

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

**CONTRIBUIÇÕES À IDENTIFICAÇÃO DE REGIMES  
OPERACIONAIS DE CENTRAIS GERADORAS A  
BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS  
CONECTADAS À REDE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Wagner da Silva Brignol**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2013**

**CONTRIBUIÇÕES À IDENTIFICAÇÃO DE REGIMES  
OPERACIONAIS DE CENTRAIS GERADORAS A  
BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS  
CONECTADAS À REDE**

**Wagner da Silva Brignol**

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

**Orientador: Profa. Dra. Luciane Neves Canha**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2013**

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

Brignol, Wagner da Silva

Contribuições à identificação de regimes operacionais eficientes de centrais geradoras a biogás oriundo de aterros sanitários / Wagner da Silva Brignol.-2013.

95 p.; 30cm

Orientadora: Luciane Neves Canha

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2013

1. Resíduos Sólidos Urbanos 2. Biogás 3. Geração Distribuída 4. Método Multicritério AHP 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**

**CONTRIBUIÇÕES À IDENTIFICAÇÃO DE REGIMES  
OPERACIONAIS EFICIENTES DE CENTRAIS GERADORAS A  
BIOGÁS ORIUNDO DE ATERROS SANITÁRIOS**

Elaborada por  
**Wagner da Silva Brignol**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Luciane Neves Canha, Profa. Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Felix Alberto Farret, Prof. PhD. (UFSM)**

---

**Diego Berlezi Ramos, Prof. Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, 22 de fevereiro de 2013

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Cipriano e Carmen, a  
minha esposa Caroline e a minha filha Maria  
Eduarda.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dr. Luciane Neves Canha, pelo apoio e pelas contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Me. Luiz Fernando Guarenti Martins pela colaboração no desenvolvimento de diversas etapas deste trabalho.

Aos meus pais, que me acompanharam e me incentivaram durante essa etapa da minha vida.

À minha esposa Caroline, pelas dicas, paciência, apoio, incentivo e companheirismo.

À minha filha Maria Eduarda, que ao nascer em meio desta etapa da minha vida, me ensinou o verdadeiro sentido da palavra “Amor”.

## RESUMO

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

### CONTRIBUIÇÕES À IDENTIFICAÇÃO DE REGIMES OPERACIONAIS DE CENTRAIS GERADORAS A BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS CONECTADAS À REDE

AUTOR: WAGNER DA SILVA BRIGNOL

ORIENTADOR: LUCIANE NEVES CANHA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 22 de fevereiro de 2013.

Este trabalho tem por objetivo propor o desenvolvimento de estratégias de definição dos melhores períodos do dia em que uma geração distribuída de energia elétrica (GD), que utiliza como combustível o biogás proveniente de reações químicas de resíduos sólidos urbanos (RSU), depositados em Aterros Sanitários, possa despachar energia elétrica em uma rede de distribuição, de forma a atender os índices de qualidade de energia elétrica (QEE) estabelecidos no PRODIST/ANEEL (2010). Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada a avaliação das características elétricas de uma rede de distribuição (Alimentador), pertencente ao sistema de distribuição da área de concessão da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D), que atende um aterro sanitário localizado na região da Grande Porto Alegre, o qual possui potencial energético para instalação da GD. A metodologia utilizada para definir os melhores regimes operacionais foi a metodologia Multicriterial Analytic Hierarchy Process - AHP, através da utilização do software M-MACBETH. Nesta metodologia foram considerados critérios quantitativos e qualitativos. Os critérios quantitativos são representados por dados reais, que indicam diretamente o valor de cada característica técnica no processo, e estes, sofrem influência direta com a inclusão da GD na rede de distribuição. Os critérios qualitativos são aqueles que apresentam imprecisão em seus valores e/ou dificuldades em sua quantificação, no caso deste trabalho, Serviços Ancilares. Os critérios utilizados neste trabalho foram escolhidos e valorados por Agentes de Decisão (AD) compostos por Especialistas da Distribuidora e pelos Especialistas da GD, que em conjunto, definiram as necessidades e os pesos destes critérios. A avaliação se dá em conjunto com os critérios quantitativos e qualitativos e o resultado é uma classificação (*ranking*) dos horários em que é mais vantajosa a inserção da energia gerada pela GD no sistema.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos. Biogás. Geração Distribuída. Método Multicritério AHP.

## **ABSTRACT**

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

### **CONTRIBUTIONS TO THE IDENTIFICATION OF OPERATING SYSTEMS CENTRAL GENERATING FOR BIOGAS OF SANITARY LANDFILL CONNECTED TO THE NETWORK**

**AUTHOR: WAGNER DA SILVA BRIGNOL**  
**SUPERVISOR: LUCIANE NEVES CANHA**

Data and Place of Defense: Santa Maria, February 22<sup>th</sup>, 2013.

This paper aims to propose the development of strategies for setting the best times of the day when a distributed generation of electricity (GD), which uses the biogas as fuel chemical reactions in urban solid waste, deposited in landfills sanitary, can dispatch electricity as a distribution network in order to meet the quality indices of power (PQ) established in PRODIST / ANEEL (2010). For the development of this work was carried out to evaluate the electrical characteristics of a distribution network (feeder) belonging to the distribution system of the concession area of the State Company for Electric Power Distribution (CEEE-D), which serves a landfill located in the Greater Porto Alegre, which has energy potential for installation of GD. The methodology used to define the best operating systems was the methodology multicriterial Analytic Hierarchy Process - AHP, using the M-MACBETH software. In this methodology were considered quantitative and qualitative criteria. Quantitative criteria are represented by real data, which indicate directly the value of each technical feature in the process, and they suffer direct influence with the inclusion of DG in the distribution network. Qualitative criteria are those with imprecision in their values and / or difficulties in their quantification in the case of this study, Ancillary Services. The criteria used in this study were chosen and valued by agents Decision (AD) composed of Specialists electricity distributor and Specialists by GD, which together defined the needs and the weights of these criteria. The evaluation takes place in conjunction between the quantitative and qualitative criteria and the result is a classification (ranking) of times when it is most advantageous to insert the energy generated by the GD system.

**Keywords:** Urban Solid Waste. Biogas. Distributed Generation. Multicriteria AHP method.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Curvas de geração e coleta de metano em função do tempo do aterro sanitário. ...                            | 18 |
| Figura 2 – Curva Potência x Ano de aterro sanitário. ....  | 19 |
| Figura 3 – Principais formas de produção de hidrogênio. ....   | 26 |
| Figura 4 – Matriz de Julgamentos do método AHP. ....   | 37 |
| Figura 5 – Diferença de importância entre impressoras em relação ao seu design. ....                                   | 42 |
| Figura 6 – Alimentador onde ocorrerá a conexão da GD a biogás de RSU. ....   | 53 |
| Figura 7 – Árvore hierárquica de avaliação. ....   | 54 |
| Figura 8 – Tabela das Alternativas dos horários de conexão da GD. ....   | 55 |
| Figura 9 – Janelas dos critérios com a marcação da base de comparação como “níveis quantitativos de performance”. .... | 55 |
| Figura 10 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério Níveis de Tensão. ....                      | 56 |
| Figura 11 – Matriz de comparação paritária do critério (NT). ....  | 57 |
| Figura 12 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério Ccc. ....                                   | 58 |
| Figura 13 – Matriz de comparação paritária do critério Ccc. ....   | 59 |
| Figura 14 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério FP. ....                                    | 59 |
| Figura 15 – Matriz de comparação paritária critério FP. ....   | 60 |
| Figura 16 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério Perdas Ativas. ....                         | 61 |
| Figura 17 – Matriz de comparação paritária do critério Perdas Ativas. ....   | 61 |
| Figura 18 – Trecho de condutores tronco e ponto de menor perfil de tensão do AL. ....                                  | 62 |
| Figura 19 – Tabela de Performances das alternativas para cada critério. ....   | 64 |
| Figura 20 – Pesos dos critérios de acordo com os julgamentos dos AD. ....  | 65 |
| Figura 21 – Ranking final dos horários de despacho da GD para o AL. ....   | 66 |
| Figura 22 – Árvore hierárquica de avaliação. ....  | 67 |
| Figura 23 – Janelas dos critérios com a marcação da base de comparação como níveis qualitativos de performance. ....   | 68 |
| Figura 24 – Tabela de Performances das alternativas para cada critério. ....   | 70 |
| Figura 25 – Pesos dos critérios de acordo com os julgamentos dos AD. ....  | 71 |
| Figura 26 – Ranking final dos horários de despacho da GD para o AL. ....   | 72 |
| Figura 27 – Alimentador onde ocorrerá a conexão da GD a biogás de RSU. ....  | 85 |
| Figura 28 – Curva da demanda ativa diária do AL03. ....  | 86 |
| Figura 29 – Curva de demanda reativa diária do AL03. ....  | 86 |
| Figura 30 – Curva de demanda ativa diária do AL03. ....  | 87 |
| Figura 31 – Curva de demanda reativa diária do AL03. ....  | 87 |
| Figura 32 – Curva da carga ativa diária do aterro sanitário. ....  | 88 |
| Figura 33 – Curva da carga reativa diária do aterro sanitário. ....  | 88 |
| Figura 34 – Curva da Carga ativa e reativa diária do aterro sanitário. ....  | 89 |
| Figura 35 – Curva de Corrente por fase do AL03. ....   | 89 |
| Figura 36 – Curva de corrente por fase do AL03. ....   | 90 |
| Figura 37 – Curva do percentual Ccc do AL03. ....  | 90 |
| Figura 38 – Curva de Perdas Ativas por fase do AL03. ....  | 91 |
| Figura 39 – Pontos do AL03 para análise dos níveis de tensão (NT). ....  | 92 |
| Figura 40 – Níveis de tensão no Ponto 1. ....  | 92 |
| Figura 41 – Níveis de tensão no Ponto 2. ....  | 93 |
| Figura 42 – Níveis de tensão no Ponto 3. ....  | 93 |
| Figura 43 – Níveis de tensão no Ponto 4. ....  | 94 |

## LISTAS DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação de algumas tecnologias de conversão do biogás em energia elétrica. .... | 26 |
| Tabela 2 – Índice Randômico Médio do AHP. ....  | 40 |
| Tabela 3 – Níveis de tensão e suas faixas de variação ....                                    | 44 |
| Tabela 4 – Classificação dos níveis de perdas de energia em RD. ....                          | 47 |
| Tabela 5 – Resumo do diagnóstico dos Aspectos técnicos e operacionais do AL.....              | 63 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 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;  |
| CEEE-D                               | – Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica;  |
| CH <sub>4</sub>                      | – Gás metano;  |
| CO <sub>2</sub>                      | – Gás carbônico;   |
| Ccc                                  | – Carregamento dos cabos condutores tronco;  |
| EPE                                  | – Empresa de Pesquisa Energética;  |
| GD                                   | – Geração distribuída;   |
| GDL                                  | – Gás de lixo;   |
| h                                    | – Unidade de medida de tempo (hora);   |
| H <sub>2</sub>                       | – Hidrogênio;  |
| 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;   |
| kWh                                  | – Unidade de medida de potência elétrica (quilo Watt hora);  |
| L <sub>0</sub>                       | – Potencial de geração de metano;  |
| m <sup>3</sup> hCH <sub>4</sub> /ano | – Vazão de metano (horas por ano);   |
| MCI                                  | – Motor de combustão interna;  |
| MDL                                  | – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;  |
| MME                                  | – Ministério de Minas e Energia;   |
| MW                                   | – Unidade de potência (mega watt);   |
| NT                                   | – Nível de tensão em regime permanente;  |
| O <sub>2</sub>                       | – Oxigênio;  |
| ONS                                  | – Operador Nacional do Sistema;  |
| PCH                                  | – Usina hidrelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada seja superior a 1MW e inferior a 30MW;   |
| P <sub>kw</sub>                      | – Perdas de potência ativa   |
| PIE                                  | – Produtor Independente de Energia Elétrica;   |
| 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;  |
| QEE                                  | – Qualidade de energia elétrica;   |
| Q <sub>x</sub>                       | – Vazão de metano no ano x;  |

