n , na qual cada especialista deve definir sua preferência. Para definir os valores dos critérios utiliza-se de uma forma numérica apresentada na Equação 26 (CANHA, 2004).

$$\begin{aligned}
 X_i \succ X_j &\rightarrow x_{ij} = 1,5; x_{ji} = 0,5 \\
 X_i \approx X_j &\rightarrow x_{ij} = x_{ji} = 1
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Após a definição dos valores, aos pares, que servirão de dados para o cálculo da estimativa média que contempla o voto dos AD, incluem-se os valores na Tabela 31.

Tabela 31– Ordenação dos critérios por ordem de importância.

Pares de comparações	AD₁	AD_n
$X_i - X_j$	x_{ij}	x_{ij}
$X_i - X_n$	x_{in}	x_{in}
.. - ..		
$X_j - X_n$	x_{jn}	x_{jn}

As estimativas médias dos AD, representadas pelos coeficientes k_1 e k_2 são calculados pelas Equações 27 e 28:

$$k_1 = \frac{\sum X_{ij}}{n} \quad (27)$$

Em que:

X_{ij} representa a comparação do critério i sobre o j e n é o número de AD.

Os valores dos coeficientes k_2 , quando a análise segue a equação 26, podem ser efetuados pela Equação 28 (BARIN, 2007 apud CANHA, 2004).

$$k_2 = 2 - k_1 \quad (28)$$

Tabela 32 – Importância dos critérios com valores dos coeficientes k_1 e k_2 .

Pares de comparações	AD ₁	AD _n	k_1	k_2
$X_i - X_j$	x_{ij}	...		
$X_i - X_n$	x_{in}	...		
... - ...				
$X_j - X_n$	x_{jn}	...		

Calculados os valores dos coeficientes k_1 e k_2 , faz-se a comparação entre os parâmetros utilizando-se do seguinte artifício: as células que ficam acima da diagonal da matriz principal são completadas com os dados dos coeficientes k_1 e as células que ficam abaixo são completadas com os valores dos coeficientes k_2 , todos extraídos da Tabela 33.

Tabela 33– Prioridade dos critérios

Parâmetros	X_i	X_j	...	X_n	Σ	k_p
X_i	xxxx					
X_j		xxxx				
...			xxxx			
X_n				xxxx		

Para completar o preenchimento da Tabela 33, determinam-se os valores dos somatórios das linhas e calculam-se os valores do coeficiente de prioridade para cada critério k_p , conforme Equação 29 (BARIN, 2007 apud CANHA, 2004).

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^p k_i}{p(p-1)} \quad (29)$$

A variável p indica o número de parâmetros do critério que devem ser comparados.

Nesta parte do trabalho, os AD determinam as notas para cada um dos 3 critérios qualitativos por eles definidos, em função do período horário de 24 horas que é dividido em 5 patamares, considerados relevantes pelos técnicos da concessionária de energia e analisados na curva de demanda do AL. Na Tabela 34 está representado um esboço do que foi citado anteriormente.

Tabela 34– Notas aplicadas pelos AD aos critérios qualitativos em função dos patamares de tempo selecionados.

Período	AD	X_i	X_j	X_k	...	X_n
	1					
a - b	2					
	3					
	4					
Médias do período a-b						
	1					
c-d	2					
	3					
	4					
Médias do período c-d						
.						
.						
.						
	1					
n-(n+1)	2					
	3					
	4					
Médias do período n-n+1						

Cada média das notas mostradas na Tabela 34 é multiplicada pelos coeficientes k_p de cada critério - Tabela 33, que darão origem à estimativa do nível de influência de cada um dos critérios em relação aos períodos considerados - Tabela 35.

Tabela 35– Estimativa horária das prioridades dos critérios.

Período (hora)	$X_i * K_p$...	$X_n * K_p$	Σ	$P_{j cq}$
1		...			
.					
.		...			
.					
n		...			

O somatório das prioridades de cada critério, em função do horário, passa por um processo usual de normalização, mostrado nas Equações 30 e 31, os quais definem a prioridade final dos critérios qualitativos (P_{fcq}) (CANHA, 2004).

$$\mu_j(x) = \left[\frac{F_j(x) - \text{mín}F_j(x)}{\text{máx}F_j(x) - \text{mín}F_j(x)} \right] \quad (30)$$

A Equação 30 é utilizada para a maximização dos valores da função objetivo e a 31 para a minimização.

$$\mu_j(x) = \left[\frac{\text{máx}F_j(x) - F_j(x)}{\text{máx}F_j(x) - \text{mín}F_j(x)} \right] \quad (31)$$

Nas equações acima, o termo $\mu_j(x)$ representa o valor normalizado para a prioridade final de cada critério qualitativo no período de tempo estabelecido; F_j representa o valor da prioridade final do critério a ser normalizado.

Depois de aplicada a metodologia, estes critérios são avaliados de forma conjunta com os parâmetros quantitativos, na análise final (BARIN, 2007 apud CANHA, 2004).

Análise final

Nesta etapa do trabalho será definido o *ranking* final (X^0) dos melhores horários para o despacho da GD ao sistema de distribuição, demonstrado pela Equação 32.

$$X^0 = \arg. \text{máx } Y(x) \quad (32)$$

Sendo $Y(x)$ o índice final, que pode ser representado pelo valor do operador mínimo, ou do operador somatório ou do operador produtivo dos valores horários dos critérios quantitativos (Cq 's) juntamente com o valor da prioridade final dos critérios qualitativos ($P_f Cq$), analisados pelos AD, o *ranking* final, para cada hora, será dados pelo maior valor de $Y(x)$ do critério adotado.

Os três métodos dos operadores citados anteriormente serão descritos a seguir.

5.4.1 Método multicriterial operador mínimo (<)

Neste método, o índice final $Y(x)$ é definido pelo menor valor (arg. mín) horário encontrado entre os pesos dos critérios quantitativos e qualitativos " $u(x)$ ". Este método faz uso da Equação 33.

$$Y(x) = \arg. \text{mín } u(x) \quad (33)$$

5.4.2 Método multicriterial operador produtivo (Π)

Este método é muito semelhante ao anterior, em que $Y(x)$ é definido pela multiplicação entre os valores dos pesos dos critérios quantitativos e qualitativos, conforme Equação 34.

$$Y(x) = \Pi \mu(x) \quad (34)$$

5.4.3 Método multicriterial operador somatório (Σ)

Idêntico aos dois anteriores, em que $Y(x)$ é definido pela soma dos valores dos critérios quantitativos e qualitativos, conforme equação 35.

$$Y(x) = \sum \mu(x) \quad (35)$$

A Tabela 36 apresenta os valores do posicionamento final ou *ranking* X^o para o momento de despacho da GD à rede de distribuição da concessionária. Os índices Cq_1 a Cq_n correspondem aos critérios quantitativos cujos valores são retirados das funções trapezoidais com a aplicação de regras *fuzzy*. O termo P_{jcq} mostra os valores das prioridades finais dos critérios qualitativos definidos pelos AD e $Y(x)$ o índice final escolhido por um dos três critérios mencionados anteriormente.

Tabela 36 – Valores das prioridades dos critérios quantitativos e qualitativos horários e dos índices finais que levam ao *rankiamento* X^o .

Período (h)	Cq_i	...	Cq_n	P_{jcq}	$Y(x)$	X^o
1		...				
....		...				
n		...				