|        |   |
|--------|---|
| RCE    | – Reduções certificadas de emissões;                    |
| RSU    | – Resíduos sólidos urbanos;                             |
| 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;                |
| TL     | – Tensão de Leitura                                     |
| TN     | – Tensão nominal;                                       |
| $V_N$  | – Tensão nominal  |
| x      | – ano atual (ano);                                      |
| $\eta$ | – Rendimento elétrico;                                  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>1.1 Considerações Iniciais .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>1.2 Motivação .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>1.3 Objetivos.....</b>   | <b>15</b> |
| <b>1.4 Organização do trabalho .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2 USO DO BIOGÁS DE RSU COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA E<br/>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.1 Uso do Biogás de RSU como Fonte de Energia Elétrica .....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1.1 Quantidade de biogás produzido em aterros sanitários .....  | 17        |
| 2.1.2 Modelo numérico para cálculo da energia disponível para geração por biogás .....  | 19        |
| <b>2.2 Geração Distribuída a Biogás de RSU.....</b>   | <b>20</b> |
| 2.2.1 Incentivos Internacionais .....   | 20        |
| 2.2.2 Incentivos Nacionais .....  | 23        |
| 2.2.3 Tecnologias para geração de energia elétrica a biogás.....  | 23        |
| <b>2.3 Geração Distribuída .....</b>  | <b>27</b> |
| 2.3.1 GD no Brasil.....   | 28        |
| 2.3.1.1 Vantagens e desvantagens da utilização de GD .....  | 28        |
| 2.3.1.2 Regulamentação.....   | 29        |
| <b>3 METODOLOGIA MULTICRITERIAL .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3.1 Analytic Hierarchy Process - AHP .....</b>   | <b>31</b> |
| 3.1.1 Benefícios, Limitações e Aplicações do AHP.....   | 32        |
| 3.1.2 A Hierarquia .....  | 33        |
| 3.1.3 O Processo de Hierarquização do AHP .....   | 35        |
| <b>3.2 Macbeth .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>4 ASPECTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO<br/>PARA A DETERMINAÇÃO DOS REGIMES OPERACIONAIS DE GD A BIOGÁS<br/>DE RSU.....</b> | <b>43</b> |
| <b>4.1 Tensão em regime permanente.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>4.2 Fator de potência .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>4.3 Perdas de energia ativa e reativa.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>4.4 Carregamento dos cabos condutores tronco (Ccc).....</b>  | <b>47</b> |
| <b>4.5 Serviços Ancilares.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....</b>  | <b>51</b> |
| <b>5.1 Introdução .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>5.2 Estudo de caso.....</b>  | <b>52</b> |
| 5.2.1 Determinação do Regime Operacional da GD AS com Critérios Quantitativos.....  | 54        |
| 5.2.2 Determinação do Regime Operacional da GD AS com Critérios Quantitativos e<br>Qualitativos.....  | 67        |
| <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>74</b> |
| <b>Principais contribuições .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>Perspectivas para trabalhos futuros .....</b>  | <b>76</b> |
| <b>Publicações .....</b>  | <b>77</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>78</b> |

# 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. Esta participação crescente da GD é resultado da busca por maior qualidade, eficiência, confiabilidade e principalmente a sustentabilidade na geração de energia elétrica. Com isso, gerações descentralizadas que fazem uso de fontes primárias renováveis - aproveitamento do biogás de aterros sanitários para geração de energia, por exemplo - surgem como alternativas para diversificação da matriz energética. Tais sistemas de geração podem 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. Em muitos casos, devido à extensa área territorial do País, para transmitir a energia elétrica até os centros de consumo é necessária a construção de longas linhas de transmissão e extensos alimentadores de distribuição que, em sua maioria, estão sujeitos a toda a sorte de problemas operacionais. No caso dos sistemas de distribuição, a grande ramificação das redes e a presença de alimentadores bastante longos, alguns chegando até 100 km, implicam, muitas vezes, em reclamações dos consumidores às concessionárias de energia, visto que em muitos trechos verificam-se sérias alterações na qualidade e confiabilidade da energia fornecida.

É importante observar que a conexão 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 Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (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.

Esta dissertação propõe o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento para a adequada conexão de fontes de GD nos sistemas de distribuição, utilizando o *Analytic Hierarchy Process - AHP*. Para tanto será identificado o melhor regime operacional de uma

fonte de GD, localizada em um aterro sanitário, que gera 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 a análise de critérios quantitativos e qualitativos, tais como: níveis de tensão, perdas de potência ativa, capacidade de carregamento de cabos condutores e os serviços ancilares: reserva de potência ativa e suporte de reativos.

A avaliação prática deste trabalho é realizada tomando como exemplo a conexão de uma fonte de GD, proveniente do biogás resultante do tratamento de resíduos sólidos urbanos em um aterro sanitário, com potencial estimado de 6 MW de geração de energia elétrica. A máquina primária, considerada no estudo, é composta de um motor alternativo de combustão interna, Ciclo Otto, adaptado para biogás, acoplado mecanicamente a um gerador síncrono. Toda a análise considera que este gerador fornece energia para ser despachada à rede de distribuição cujos dados técnicos correspondem ao alimentador aonde o aterro sanitário, utilizado como estudo de caso, está localizado.

## **1.2 Motivação**

A energia elétrica é um dos principais pilares da sociedade moderna, sendo indispensável tanto para a produção de bens quanto para a oferta 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).

O Brasil enfrenta uma grave crise no setor elétrico. O déficit de energia não é mais uma ameaça futura mas um problema presente que necessita de atenção na busca de soluções de curto, médio e longo prazo. 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 a preocupação com os impactos ambientais, faz com que uma das alternativas a ser considerada para a solução do déficit energético, seja a diversificação da matriz energética através da utilização de fontes renováveis de geração distribuída (GD), desde que incentivada.

Frente a este cenário, a motivação para realização deste trabalho deve-se à necessidade de desenvolvimento de estudos e pesquisas sobre esta forma de geração de energia elétrica. Nesse contexto, a geração distribuída com o uso do Biogás oriundo de RSU, tornar-se uma

fonte de grande potencial de exploração. Porém, é ainda pouco difundida como fonte de energia complementar, pois o Brasil explora pouco este tipo de fonte de energia.

A formação do biogás depende, dentre vários fatores, da temperatura ambiente, logo, os picos de produção do biogás ocorrem nos meses de verão e, portanto, a geração é garantida na época do ano em que a demanda atinge seus maiores valores. (BORBA, 2006 e FIGUEIREDO, 2007). Este é um dos diferenciais do uso do biogás para geração de energia elétrica quando comparado, por exemplo, com a energia eólica e a energia hídrica. Em dias muito quentes a quantidade de vento tende a ser menor e as gerações eólicas perdem força, os níveis de água dos reservatórios estão abaixo dos níveis normais, ocasionando a diminuição do potencial de geração de energia elétrica. Esta é uma característica importante a ser considerada para disseminar o uso da geração distribuída a biogás, como por exemplo, em regiões litorâneas e de orizicultura, onde as cargas são sazonais e os carregamentos máximos dos sistemas de distribuição ocorrem no verão.

Outro elemento motivador desta dissertação está na possibilidade da geração distribuída poder fornecer os Serviços Ancilares (SA) reserva de potência ativa e suporte de reativos para os sistemas de distribuição e o fato de ainda não existir no Brasil regulamentação específica para os SA na distribuição assim como já ocorre nos sistemas de transmissão de energia elétrica.

Tendo em vista as características do Biogás dos RSU, os impactos que a conexão da GD pode causar nos sistemas de distribuição e a possibilidade de fornecimento de SA pelas GD's, torna-se importante a determinação dos regimes operacionais destas fontes de energia elétrica considerando diversos critérios.

### **1.3 Objetivos**

Os objetivos desta dissertação são:

- a) Identificar as características técnicas mais relevantes, sob o ponto de vista da qualidade da energia e operação das redes de distribuição, que podem sofrer impactos com a operação de fontes de GD inseridas nos sistemas de distribuição.
- b) Elaborar critérios quantitativos e qualitativos para identificar o regime operacional adequado da GD abastecida por biogás oriundo de RSU.
- c) Identificar as funções objetivo e restrições dos critérios com base na avaliação de Agentes de Decisão;



- d) Utilizar a metodologia multicritério AHP para definir o regime operacional de uma GD a biogás a ser conectada a uma rede de distribuição (Alimentador) piloto.

#### **1.4 Organização do trabalho**

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

CAPÍTULO 2 - Uso do Biogás de RSU como Fonte Alternativa de Energia Elétrica e Geração distribuída;

CAPÍTULO 3 – Metodologia Multicriterial;

CAPÍTULO 4 – Aspectos Técnicos e Operacionais das Redes de Distribuição para Determinação dos Regimes Operacionais de GD a Biogás de RSU.

CAPÍTULO 5 – Aplicação da Metodologia

Conclusões;

Principais Contribuições;

Previsões para Futuros Trabalhos;

Publicações.

APÊNDICE A - Diagnóstico dos aspectos técnicos e operacionais do AL03

## **2 USO DO BIOGÁS DE RSU COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

### **2.1 Uso do Biogás de RSU como Fonte de Energia Elétrica**

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

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

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 8.800 MW de 50,2 milhões de toneladas por ano em 301 usinas, (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. A primeira delas, inaugurada em 2003, no aterro sanitário Bandeirantes, na cidade de São Paulo, com capacidade instalada de 20 MW. O outro no interior do aterro sanitário da cidade de São Paulo, denominado de usina São João, com capacidade instalada é de 24,6 MW, distribuídos em 16 grupos motor-gerador do tipo OTTO com 1,54 MW cada. (ANEEL, 2008).

#### **2.1.1 Quantidade de biogás produzido em aterros sanitários**

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).

Vários fatores influenciam na produção do biogás, entre eles podemos citar: composição do resíduo, umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, a idade do lixo, o projeto do aterro, drenagem do chorume, cobertura adequada entre outros. (BORBA, 2006 e FIGUEIREDO, 2007). Considerando que cada aterro pode possuir características bem diferentes dos fatores citados, ao escolher um aterro sanitário para geração de energia elétrica através do biogás, é necessário primeiramente estimar sua curva de produção de metano, pois esta informação é essencial para determinar o potencial de geração de energia elétrica do aterro.

Existem diversos modelos para estimar a produção de biogás de um aterro sanitário, sendo que um dos mais difundidos nos softwares destinado para este fim, como, por exemplo, o software Biogás®, é o modelo matemático empregado pela *United States Environmental Protection Agency*. (USEPA, 1998).

A figura 1 apresenta o exemplo de uma curva de vazão de metano (gerado e coletado) estimada em função do tempo de um aterro sanitário localizado na região da Grande Porto Alegre. (MARTINS, 2012).

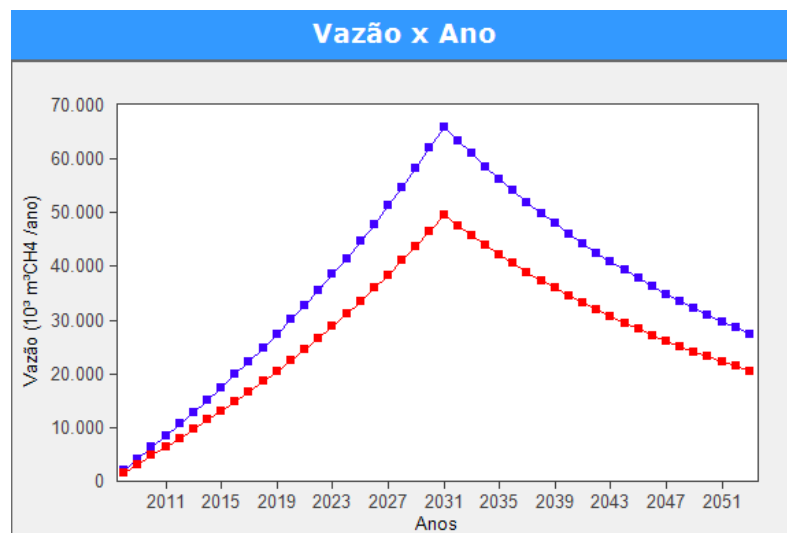


Figura 1 – Curvas de geração e coleta de metano em função do tempo do aterro sanitário.

Fonte: (MARTINS, 2012).

### 2.1.2 Modelo numérico para cálculo da energia disponível para geração por biogás

Pode-se determinar a potência (P) e a energia (E) disponível em função da geração de biogás do aterro, através das equações 1 e 2. (ICLEI, 2009 e PECORA, 2008)

$$P = \frac{Q \times PCI \times \eta}{860.000} \quad (1)$$

$$E = P \times \eta_{pc} \times t_o \quad (2)$$

onde:

$P$  : potência disponível em MW;

$Q$  : vazão de metano no ano dada em  $m^3CH_4$ /ano;

$PCI$  : refere-se ao poder calorífico inferior do  $CH_4$  (se não houver o valor real, medido no aterro, pode-se adotar  $5.500 \text{ kcal}/m^3$  de  $CH_4$  – referente a 50% de metano presente no biogás de aterro);

$\eta$  : indica o rendimento da máquina primária (motor Otto), geralmente 28% a 33%;

860.000: valor da conversão da unidade kcal para MW;

$E$  : representa a energia gerada (MWh/dia)

$\eta_{pc}$  : rendimento de motor operando a plena carga (estimado em 87%);

$t_o$  : indica o tempo de operação do motor referente a 24 horas por dia.

A figura 2 apresenta a curva estimada de potência x ano associada aos dados da figura 1 que apresentou os dados de vazão x ano.

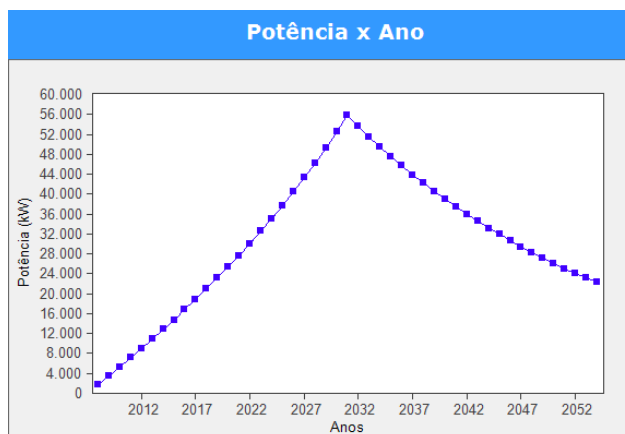


Figura 2 – Curva Potência x Ano de aterro sanitário.

Fonte: (MARTINS, 2012)

O biogás com um teor de metano entre 50% e 80% apresentará um poder calorífico de 5.000 a 7.000 kcal/m<sup>3</sup> (5 a 7 kWh/m<sup>3</sup>), decorrente da maior ou menor pureza (maior ou menor quantidade de metano) e que o biogás altamente purificado pode alcançar até 12.000 kcal/m<sup>3</sup> (DE ALMEIDA, 2008). Estes dados permitem-nos fazer comparações de que: 1m<sup>3</sup> de biogás representa em média 0,61 L de gasolina; 0,58 L de querosene; 0,55 L de óleo diesel; 0,45 L de GLP; 0,79 L de álcool hidratado; 1,54 kg de lenha; 20 Kg de lixo e 1,43 kWh de energia elétrica.

Em um 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 16,8 MJ/m<sup>3</sup>. Para um gás com alto teor, o valor passa a ser 37,7 MJ/m<sup>3</sup>. Sabendo que 1 kWh corresponde a 3,6x10<sup>6</sup> J e que 1 m<sup>3</sup> de biogás apresenta poder calorífico igual a 16,8 MJ, conclui-se que 1 m<sup>3</sup> de biogás produz 4,66 kWh (LEME, 2010).

## **2.2 Geração Distribuída a Biogás de RSU**

Sistemas de geração de energia baseados em fontes primárias renováveis, utilizando biogás resultante da decomposição aeróbica de RSU, são consideradas tecnologias ecologicamente amigáveis (BRASIL, 2002).

Para que haja a difusão deste tipo de geração é importante à utilização dos benefícios de incentivos internacionais, como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e créditos de carbono, incentivos governamentais, como no caso do Brasil, o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Lei 10.438, de 26 de Abril de 2002, e incentivos regulatórios do setor elétrico, como a Resolução Normativa da ANEEL nº 77, de 18 de agosto de 2004.

Outro fator a ser considerado são as tecnologias disponíveis para geração de energia elétrica através do biogás.

### **2.2.1 Incentivos Internacionais**

O MDL foi previsto pelo artigo 12 do Protocolo de Kyoto, e é uma evolução da proposta brasileira com algumas modificações. 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 idéia 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. Essa proposta evoluiu para o MDL (FELIPETTO, 2007).

A quantidade relativa à diminuição de emissões de gás de efeito estufa (GEE) ou sequestro de CO<sub>2</sub> pode resultar em Reduções Certificadas de Emissões (RCE) que representam créditos que podem ser comercializados entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, tendo a principal finalidade o benefício econômico para os em desenvolvimento e um auxílio para que os países desenvolvidos cumpram suas metas para com o Protocolo.

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

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 (CH<sub>4</sub>) nos próximos anos. (ICLEI, 2009).

O projeto “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (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).

### **Créditos de carbono e a geração de energia elétrica**

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 RCEs 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**

Os riscos associados aos projetos podem ser: (FELIPETTO, 2007)

- 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;
- 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 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 Kyoto, todos os acordos deverão ser reanalisados. (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.
  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.

### 2.2.2 Incentivos Nacionais

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

Conforme o Decreto 5.025 de Março de 2004, o PROINFA foi programado para funcionar em duas fases de procedimentos distintos. Na primeira, foram contratados 3.300 MW 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, 1.100 MW para cada uma. O prazo para entrada em operação comercial dos empreendimentos contratados era até 30 de dezembro de 2006 (ANEEL, 2004).

Em termos de incentivos regulatórios do setor elétrico, a REN nº 77 de 2004, estabeleceu descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão – (TUST) e distribuição (TUSD) para geração de energia com base em fontes solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada seja menor ou igual a 30 MW, incidindo na produção e no consumo da energia comercializada pelos aproveitamentos.

Segundo a Resolução, a regra geral é o desconto de 50% na tarifa de uso, no entanto, o art. 3º estabelece as condições para a concessão do desconto de 100% nas tarifas de uso para empreendimentos que utilizem como insumo energético, no mínimo, 50% de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto. (ANEEL - REN nº 77, 2004).

### 2.2.3 Tecnologias para geração de energia elétrica a biogás

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 gás, microturbinas à gás, motores de combustão externa denominados de Stirling e finalmente as células à combustível.



**Motores de combustão interna (MCI)** são uma das alternativas utilizadas para geração de energia elétrica a biogás. 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).

Os motores a gás 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. (DE SOUZA, 2004).

Os MCI, adaptados para biogás, necessitam uma vazão superior a  $150 \text{ m}^3$  de metano para gerar uma potência de 5.000 kW e em torno de  $5.000 \text{ m}^3$  para a geração de 12.000 kW (LEME, 2010). A principal desvantagem deste sistema é representada pelas altas quantidades de emissões de monóxido de carbono (CO) e de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) que são liberados ao meio ambiente.

**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- nucleares), 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.

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.

**As microturbinas a gás** 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.

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

A grande vantagem da utilização deste tipo de tecnologia, com o biogás como combustível, está diretamente vinculado ao ganho ambiental, quando comparada com a tecnologia de grupos geradores ciclo Otto, responsáveis por uma taxa de emissão de NO<sub>x</sub> bem maior (COELHO, 2006). No entanto quanto a análise financeira, o resultado é extremamente desfavorável para a microturbina quando comparado com o MCI. Além do custo do equipamento em si, a microturbina exige que o gás combustível apresente propriedades mais controladas, acarretando o uso de sistemas de purificação do gás. Já para grupo-gerador com MCI, não se faz necessário, 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.

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 com potência de 30 kW cada, que operam em paralelo (De BONA, 2004).

**O motor Stirling** é um motor de combustão externa, que pode ser utilizado em projetos de micro-geração de energia a biogás. Seu princípio de funcionamento baseia-se em um ciclo fechado, no qual o fluido de trabalho é mantido dentro de cilindros e então, determinada quantidade de calor é adicionada ao espaço de trabalho, por meio de trocadores de calor.

Dentre os atrativos do uso de motores Stirling, está a possibilidade de cogeração e utilização de grande variedade de combustíveis, o baixo nível de ruído e a eficiência global de cerca de 30%. Porém, este motor exige materiais de alta qualidade, visto que seu funcionamento está condicionado a um contínuo aquecimento externo e os testes realizados até hoje compreendem motores de baixa potência e pouca variedade de combustíveis. (NEST, 2007).

**A célula a combustível** é uma célula eletroquímica, podendo ser considerada como uma bateria em que os reagentes são alimentados continuamente.

O principal combustível utilizado pelas células a combustível é o hidrogênio. As principais formas de produção de hidrogênio podem ser observadas na figura 3.(BARIN, 2009).

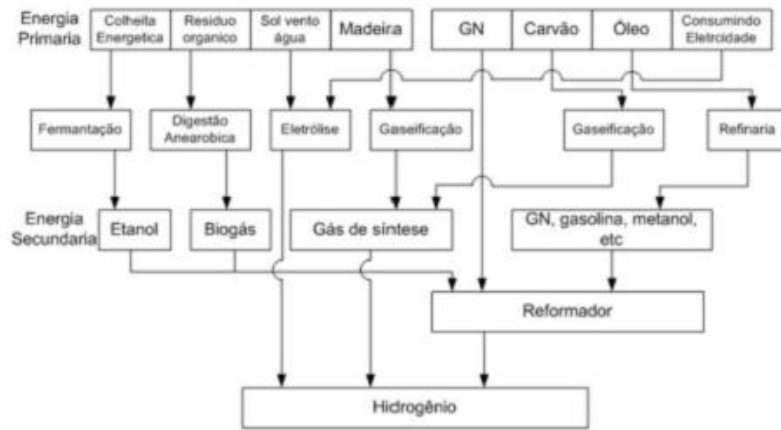


Figura 3 – Principais formas de produção de hidrogênio.

Fonte: BARIN, 2009.

Pode-se verificar na figura 3 que uma das formas de produção do  $H_2$  é através do biogás que poderá ser provenientes de RSU, possibilitando o uso desta tecnologia para geração de energia elétrica à biogás.

Os modelos de células para a geração de energia elétrica com o uso do biogás proveniente do tratamento de RSU: (MARITINS, 2012).

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

Uma de suas principais desvantagens das células a combustível é o custo, que atualmente ainda é elevado em comparação com outras fontes alternativas de energia (BARIN, 2007).

Após descrever os principais tipos de tecnologias para a recuperação do metano, na Tabela 1 são mostradas algumas comparações entre as características das tecnologias.

Tabela 1 – 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 kW a 20 MW      | 30% a 40%           | 250 a 3.000            |
| Turbinas a gás          | 500 kW a 150 MW    | 20% a 30%           | 35 a 50                |
| Microturbinas           | 30 kW a 100 kW     | 24% a 28%           | < 9                    |

Fonte: FIGUEIREDO, 2007

## 2.3 Geração Distribuída

Geração distribuída é a geração que não é planejada de modo centralizado, nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizada (MALFA, 2002). Para o IEEE, uma geração descentralizada é uma central de geração pequena o suficiente para estar conectada à rede de distribuição e próxima do consumidor (MALFA, 2002).

No Brasil, geração distribuída foi definida de forma oficial através do Decreto nº 5.163 de 30 de Julho de 2004, e foi definida da seguinte forma:

" Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados [...], conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I – hidrelétrico: com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II – termelétrico: inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento.

Parágrafo único. “Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput.”(BRASIL, 2004).

O Módulo 3 do PRODIST, 2010 – Acesso ao Sistema de Distribuição, define geração distribuída como sendo geração de energia elétrica, de qualquer potência, conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS (ANEEL, 2010).

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).

### 2.3.1 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 autorização para gerar energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, podendo mediante autorização da ANEEL, comercializar os excedentes de energia, denominados de Autoprodutores de Energia - APE (ANEEL, 2010).

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

#### 2.3.1.1 Vantagens e desvantagens da utilização de GD

A conexão de GD em redes de distribuição apresenta vantagens tanto para a distribuidora quanto para os consumidores conectados a esta rede. (HADDAD, 2010). Dentre elas podemos citar:

- 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;
- Possibilidade de operar de forma ilhada;
- Melhora dos níveis de tensão em períodos de carga pesada;
- Provimento de serviços ancilares como a geração de energia reativa;
- Diversificação da matriz energética.

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;
- Aumento das distorções harmônicas da rede;
- Geração intermitente por disponibilidade de combustível – no caso biogás de aterro.

### 2.3.1.2 Regulamentação

Talvez este seja um dos maiores desafios para a GD atualmente. Para consolidação da diversificação da matriz energética, através da utilização da Geração Distribuída, é necessária que esteja regulamentada esta forma de geração de energia em todos seus aspectos. Existem ainda muitos entraves e indefinições no marco regulatório.

Em 2010 a ANEEL divulgou a Nota Técnica nº 0043/2010–SRD/ANEEL, sendo este, um documento emitido pelas Unidades Organizacionais que se destina a subsidiar as decisões da Agência.

Segundo esta nota os principais aspectos da regulação relativos aos empreendimentos de geração distribuída podem ser agregados nos seguintes tópicos:

**Registro:** Uma GD deve ser registrada junto à ANEEL. Para tanto, é preciso que o interessado envie um requerimento, juntamente com o Formulário de Registro de Centrais Geradoras preenchido, disponível no sítio desta Agência. A solicitação de desconto na tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD), nos termos da Resolução Normativa nº 77/2004, deve ser enviada juntamente com o requerimento de registro. Adicionalmente, a Resolução Normativa nº 390/2009 exige também a apresentação da Licença Ambiental de Operação ou documento equivalente.

**Lastro Contratual do Gerador e da Distribuidora:** conforme Resolução ANEEL no 352/2003, art. 1º, § 7º, inciso III, “as usinas termelétricas não despachadas centralizadamente terão a garantia física definida com base na energia efetiva gerada;”. Portanto, o lastro de contrato de venda de energia elétrica do gerador será a sua energia efetivamente gerada. A Distribuidora deverá apresentar à ANEEL o contrato de compra de energia de GD para fins de registro, conforme dispõe Resolução

Normativa nº 323/2008. No momento do registro do contrato de compra e venda de energia será aferido o limite de 10% da carga da distribuidora, em termos dos montantes de compra de energia de GD, conforme Resolução Normativa nº 167/2005.

**Sistema de Medição:** o Procedimento de Distribuição- PRODIST, Módulo 5, seção 5.2, estabelece que o sistema de medição aplicável a usinas com potência instalada igual ou inferior a 1 MW, com fonte de energia renovável, pode ser igual ao dos consumidores do Grupo A. Caso o agente de geração opte por vender energia no mercado livre, há necessidade instalar o Sistema de Medição para Faturamento - SMF, conforme especificações do Módulo 12 dos Procedimentos de Rede e Regras de Comercialização.

**Conexão:** A GD deverá solicitar acesso à distribuidora, podendo indicar o ponto de conexão, sendo que caberá à distribuidora analisar e escolher o ponto que apresente o menor custo global, por meio de parecer de acesso. Para tanto, deverão ser seguidos os procedimentos estabelecidos no Módulo 3 - PRODIST.

**Preço da Energia e Prazos da Contratação:** A energia deve ser contratada por Chamada Pública realizada pela distribuidora interessada. Conforme legislação em vigor, o contrato de compra e venda de energia deve ter prazo de vigência, o qual deve constar da Chamada Pública. Os custos com a compra de energia de geração distribuída poderão ser repassados para a tarifa dos consumidores até o Valor de Referência – VR, quando dos processos de reajuste ou revisão tarifária.

## Resumo do Capítulo 2

Neste capítulo apresentaram-se a geração de energia elétrica a partir do biogás de RSU, os fatores que influenciam na formação do biogás de RSU e sua capacidade energética. Mostra-se a geração distribuída a biogás, alguns incentivos governamentais e os tipos de tecnologias utilizadas para transformar o biogás em energia elétrica. Por fim, apresenta os conceitos de geração distribuída, vantagens e desvantagens da sua utilização e os principais aspectos da regulação.

## **3 METODOLOGIA MULTICRITERIAL**

### **3.1 Analytic Hierarchy Process - AHP**

A medição de desempenho é uma tarefa desafiante. Nem sempre os dados estão disponíveis, acessíveis ou estruturados na forma ideal para consolidação. Além disso, há também os aspectos subjetivos a serem considerados, cujas medições são ainda mais complexas, exatamente por serem de caráter pessoal e de difícil externalização.

Apesar da quantidade de variáveis objetivas ou subjetivas possíveis (ex. custos, percepção, quantidades, produtividade, ambiente, cultura, tempo, etc), simplificar a medição é a melhor solução, pois todas as medidas são imperfeitas. Logo, não é necessário medir mais, mas sim encontrar uma forma que traduza o que realmente importa e conduza a um plano de ação eficiente. (MEYER, 2003)

Esse é o fundamento do processo de análise hierárquica, o AHP (Analytic Hierarchy Process): decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (SAATY, 1991).

A idéia central da teoria da análise hierárquica é a redução do estudo de sistemas a uma seqüência de comparações aos pares. A utilidade do método realiza-se no processo de tomada de decisões, minimizando suas falhas. A teoria reflete o método natural de funcionamento da mente humana, isto é, diante de um grande número de elementos (controláveis ou não), a mente os agrega em grupos segundo propriedades comuns. O cérebro repete esse processo e agrupa novamente os elementos em outro nível “mais elevado”, em função de propriedades comuns existentes nos grupos de nível imediatamente abaixo. A repetição dessa sistemática atinge o nível máximo quando este representa o objetivo do nosso processo decisório. E, assim, é formada a hierarquia, por níveis estratificados. (SAATY, 1991).

Para analisar os elementos dessa hierarquia, a questão definida pelo criador da teoria é: com que peso os fatores individuais do nível mais baixo da hierarquia influenciam seu fator máximo, o objetivo geral? Desde que essa influência não seja uniforme em relação aos fatores, chegamos às prioridades, que são os pesos relativos desenvolvidos para destacar as diferenças entre os critérios.



O *Decision Support Systems Glossary* define AHP como “uma aproximação para tomada de decisão que envolve estruturação de multicritérios de escolha numa hierarquia. O método avalia a importância relativa desses critérios, compara alternativas para cada critério, e determina um *ranking* total das alternativas”. (DSS, 2006).

A determinação das prioridades dos fatores mais baixos com relação ao objetivo reduz-se a uma seqüência de comparação por pares, com relações de *feedback*, ou não, entre os níveis. Essa foi a forma racional encontrada para lidar com os julgamentos. Através dessas comparações por pares, as prioridades calculadas pelo AHP capturam medidas subjetivas e objetivas e demonstram a intensidade de domínio de um critério sobre o outro ou de uma alternativa sobre a outra. (SAATY, 1991).

### 3.1.1 Benefícios, Limitações e Aplicações do AHP

O benefício do AHP é que, como os valores dos julgamentos das comparações paritárias são baseados em experiência, intuição e também em dados físicos, o AHP pode lidar com aspectos qualitativos e quantitativos de um problema de decisão. (SAATY, 1994). Por reconhecer que os participantes, também chamados de Agentes de Decisão (AD), podem estar incertos ou fazer julgamentos pobres em algumas comparações, o método AHP envolve comparações redundantes para melhorar a validade destas. A tolerância de inconsistências não é uma limitação, mas um retrato da realidade. (GRANDZOL, 2005).

Assim, a aplicação do AHP inclui e mede todos os fatores importantes, qualitativa e quantitativamente mensuráveis, sejam eles tangíveis ou intangíveis, para aproximar-se de um modelo realista. Contudo, é preciso reconhecer as limitações também. Uma das limitações do método é a sua aplicação inadequada, isto é, em ambientes desfavoráveis onde a aplicação é percebida como simplificação excessiva ou como desperdício de tempo (GRANDZOL, 2005).

Convém, também, destacar as aplicações já efetuadas com o método AHP no mercado profissional e também no meio acadêmico. No campo acadêmico, as áreas de aplicações de sucesso incluem seleção de corpo docente (GRANDZOL, 2005), prioridades de pesquisa de agricultura internacional (BECKER, 2004) e medição de eficiência do gerenciamento de atividades de pesquisa e desenvolvimento em universidades (FENG, 2004). No campo profissional, as áreas de aplicações de sucesso incluem a decisão estratégica de TI (MURAKAMI, 2003), escolha de operador logístico (SANTANA, 2004), planejamento de projeto de produto (HUMMEL, 2002), avaliação de riscos em projetos de ERP – *Enterprise*

*Resource Planning* (HUANG, 2004), prioridades em sistema de gestão de segurança (CHAN, 2004) e proposição de um indicador geral (FRANCISCHINI, 2003).

Para (BECKER, 2004), a natureza de problemas multicritérios soma-se aos processos de priorização, já que envolvem *trade-offs* significativos, o que requer atribuição de pesos para cada critério, como o AHP faz. A escolha do método justificou-se por considerar que muitas decisões de pesquisas são fortemente baseadas em julgamentos subjetivos. (BECKER, 2004).

Em (MURAKAMI, 2003) aplica-se o AHP em problemas de TI por considerá-los desestruturados e com múltiplos critérios qualitativos e quantitativos. Já (HUMMEL, 2002) também considera o AHP a ferramenta mais apropriada para análise de decisão de multicritério no apoio à definição de planejamento de projeto de produto, porque este promove um ponto referencial de competitividade através das comparações paritárias entre as alternativas dos novos produtos. Além disso, a redundância nas comparações paritárias do AHP permite checar a inconsistência dos julgamentos.

No caso apresentado por (FENG, 2004) usou-se o AHP antes do DEA (*Data Envelopment Analysis*) para obter os pesos relativos dos indicadores a serem utilizados no DEA.

Em (FRANCISCHINI, 2003) também se adotou o mesmo processo para consolidar um indicador geral, de forma a permitir a atribuição de graus de prioridade através da determinação de pesos, viabilizando assim a unificação e conseqüente redução do número de fatores a serem flexibilizados pelo DEA.

O trabalho de (SANTANA, 2004) propôs um modelo de desenvolvimento de Sistema de Medição de Desempenho Logístico para o qual a seleção dos indicadores de desempenho realizou-se com o AHP. O autor justificou a escolha por se tratar do método matemático mais simples de todos os métodos de apoio multicritério à decisão e por ser o mais difundido e aplicado para apoio à decisão atualmente nas empresas.

### 3.1.2 A Hierarquia

O AHP divide o problema geral em avaliações de menor importância, enquanto mantém, ao mesmo tempo, a participação desses problemas menores na decisão global. Ou seja, ao encarar um problema complexo, é mais fácil dividi-lo em outros menores, porque, quando solucionados individualmente e depois somados, estes representam a decisão do

problema inicial buscada. Sob essa lógica hierárquica, convém introduzir a definição, as características e a importância da hierarquia na metodologia.

A hierarquia é uma abstração da estrutura de um sistema para estudar as interações funcionais de seus componentes e seus impactos no sistema total. Essa abstração pode tomar várias formas inter-relacionadas, todas descendentes de um objetivo geral, abrindo-se em subjetivos, desmembrando-se nas forças influentes e até nas pessoas que influenciam essas forças. (SAATY, 1991). Duas questões surgem na estrutura hierárquica dos sistemas (SAATY, 1991):

- (1) Como estruturar hierarquicamente as funções de um sistema?
- (2) Como medir impactos de cada elemento na hierarquia?

A parte mais criativa de tomada de decisão que tem efeito significativo no resultado é a modelagem do problema. No método AHP, um problema é estruturado como hierarquia e, posteriormente, sofre um processo de priorização.

A priorização envolve explicitar julgamentos de questões de dominância de um elemento sobre outro quando comparados a uma prioridade. Assim, o princípio básico a se seguir na criação dessa estrutura é sempre tentar responder a seguinte questão: posso comparar os elementos de um nível abaixo usando alguns ou todos os elementos no próximo nível superior como critérios ou atributos dos elementos do nível inferior?

Para elaborar a forma de uma hierarquia, devem-se seguir as seguintes sugestões, (SAATY, 1994):

- (1) identificar o problema geral. Qual a questão principal?;
- (2) identificar os sub-objetivos do objetivo geral. Caso relevante, identificar o horizonte de tempo que afetam a decisão;
- (3) identificar os critérios que devem ser satisfeitos para satisfazer os sub-objetivos do objetivo geral;
- (4) identificar os subcritérios abaixo de cada critério. Vale ressaltar que critérios e subcritérios podem ser especificados sem termos de faixas de valores de parâmetros ou em termos de intensidades como alta, média, baixa;
- (5) identificar os atores envolvidos;
- (6) identificar os objetivos dos atores;
- (7) identificar as políticas dos atores;
- (8) identificar opções e resultados;

(9) para decisões sim-não, tomar o resultado mais preferível e comparar os benefícios e custos de tomar decisão com os de não se tomar a decisão;

(10) realizar uma análise de custo-benefício usando valores marginais.

Como se lida com hierarquia de dominância, deve-se perguntar qual alternativa gera o melhor benefício, que alternativa é mais custosa e, para riscos, qual alternativa é mais arriscada.

Uma hierarquia bem construída será um bom modelo da realidade, podendo trazer vantagens. Primeiramente, a representação hierárquica de um sistema pode ser usada para descrever como as mudanças em prioridades nos níveis mais altos afetam a prioridade dos níveis mais baixos. A hierarquia também permite a obtenção de uma visão geral de um sistema, desde os atores de níveis mais baixos até seus propósitos nos níveis mais altos. Finalmente, os modelos hierárquicos são estáveis e flexíveis: estáveis porque pequenas modificações têm efeitos pequenos; já flexíveis porque adições a uma hierarquia bem estruturada não perturbam o desempenho.

Por outro lado, uma hierarquia não linear apresentaria arranjos circulares, de modo que um nível superior poderia ser dominado por um nível inferior e estar também numa posição dominante. Entretanto, apesar de apresentar vantagens, a hierarquia por si própria não é uma ferramenta poderosa no processo de tomada de decisões ou de planejamento. É preciso computar a força com que elementos de um nível atuam sobre os elementos do nível mais alto seguinte, assim como considerar forças relativas entre os níveis e os objetivos gerais. Para sua efetivação, utiliza-se a escala de prioridades relativas do método AHP, descrito a seguir.

### 3.1.3 O Processo de Hierarquização do AHP

Conforme já apresentado, a metodologia do AHP constitui-se de decomposição por hierarquias e síntese pela identificação de relações através de escolha consciente.

A prática da tomada de decisões está ligada à avaliação das alternativas, todas satisfazendo um conjunto de objetivos pretendidos. O problema está em escolher a alternativa que melhor satisfaça o conjunto total de objetivos. O meio de estruturar logicamente os objetivos e sub objetivos do problema de decisão é pela hierarquia, como descrito em 3.1.2.

Através de comparações aos pares em cada nível da hierarquia baseadas na escala de prioridades do AHP, os participantes ou Agentes de decisão (AD) desenvolvem pesos relativos, chamados de prioridades, para diferenciar a importância dos critérios. (GRANDZOL, 2005).

Para se fazer bom uso da escala de prioridades, entretanto, é preciso compreender o que são os julgamentos no método AHP. Um julgamento ou comparação é a representação numérica de uma relação entre dois elementos que possuem o mesmo pai. O grupo de todos esses julgamentos pode ser representado numa matriz quadrada, na qual os elementos são comparados com eles mesmos. Cada julgamento representa a dominância de um elemento da coluna à esquerda sobre um elemento na linha do topo. (SAATY, 1994).

A escala apresentada no quadro 1, vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9. Além disso, desconsiderando as comparações entre os próprios critérios, que representam 1 na escala, apenas metade das comparações precisa ser feita, porque a outra metade constitui-se das comparações recíprocas na matriz de comparações, que são os valores recíprocos já comparados.

| <b>Intensidade de Importância</b>           | <b>Definição</b>  | <b>Explicação</b>  |
|---|---|--|
| <b>1</b>                                    | Mesma importância   | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo   |
| <b>3</b>                                    | Importância pequena de uma sobre a outra  | A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra                                      |
| <b>5</b>                                    | Importância grande ou essencial   | A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra                                     |
| <b>7</b>                                    | Importância muito grande ou demonstrada   | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática. |
| <b>9</b>                                    | Importância absoluta  | A evidência favorece uma atividade em relação à outra com mais autograu de certeza                                     |
| <b>2,4,6,8</b>                              | Valores intermediários entre os valores adjacentes  | Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições  |
| <b>Recíprocos dos valores acima de zero</b> | Se a atividade "i" recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparado com a atividade "j", então "j" tem o valor recíproco quando comparada com "i". | Uma designação razoável  |
| <b>Racionais</b>                            | Razões resultantes de escala  | Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.                |

Quadro 1 – Comparação método AHP

Fonte: (SAATY, 1991)

O julgamento reflete as respostas de duas perguntas: qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade, usando a escala de 1-9, da Tabela 2.

É importante notar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entramos com o valor recíproco na posição correspondente da matriz.

Devido à relação de reciprocidade e à necessidade de consistência entre duas atividades ou critérios, os recíprocos dos valores acima de zero são inseridos na matriz criada quando uma comparação entre duas atividades já foi realizada. O processo é robusto, porque diferenças sutis em uma hierarquia na prática não se tornam decisivas. A Figura 4 apresenta o exemplo do preenchimento da matriz de julgamentos de acordo com o método AHP.

| Matriz A |     |     |     |   |
|----------|-----|-----|-----|---|
|          | A   | B   | C   | D |
| A        | 1   | 5   | 6   | 7 |
| B        | 1/5 | 1   | 4   | 6 |
| C        | 1/6 | 1/4 | 1   | 4 |
| D        | 1/7 | 1/6 | 1/4 | 1 |

Figura 4 – Matriz de Julgamentos do método AHP.

Fonte: (SAATY, 1991).

As posições da diagonal serão sempre 1, afinal, um elemento é igualmente importante a ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância de acordo com a Tabela 1, que apresenta a escala de comparações empregadas no método.

Para as comparações inversas, isto é, na parte inferior esquerda da matriz, colocam-se os valores recíprocos dos da parte superior direita da mesma.

No caso da Matriz A, observa-se pela parte superior direita que todos os elementos-linha eram mais dominantes do que os elementos-coluna, pois todas as posições estão com números maiores que 1. Lê-se: A é 5 vezes mais dominante do que B e 6 vezes mais dominante do que C.

A consistência da matriz deve ser garantida, a partir de uma quantidade básica de dados, todos os outros podem ser logicamente deduzidos. Se A é 5 vezes mais dominante do

que B, e A é 6 vezes mais dominante que C, então  $A=5B$  e  $A=6C$ . Logo,  $B/C = 6/5 =$  posição (B, C). Portanto, se o julgamento da posição (B, C) for diferente de  $6/5$ , então a matriz é inconsistente, como ocorre na Matriz A.

O resumo dos passos recomendados para aplicação do AHP é: (CHAN, 2004)

(1) Definir o problema e o que se procura saber. Expor as suposições refletidas na definição do problema, identificar partes envolvidas, checar como estas definem o problema e suas formas de participação no AHP.

(2) Decompor o problema desestruturado em hierarquias sistemáticas, do topo (objetivo geral) para o último nível (fatores mais específicos, usualmente as alternativas). Caminhando do topo para a extremidade, a estrutura do AHP contém objetivos, critérios (parâmetros de avaliação) e classificação de alternativas (medição da adequação da solução para o critério). Cada nó é dividido em níveis apropriados de detalhes. Quanto mais critérios, menos importante cada critério individual se torna, e a compensação é feita pela atribuição de pesos para cada critério. É importante certificar-se de que os níveis estejam consistentes internamente e completos, e que as relações entre os níveis estejam claras.

(3) Construir uma matriz de comparação paritária entre os elementos do nível inferior e os do nível imediatamente acima. Em hierarquias simples, cada elemento de nível inferior afeta todos os elementos do nível superior. Em outras hierarquias, elementos de nível inferior afetam somente alguns elementos do nível superior, requerendo a construção de matrizes únicas.

(4) Fazer os julgamentos para completar as matrizes. Para isso, são necessários  $n(n - 1) / 2$  julgamentos para uma matriz  $n \times n$ , sendo  $n$  o número de linhas e colunas. O analista ou AD julga se A domina o elemento B. Se afirmativo, inserir o número na célula da linha de A com a coluna de B. A posição coluna A com linha B terá o valor recíproco. Assim prossegue-se o preenchimento da matriz. Os valores inseridos são aqueles da escala de comparação, mostrados na Tabela 6.

(5) Calcular o índice de consistência (IC). Se não for satisfatório, refazer julgamentos.

$$\text{I.C.} = \text{Índice de Consistência} = \frac{\lambda_{\text{máx.}} - n}{n - 1} \quad (3)$$

onde:

I.C. = Índice de Consistência;

$\lambda_{\text{máx.}}$  = autovalor máximo;

$n$  = dimensão da matriz.

Para obter-se a consistência de uma matriz positiva recíproca (matriz criada no Passo 4), seu autovalor máximo deveria ser igual a  $n$  (dimensão da matriz). No caso de uma matriz consistente, precisamos de  $n - 1$  comparações paritárias já que, a partir dessas, as outras podem ser deduzidas logicamente.(SAATY, 1991).

O autovetor dá a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. O método da análise hierárquica busca o autovalor máximo,  $\lambda_{\max}$ , que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos  $A$  (Passo 4) pelo vetor coluna de prioridades computado  $w$ , seguido da divisão desse novo vetor encontrado,  $Aw$ , pelo primeiro vetor  $w$ , chegando-se ao valor de  $\lambda_{\max}$ .

Cabe lembrar que  $Aw = \lambda w$  e, que no método da análise hierárquica,  $Aw = \lambda_{\max} w$ . Para o cálculo de  $\lambda_{\max}$ , utiliza-se a equação abaixo:

$$\lambda_{\max} = \text{média do vetor } \frac{Aw}{w} \quad (4)$$

onde:

$\lambda_{\max}$ . = autovalor máximo;

$A$  = matriz de julgamentos;

$w$  = vetor coluna de prioridades;

Como regra geral, se o índice de consistência for menor do que 0.1, então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP. Se for maior do que 0.1 recomenda-se que julgamentos sejam refeitos (por exemplo, reescrevendo questões do questionário ou recategorizando elementos) até que a consistência aumente.

Sugere-se também o uso da Razão de Consistência, que considera o IC e o Índice Randômico (IR), que varia com o tamanho  $n$  da amostra.

$$R.C = \frac{I.C}{I.R} \quad (5)$$

onde:

$R.C$  = razão de consistência;

$I.C$  = índice de consistência;

$I.R$  = índice Randômico (IR) para  $n$

Propõe-se uma tabela com os índices randômicos (IR) de matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório, conforme tabela 2 (SAATY, 1991).



Tabela 2 – Índice Randômico Médio do AHP.

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>N</i> | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| IR       | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.48 | 1.56 | 1.57 | 1.59 |

Fonte: (SAATY, 1991)

(6) Analisar as matrizes para estabelecer as prioridades locais e globais, comparar as alternativas e selecionar a melhor opção.

Há dois meios de sintetizar as prioridades locais das alternativas, usando prioridades globais dos critérios pai: o modo distributivo e o modo ideal. No distributivo, os pesos das alternativas somam 1. É adotado quando há dependência entre as alternativas e uma prioridade unitária é distribuída entre elas, ou seja, quando o objetivo é escolher uma alternativa que é melhor em relação a outras.

O modo distributivo é apropriado para alocação proporcional de um benefício, ou seja, três alternativas com relação de dependência A, B e C teriam prioridades como  $A=0.2$ ,  $B=0.5$  e  $C=0.3$ , que totalizam 1.0.

Já o modo ideal, é utilizado para obter a melhor alternativa entre alternativas distintas e sem relação de dependência. Nesse modo, as prioridades locais das alternativas são divididas pelo maior valor entre elas. Isso é feito para cada critério, e a alternativa torna-se ideal de valor 1. Se as alternativas são suficientemente distintas, sem dependência nas definições, o modo ideal seria o meio de síntese. No exemplo citado de A, B e C, B seria a alternativa ideal com prioridade 1.0 ( $= 0.5 \div 0.5$ ), C teria prioridade 0.6 ( $= 0.3 \div 0.5$ ) e A teria prioridade 0.4 ( $= 0.2 \div 0.5$ ).

### 3.2 Macbeth

O MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), consiste no uso de um *software* com o mesmo nome, e através de modelos de programação linear, são determinadas funções de valor para representar o julgamento dos agentes de decisão. Quando utilizado para resolver problemas multicritério, deve atender a duas questões essenciais e distintas: MACBETH. (BANA E COSTA & VANSNICK, 1995).

Primeiro, para cada critério, atribuir notas para cada alternativa utilizando o *software* MACBETH. Essa classificação é realizada através de uma comparação paritária,

classificando-as segundo os julgamentos do decisor também chamado de agente de decisão (AD).

Para a definição de diferença de importância “atratividade” entre as alternativas, o *software* utiliza uma escala semântica composta de sete categorias (de zero a seis), onde zero indica indiferença entre as alternativas (nula), e seis indica uma diferença de atratividade máxima(extrema).

Segundo, as alternativas são agregadas em uma nota única através de uma soma ponderada. Para isso é necessário atribuir pesos aos vários critérios utilizando o *software* MACBETH através de comparação par a par realizada de forma indireta através das sete alternativas fictícias que representam cada critério, possuindo o melhor valor possível para o critério que representa e pior valor para os demais critérios. É ainda introduzida alternativa à análise correspondendo a um critério artificial, com pior nota em todos os critérios, de forma a impedir que um dos sete critérios tenha valor nulo.

O método MACBETH baseia-se no método AHP sendo que as principais diferenças do método MACBETH para o AHP estão nas escalas utilizadas nos julgamentos e na validação destes. O MACBETH se propõe a ser mais robusto e solucionar os problemas de inconsistência frequentemente apontados no AHP. Além da consistência, MACBETH faz uma verificação da coerência teórica e semântica. MACBETH cria uma matriz de julgamentos a partir das diferenças de “atratividade” e permite também a verificação visual da consistência.

A figura 5 apresenta um exemplo de utilização do *software* M\_MACBETH para a definição de diferença de importância entre as alternativas, que neste exemplo utiliza o design como critério para escolha de uma impressora. (BANA E COSTA, DE CORTE & VANSNICK, 2005).

|        | Conan     | Bom         | Ph          | Nomark         | Espon           | Neutro          | Sister            | Escala actual |           |
|--------|-----------|-------------|-------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------|-----------|
| Conan  | nula<br>0 | fraca<br>20 | fraca<br>45 | mod-forc<br>70 | forte<br>120    | forte<br>120    | mt. forte<br>140  | 120           | extrema   |
| Bom    |           | nula<br>0   | fraca<br>25 | moderada<br>50 | positiva<br>100 | positiva<br>100 | fort-mforc<br>120 | 100           | mt. forte |
| Ph     |           |             | nula<br>0   | fraca<br>25    | positiva<br>75  | positiva<br>75  | forte<br>95       | 75            | forte     |
| Nomark |           |             |             | nula<br>0      | moderada<br>50  | moderada<br>50  | mod-forc<br>70    | 50            | moderada  |
| Espon  |           |             |             |                | nula<br>0       | nula<br>0       | frac-mod<br>20    | 0             | frac      |
| Neutro |           |             |             |                |                 | nula<br>0       | frac-mod<br>20    | 0             | mt. frac  |
| Sister |           |             |             |                |                 |                 | nula<br>0         | -20           | nula      |

**Julgamentos consistentes**

Figura 5 – Diferença de importância entre impressoras em relação ao seu design.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH

As principais fundamentações teóricas do MACBETH, assim como diversas aplicações práticas desta metodologia podem ser verificadas em Bana e Costa, J. M. De Corte, J.C. Vansnick, 2005). As considerações básicas sobre o uso do software M-MACBETH está detalhada em (C. A. Bana e Costa, J. C. Vansnick, J. M. De Corte, 2003).

### Resumo do Capítulo 3

Neste capítulo apresentou-se a metodologia multicritério AHP, seus benefícios, limitações e aplicações. Mostrou-se como elaborar a forma de uma hierarquia, o uso da escala de prioridades de julgamentos através do preenchimento da matriz de julgamentos e o resumo dos passos recomendados para aplicação do AHP. Por fim, apresentaram-se as características do Método MACBETH e a comparação com o AHP.

## **4 ASPECTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DOS REGIMES OPERACIONAIS DE GD A BIOGÁS DE RSU**

A conexão de fontes de Geração Distribuída em redes de distribuição está ocasionando muitas reflexões e estudos de como se comportarão os sistemas de distribuição de energia elétrica, visto que, esta nova prática ocasionará mudanças nas concepções e nas filosofias de operação, manutenção e planejamento da expansão das redes de distribuição. Estas conexões podem trazer impactos significativos positivos e/ou negativos, tanto para os consumidores quanto para as distribuidoras.

Dentre os impactos mais preocupantes estão àqueles relacionados aos índices de itens da qualidade de energia elétrica (QEE). Nos padrões brasileiro 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 (SOUZA, 2009).

A garantia desses índices é um desafio muito grande para as empresas distribuidoras de energia elétrica, pois, a maioria dessas fontes é intermitente e com limitações em sua flexibilidade de geração (o biogás de aterros depende do tipo de resíduos, umidade e temperatura), dessa forma a definição dos regimes operacionais das GDs a biogás de RSU é indispensável (LIMA, 2006). Para tanto, diversos aspectos operacionais e técnicos das redes de distribuição podem ser considerados como critérios na determinação de regimes operacionais de GDs, dentre eles podemos citar:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Carregamento dos Cabos Condutores Tronco (Ccc);
- Perdas de energia ativa e reativa;
- Serviços Ancilares.

#### 4.1 Tensão em regime permanente

Os problemas de nível de tensão (NT) em uma RD causam diversos transtornos para a distribuidora, os quais podem ser desde a insatisfação dos seus clientes com QEE entregue, até a realização de compensações financeiras pela distribuidora aos seus clientes. A conexão da GD pode ser utilizada pela distribuidora para corrigir os níveis de tensão nos momentos de ultrapassagem dos limites estabelecidos pelo agente regulador.

Os limites para os níveis de tensão estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, 2010 – Qualidade da Energia Elétrica - são classificados 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 3 indica os níveis de tensão para pontos de conexão em média tensão.

Tabela 3 – 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.

A GD a biogás 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 (BRITO, 2007).

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 a GD 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.

## **4.2 Fator de potência**

Referente ao fator de potência (FP), o módulo 8 do PRODIST, 2010 – Qualidade da Energia Elétrica - determina que no ponto de conexão em que a tensão de operação seja inferior a 230 kV, 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.

A GD pode auxiliar à distribuidora de energia elétrica como um dispositivo para correção do FP da RD através do fornecimento e/ou absorção de energia reativa.

O FP medido no ponto de conexão da RD com a subestação (SE) da Distribuidora (Barra de MT) será influenciado pelo despacho de energia de uma GD a uma RD, logo, estes valores devem ser considerados na determinação do regime operacional da GD, visto que, devem ser respeitados os limites de FP citados.

## **4.3 Perdas de energia ativa e reativa**

As perdas de energia elétrica que ocorrem nos sistemas de distribuição são denominadas pelo Módulo 7 do PRODIST, 2010 – Cálculo de Perdas Distribuição - como perdas globais de energia e são divididas em: perdas comerciais e perdas técnicas. (ANEEL, 2010).

São perdas comerciais aquelas referentes à energia entregue ao consumidor, mas não faturada ou faturada incorretamente. Enquanto as técnicas são inerentes ao processo de distribuição de energia, sendo causadas, em carga, devido à passagem da corrente elétrica nos diversos elementos que compõem uma rede de distribuição e, em vazio, devido à excitação magnética do núcleo dos transformadores. As distribuidoras devem, portanto, ser capazes de

identificar as perdas por tipo (técnicas ou comerciais) e o local onde ocorrem, para tentarem alcançar o nível de perdas ótimo.

Em relação às perdas comerciais, o nível ótimo é zero, isto é, o ideal é que toda energia realmente entregue aos consumidores seja faturada corretamente. Já, em relação às perdas técnicas, o nível ótimo será em função da topologia e do comprimento das redes, dos materiais e dos equipamentos utilizados, do comportamento da carga (equilíbrio, fator de carga, demanda máxima, nível de carregamento permissível).

As perdas técnicas mais significativas num sistema de distribuição ocorrem nos condutores primários, nos transformadores de distribuição e nos condutores secundários, sendo geralmente desprezadas as perdas nos ramais de ligação, nos medidores, nos equipamentos de proteção e de manobra, nos reguladores de tensão, entre outros, por serem suficientemente pequenas.

As perdas de energia dos sistemas de distribuição são classificadas segundo os níveis de tensão, como:

a) Redes do Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT)

As perdas de energia do SDAT são apuradas pela distribuidora a partir dos dados dos sistemas de medição, devendo ser discriminadas entre os níveis de tensão dos subgrupos do SDAT (A1, A2 e A3). Na impossibilidade do uso exclusivo da medição para o cálculo de perdas de energia das redes do SDAT, a distribuidora deverá segmentá-lo em subsistemas de forma a maximizar a apuração das perdas de energia por medição.

b) Redes do Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT)

A perda de potência para a demanda média ( $\Delta P$ ) nas redes de distribuição do SDMT são estimadas através do modelo de regressão linear múltipla apresentado na equação 6.

$$\Delta P = 0,95 * \exp(-6,34 + 1,82 * \ln(I) + 0,77 * \ln(CT) + 0,39 * \ln(RT) + 0,16 * \ln(CR)). 10^{-3} [MW]. \quad (6)$$

onde:

*I*: corrente média;

*CT*: comprimento do condutor tronco;

*RT*: resistência do condutor tronco;

*CR*: comprimento do condutor ramal.

As conexões de GDs nos sistemas de distribuição podem reduzir ou aumentar os níveis de perdas de energia elétrica. Esta contribuição depende do ponto onde se conectará a GD e principalmente do seu regime operacional. Cálculos experimentais realizados em algumas distribuidoras mostram que até mesmo pequenas fontes de GD instaladas em pontos ótimos permitem reduzir as quedas de tensão nas RD em até 15% e as perdas de energia em mais de 25%. (BARIN, 2007).

Os níveis de perdas desejados são os mínimos entre os valores aceitáveis. Os níveis de perdas podem ser classificados conforme tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos níveis de perdas de energia em RD.

| Níveis de Perdas em RD |                    |
|------------------------|--------------------|
| Perdas baixas          | menores do que 2%  |
| Perdas aceitáveis      | de 6 a 10%         |
| Perdas altas           | de 10% a 14%       |
| Perdas excessivas      | maiores do que 14% |

Fonte: (BARIN, 2007)

#### 4.4 Carregamento dos cabos condutores tronco (Ccc)

O condutor tronco é definido no Módulo 7, PRODIST, 2010, como o trecho de alimentador que parte da subestação até o ponto mais próximo desta onde a maior corrente a jusante é menor ou igual à maior corrente de qualquer ramal a montante. (ANEEL, 2010). O carregamento dos cabos condutores tronco (Ccc) é um dos fatores que pode determinar o momento em que é necessária a realização de uma obra de expansão e/ou melhoria de uma RD. Cabem as distribuidoras de energia elétrica estabelecer, através de suas normas técnicas, quais os níveis máximos de Ccc das suas RD, de forma a garantir uma reserva de capacidade que possibilite o remanejamento de cargas entre RD, em caso de contingência ou em regime permanente.

A conexão de fontes de GD numa rede de distribuição pode influenciar diretamente nos níveis de Ccc, de forma a contribuir para a redução destes. Para isso, a conexão deve ocorrer no ponto em que estiverem conectadas as maiores cargas instaladas desta RD e o despacho da GD deve ocorrer em coordenação com essas cargas. Por outro lado, pode haver



um aumento nos níveis de Ccc, caso o despacho da GD não ocorrer em coordenação com as maiores cargas instaladas nesta RD. Portanto o Ccc de uma RD deve ser considerado quando da determinação dos regimes operacionais de fontes de GD conectadas em uma RD.

#### 4.5 Serviços Ancilares

Serviços Ancilares (S.A), 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. (INEE, 2006).

Em outras palavras pode-se definir S.A como serviços tradicionalmente agregados de forma implícita à venda de energia elétrica e que não correspondem propriamente à energia gerada em si.

Em termos de regulamentação do setor elétrico brasileiro a Resolução Normativa ANEEL n° 265, de 10 de junho de 2003, estabelece “Procedimentos para Prestação de Serviços Ancilares de Geração e Transmissão”. Esta resolução trata exclusivamente de geração e transmissão do SIN. Entretanto, a maioria dos geradores de autoprodutores, além daqueles de produtores independentes conectados às redes de distribuição, operam em paralelo com a rede pública. Trata-se, portanto de uma situação que precisa ser reconhecida e, sobretudo, regulamentada, em relação aos serviços ancilares para os sistemas de distribuição, tendo em vista, a difusão e crescente importância da geração distribuída.

O tema é da maior importância e sua abordagem, neste momento, é oportuna, para promover a adequada remuneração dos serviços ancilares promovidos pela geração distribuída às redes de distribuição, inclusive aquelas que não são supridas pelo Sistema Interligado Nacional – SIN, em vista do reconhecimento institucional dessa modalidade de geração pela Lei 10.848/04 , regulamentada pelo Decreto 5163/04.

Alguns dos SA que a GD pode fornecer para RD:

- a) Reserva de potência ativa - provisão de potência ativa efetuada pelas unidades geradoras;
- b) 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;

a) Reserva de Potência Ativa

As reservas de potência ativa são necessárias para operar o sistema com um grau de segurança e qualidade adequadas. 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 “reserva” 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, corrigindo desequilíbrios entre a geração e a carga causadas por quedas, saídas de geradores ou grandes cargas da RD. 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 / ou grandes cargas da RD (CHAVES, 2009).

b) Suporte de Reativos

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 e injetar os reativos em coordenação com o carregamento reativo da rede de distribuição é o ideal (CHAVES, 2009).

## Resumo do Capítulo 4

Neste capítulo apresenta-se aspectos técnicos e operacionais das redes de distribuição, que podem ser considerados para determinar os regimes operacionais de fontes de GD a biogás de RSU, tais como: tensão em regime permanente, fator de potência, perdas de energia ativa e reativa e carregamento dos cabos condutores tronco.

Mostra-se ainda seus limites e como podem ser influenciados pela conexão de GD em RD.

Por fim, apresenta-se a definição de Serviços Ancilares, sua regulamentação no âmbito da geração e transmissão de energia elétrica, alguns SA que podem ser fornecidos por fontes de GD e como estes podem influenciar na determinação dos regimes operacionais de GD.

## 5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

### 5.1 Introdução

Geralmente a melhor opção a ser tomada por um especialista ou agente de decisão (AD) não deve ser aquela baseada apenas em um critério isolado. É importante que um conjunto de alternativas de determinado problema seja analisado por mais de um critério, segundo os interesses e julgamentos de comum acordo entre os AD.

Um processo multicritério de apoio à decisão objetiva proporcionar um maior grau de conformidade e coerência entre: a evolução de um processo decisório e os sistemas de valores e objetivos daqueles envolvidos neste processo. Para este propósito, conceitos, ferramentas e procedimentos devem ser concebidos para ajudar-nos a fazer nossa escolha em presença de ambiguidade e incerteza. Os processos multicritérios têm demonstrado resultados bastante superiores às abordagens monocritério, que baseiam sua lógica na racionalidade econômica, ignorando os interesses particulares dos envolvidos no processo decisório. (BANA E COSTA, 1992).

Estipular o regime em que deve operar uma GD conectada a uma RD considerando somente um critério pode ser temerário, visto que, conforme já mencionado, o despacho de energia elétrica pela GD em momentos inadequados pode desencadear diversos impactos negativos como o aumento dos níveis de tensão na rede, das perdas de energia, do Ccc entre outros. Tendo em vista que vários aspectos técnicos e operacionais de uma RD podem ser afetados com a conexão de uma GD, definir o melhor regime operacional através do uso de metodologias multicritério é o mais prudente.

Sendo assim, para identificar o regime operacional adequado de uma GD abastecida por biogás oriundo de RSU conectada em redes de distribuição, e em função do que foi mencionado acima, optou-se neste trabalho em utilizar a metodologia multicritério AHP, através da utilização do *software* M-MACBETH. Para tanto, com objetivo de se obter resultados mais adequados, devem ser considerados não apenas um, mas diversos critérios, tanto de natureza quantitativa como qualitativa.

Os critérios quantitativos são representados por dados reais, que indicam diretamente o valor de cada característica técnica no processo. Os critérios quantitativos influenciados por conexões de GD a biogás em redes de distribuição utilizados neste trabalho são: níveis de

tensão em regime permanente (NT); fator de potência da RD (FP); carregamento dos cabos condutores tronco (Ccc); perdas de potência ativa (P\_kW).

Os critérios qualitativos são aqueles que apresentam imprecisão em seus valores, por dificuldades em sua quantificação. Os critérios qualitativos utilizados neste trabalho são os Serviços Ancilares: Reserva de Potência Ativa e Suporte de Reativos.

Cada critério quantitativo e qualitativo deve ter seus limites e restrições valorados por especialistas ou agentes de decisão (AD), de acordo com os aspectos técnicos e operacionais da RD em que ocorrerá a conexão da GD. Além disso, os AD são os responsáveis pela atribuição dos pesos de cada critério. A resposta obtida será, então, uma classificação ou *ranking* dos melhores períodos ou horas do dia (regime operacional) em que é mais vantajosa a conexão da GD a biogás de RSU na RD.

## 5.2 Estudo de caso

A fim de aplicar a metodologia multicritério para determinar os melhores regimes operacionais de fontes de GD a biogás de RSU conectadas em um sistema de distribuição, realizou-se um estudo de caso no qual uma GD (denominada GD AS) a biogás proveniente de RSU de um aterro sanitário será conectada a uma rede de distribuição (Alimentador). Este aterro sanitário está localizado na região metropolitana de Porto Alegre e possui um potencial de geração de energia elétrica, através da utilização do Biogás oriundo dos RSU, que possibilita a conexão de uma fonte de GD de 6 MW, (MARTINS, 2012). A empresa responsável pelo aterro sanitário possui uma potência total de transformação instalada de 2762,5 kVA, constituindo-se num consumidor com demanda contratada de 1450 kW, classificado como subgrupo A4 (2,3kV/25kV), classe industrial e tarifa horosazonal verde.

O alimentador onde está conectado o aterro é denominado de AL03 da Subestação Areal (SE AR), localizada no município de Butiá – RS, pertencente à Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D. O alimentador possui uma tensão de trabalho de 23 kV e sustenta além do aterro sanitário, consumidores comerciais, residenciais e industriais. A figura 6 apresenta a configuração georeferenciada do AL03 e as localizações da SE AR e da GD AS.

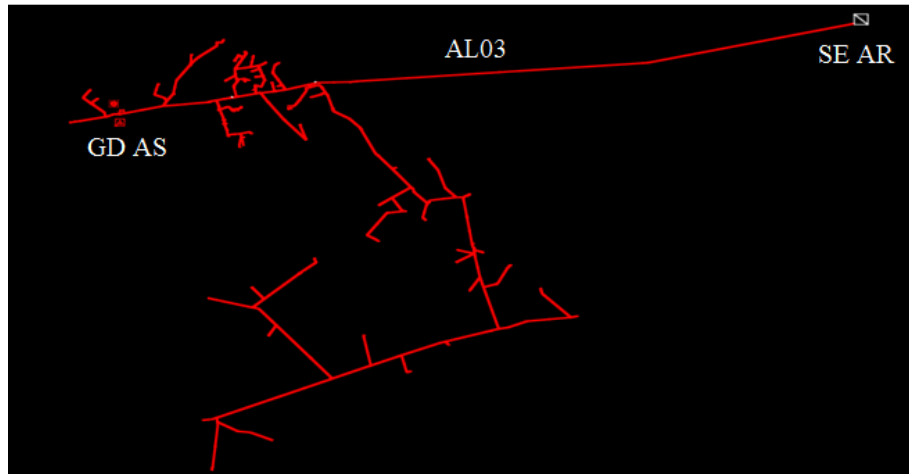


Figura 6 – Alimentador onde ocorrerá a conexão da GD a biogás de RSU.

Cada estudo de caso exige um grupo de AD do campo de estudo em questão. Neste estudo o grupo de AD é formado por especialistas da distribuidora de energia elétrica e pelos responsáveis pela parte técnica da fonte de GD.

A modelagem do método multicritério AHP através do *software* M-MACBETH deve ser realizada em cinco etapas básicas:

- 1 – Formulação da árvore hierárquica, com a apresentação dos critérios que serão avaliados;
- 2 – Definições de quais serão as “alternativas” - períodos possíveis de conexão da GD na rede, na base de entrada do *software*;
- 3 - Definição de como serão classificados cada critério quanto a base de comparação: par à par; par à par com referências; níveis qualitativos de performances; níveis quantitativos de performances;
- 4 – Realização da comparação par à par e/ou definição da função de pontuação, limites inferiores e superiores de cada um dos critérios – formação das matrizes paritárias.
- 5 – Realização da comparação par a par entre os critérios (critérios vs critérios).

Durante o desenvolvimento das etapas 4 e 5, o *software* M-MACBETH verifica a consistência dos julgamentos definidos nas matrizes. Caso exista alguma inconsistência ou incompatibilidade entre os julgamentos, o *software* faz um alerta instantâneo, sugerindo as modificações necessárias para a correção dos julgamentos.

Como resultados deste estudo, são apresentados dois regimes operacionais para GD AS. O primeiro regime operacional é resultado da utilização do método AHP somente com

critérios quantitativos já o segundo regime operacional é resultado da utilização de critérios quantitativos e qualitativos.

### 5.2.1 Determinação do Regime Operacional da GD AS com Critérios Quantitativos

Os critérios quantitativos que foram estabelecidos pelos AD para definição dos horários em que deve ocorrer a conexão da GD AS no alimentador são: níveis de tensão em regime permanente (NT); fator de potência da RD (FP); carregamento dos cabos condutores tronco (Ccc); perdas de potência ativa (P\_kW). Definidos os critérios quantitativos, devem-se realizar as cinco etapas de modelagem do método no *software* M-MACBETH, conforme descrito no item 5.2.

#### 1 - Formulação da Arvore hierárquica de Avaliação

Com os critérios já citados criou-se no *software* M-MACBETH a árvore hierárquica de avaliação, conforme apresentado na figura 7.

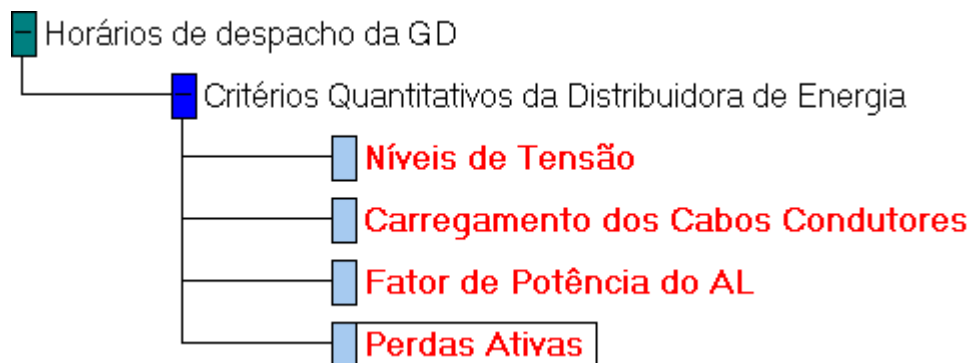


Figura 7 – Árvore hierárquica de avaliação.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

#### 2 - Definições das Alternativas

Estabelecida à árvore hierárquica, deve-se definir as “alternativas”, ou seja, quais as possíveis opções de horários de conexão da GD AS ao alimentador. A figura 8 apresenta as alternativas inseridas no *software* M-MACBETH.

|    | Nome       | Nome abreviado |
|----|------------|----------------|
| 1  | Hora 1:00  | 01:00          |
| 2  | Hora 2:00  | 02:00          |
| 3  | Hora 3:00  | 03:00          |
| 4  | Hora 4:00  | 04:00          |
| 5  | Hora 5:00  | 05:00          |
| 6  | Hora 6:00  | 06:00          |
| 7  | Hora 7:00  | 07:00          |
| 8  | Hora 8:00  | 08:00          |
| 9  | Hora 9:00  | 09:00          |
| 10 | Hora 10:00 | 10:00          |
| 11 | Hora 11:00 | 11:00          |
| 12 | Hora 12:00 | 12:00          |
| 13 | Hora 13:00 | 13:00          |
| 14 | Hora 14:00 | 14:00          |
| 15 | Hora 15:00 | 15:00          |
| 16 | Hora 16:00 | 16:00          |
| 17 | Hora 17:00 | 17:00          |
| 18 | Hora 18:00 | 18:00          |
| 19 | Hora 19:00 | 19:00          |
| 20 | Hora 20:00 | 20:00          |
| 21 | Hora 21:00 | 21:00          |
| 22 | Hora 22:00 | 22:00          |
| 23 | Hora 23:00 | 23:00          |
| 24 | Hora 24:00 | 24:00          |

Figura 8 – Tabela das Alternativas dos horários de conexão da GD.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

### 3 - Definição da classificação de cada critério quanto à base de comparação

Conforme já mencionado, neste momento estão sendo utilizados somente critérios quantitativos, dessa forma, os quatro critérios estabelecidos devem ser considerados no *software* como “níveis quantitativos de performance” e para isto, na janela de configuração de cada critério, deve ser marcada esta opção como base de comparação.

A figura 9 apresenta as janelas dos 04 critérios com a marcação da base de comparação como níveis quantitativos de performance.

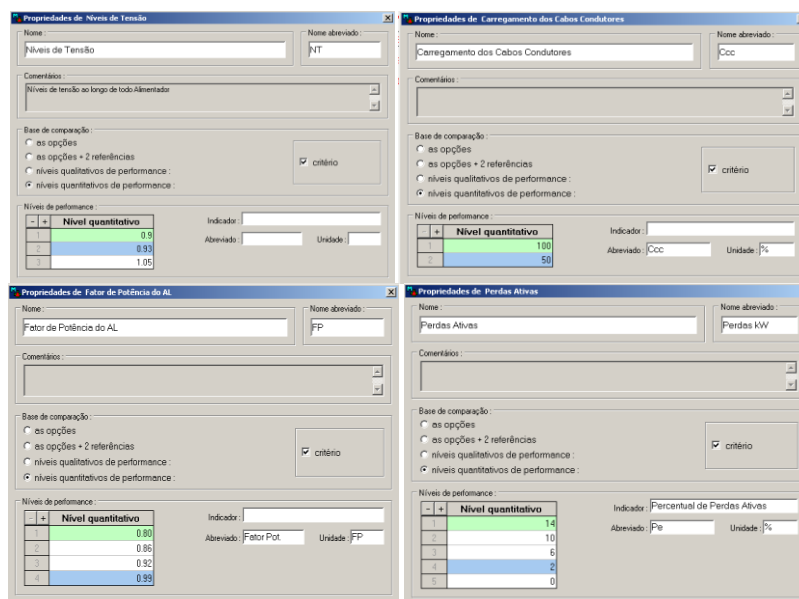


Figura 9 – Janelas dos critérios com a marcação da base de comparação como “níveis quantitativos de performance”.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.



Nesta classificação a base de comparação do critério é indireta, ou seja, a avaliação da importância ou “atratividade” das alternativas no critério é feita indiretamente através da utilização de uma função de pontuação, a qual converte os valores das performances das alternativas em pontuações. Cada função de pontuação possui um limite superior e um inferior. O limite superior representa importância máxima e equivale a pontuação igual à 100 (cem) pontos já o limite inferior representa importância nula e equivale a pontuação igual à 0 (zero). Cabem aos AD a determinação da função de pontuação, limites superiores e inferiores de cada critério.

#### 4 - Definição da função de pontuação, limites inferiores e superiores de cada um dos critérios – formação das matrizes paritárias.

No critério **Níveis de Tensão (NT)** para os AD determinar a função de pontuação, com limites superior e inferior, os mesmos utilizaram como embasamento para seus julgamentos, os limites para os níveis de tensão, apresentados na Tabela 8 do item 4.1. Sendo assim, os valores utilizados para formatação da função foram os níveis de tensão 0,90 pu; 0,93 pu e 1,05 pu, sendo que 0,90 pu representa o limite superior da função e 0,93pu o limite inferior.

A figura 10 apresenta a função de pontuação do critério (NT) definida a partir dos julgamentos dos AD.

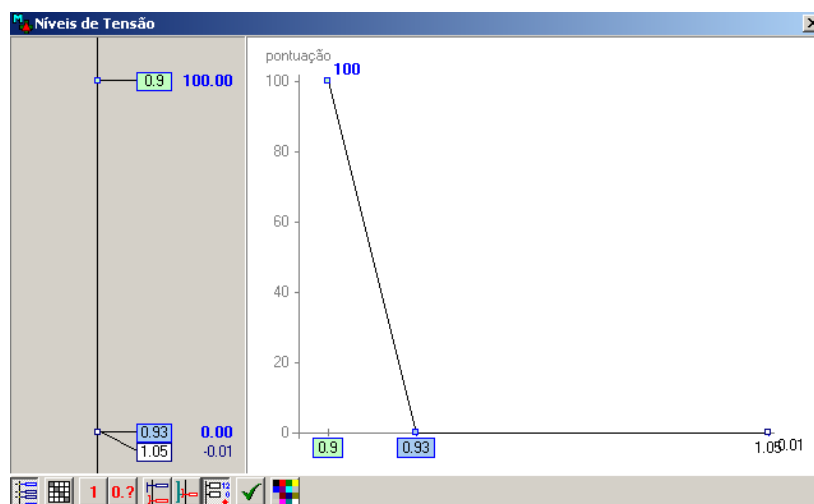


Figura 10 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério Níveis de Tensão.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH

De acordo com Figura 9 a função de pontuação do critério NT converte os valores da função em pontuações da seguinte forma:

Em cada horário do dia em que o nível de tensão, no ponto do AL a ser monitorado, estiver entre 0,93 pu e 1,05 pu a pontuação estabelecida pelo *software* será (0) zero (importância nula), ou seja, não é necessário o despacho de energia elétrica pela GD AS no AL.

Nos horários em que o nível de tensão neste ponto estiver entre 0,90 pu e 0,93 pu a pontuação estabelecida pelo *software* é maior que (0) zero e e menor que 100 (cem) pontos, sendo este valor é definido de acordo pela função linear elaborada pelos AD, ou seja, é necessário despacho de energia pela GD no AL.

Já nos horários em que o nível de tensão estiver abaixo de 0,90 pu a pontuação estabelecida pelo *software* é máxima 100 (cem) pontos, ou seja, é necessário o máximo despacho da GD no AL.

Após definida a função de pontuação é possível verificar no software M-MACBETH a formação da matriz de comparação paritária para avaliação do critério NT.

A figura 11 apresenta a matriz de comparação paritária dos valores da base de comparação para avaliação do critério NT.

|      | 0.9  | 0.93    | 1.05     | Escala actual |
|------|------|---------|----------|---------------|
| 0.9  | nula | extrema | positiva | 100.00        |
| 0.93 |      | nula    | positiva | 0.00          |
| 1.05 |      |         | nula     | -0.01         |

Julgamentos consistentes

extrema  
mt. forte  
forte  
moderada  
fraca  
mt. fraca  
nula

Figura 11 – Matriz de comparação paritária do critério (NT).

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

No critério **Carregamento dos cabos condutores tronco (Ccc)**, os AD consideraram o exposto no item 4.4 - capítulo 4 para realizar seus julgamentos. Com isso os AD definiram que quando Ccc do alimentador atingir 50% ou mais da sua capacidade nominal de condução de corrente, para uma temperatura final de 50°C, é necessário o despacho da GD AS no AL e quanto maior for o Ccc maior é a necessidade (importância) do despacho da GD.

A figura 12 apresenta o gráfico com a função de pontuação com seus limites superior e inferior de acordo com os julgamentos dos AD para este critério.

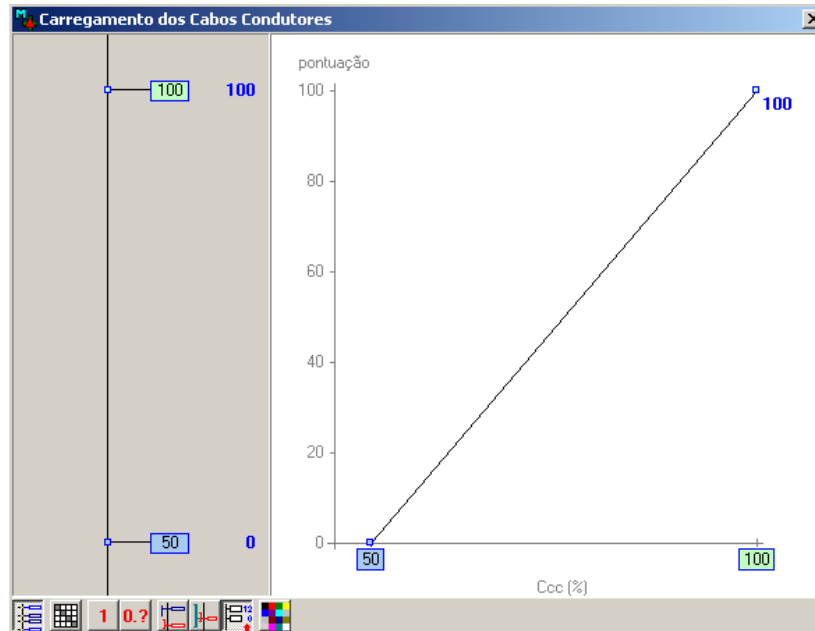


Figura 12 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério Ccc

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Os limites superior e inferior utilizados pelos AD na função de pontuação são, respectivamente, 100% e 50% . A função de pontuação converte os valores da função em pontuações da seguinte forma:

Nos horários em que o Ccc do AL estiver abaixo de 50% a pontuação estabelecida pelo *software* será menor que 0(zero), ou seja, não há necessidade de despacho da GD.

Quando o Ccc estiver entre 50% e 100%, será necessário despacho da GD para o AL, sendo que, o valor da pontuação será definida pela função linear elaborada pelos AD. Já para o Ccc igual ou superior à 100% o *software* atribuirá a pontuação máxima, ou seja, é necessário o máximo despacho da GD no AL. Após definida a função de pontuação é possível verificar no *software* M-MACBETH a formação da matriz de comparação paritária para avaliação do critério Ccc.

A figura 13 apresenta a matriz de comparação paritária entre valores da base de comparação resultante da função definida para o critério Ccc.

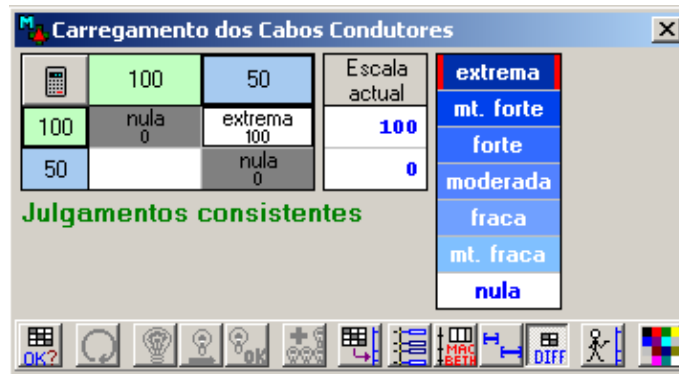


Figura 13 – Matriz de comparação paritária do critério Ccc.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

No critério **Fator de Potência da RD (FP)**, para a formatação da função de pontuação os AD julgaram que há necessidade de despacho da GD para o AL somente quando os valores do fator de potência for indutivos, visto que, as medições do FP deste AL não apresentam valores capacitivos em nenhum momento do dia, conforme as características do AL apresentadas no Apêndice A. Sendo assim, os valores utilizados para formatação da função foram 0,99 ind, 0,92 ind, 0,86 ind e 0,80 ind, sendo que 0,80 ind e 0,99 ind são respectivamente os limites superior e inferior.

A figura 14 apresenta o gráfico com a função de pontuação com seus limites superior e inferior de acordo com os julgamentos dos AD para este critério.

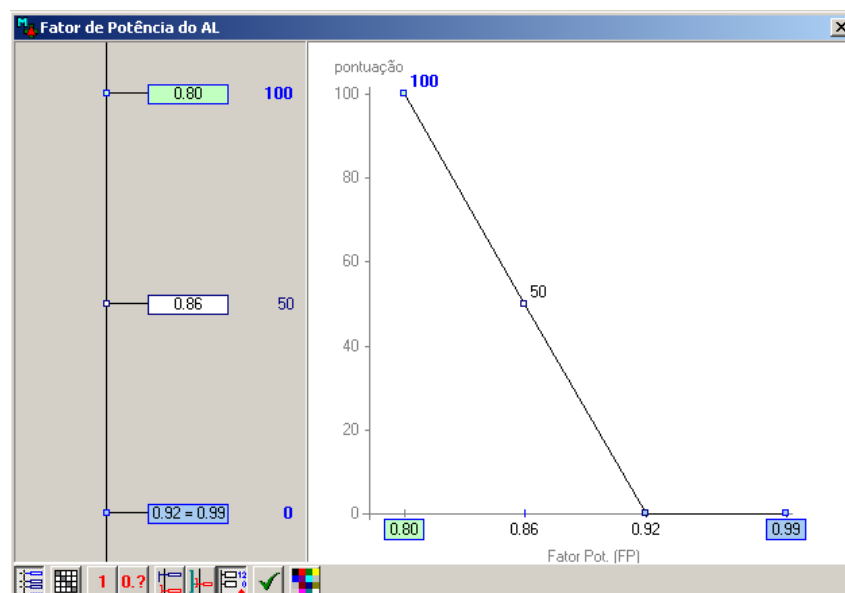


Figura 14 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério FP.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

A função de pontuação converte os valores da função em pontuações da seguinte forma:

Nos horários em que o FP do AL, medido na barra da SE, estiver entre os valores de 0,92 ind a 0,99 ind a pontuação estabelecida pelo *software* será 0 (zero), ou seja, não há necessidade de despacho da GD.

Quando o FP estiver entre 0,92 ind à 0,80 ind será necessário despacho da GD para o AL, cujo valores da pontuação será definida pela função linear elaborada pelos AD. Já para o FP igual ou inferior à 0,80ind o *software* atribuirá a pontuação máxima – 100 (cem), ou seja, é necessária o máximo despacho da GD no AL afim de realizar a correção do FP deste AL.

A figura 15 apresenta a matriz de comparação paritária dos valores da base de comparação para avaliação do critério FP.

|                          | 0.80 | 0.86 | 0.92  | 0.99     | Escala actual |        |           |
|--------------------------|------|------|-------|----------|---------------|--------|-----------|
| 0.80                     |      | nula | fraca | forte    | positiva      | 100.00 | extrema   |
| 0.86                     |      |      | nula  | positiva | positiva      | 99.99  | mt. forte |
| 0.92                     |      |      |       | nula     | nula          | 0.00   | forte     |
| 0.99                     |      |      |       |          | nula          | 0.00   | moderada  |
| Julgamentos consistentes |      |      |       |          |               |        | fraca     |
|                          |      |      |       |          |               |        | mt. fraca |
|                          |      |      |       |          |               |        | nula      |

Figura 15 – Matriz de comparação paritária critério FP.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

No critério **Perdas Ativas (P<sub>kW</sub>)** para os AD determinar a função de pontuação, com limites superior e inferior, os mesmos utilizaram como embasamento para seus julgamentos, os níveis de perdas de potência ativa, apresentados na Tabela 9 do capítulo 4 - item 4.3. Sendo assim, os valores utilizados para formatação da função foram os níveis de perdas de 0%, 2%, 6%, 10% e 14%, sendo que 14% de perdas representa o limite superior da função e 0% de perdas o limite inferior.

A figura 16 apresenta a função de pontuação do critério (NT) definida a partir dos julgamentos dos AD.

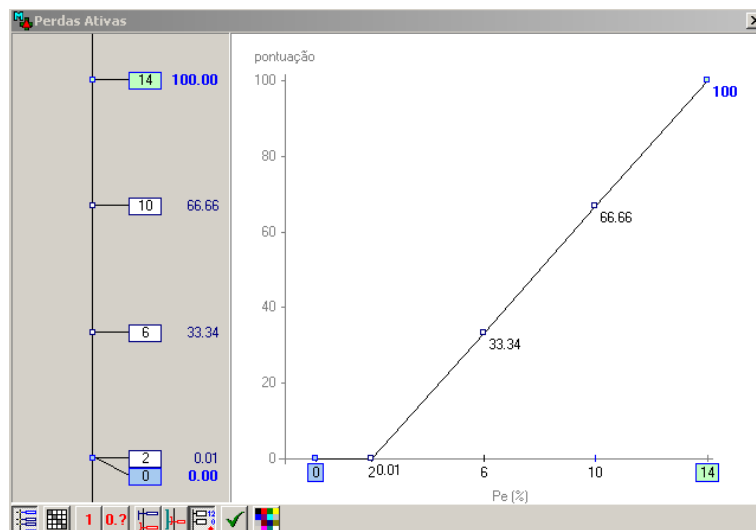


Figura 16 – Função de pontuação a partir dos julgamentos dos AD - Critério Perdas Ativas.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Nos horários em que as  $P_{kW}$  do AL, estiverem com valores percentuais entre 0% e 2% a pontuação estabelecida pelo *software* é 0 (zero), ou seja, não há necessidade de despacho da GD.

Quando as  $P_{kW}$  estiverem entre 2% e 14% será necessário despacho da GD para o AL, cujo valores da pontuação será definida pela função linear elaborada pelos AD. Já para o  $P_{kW}$  igual ou superior à 14% o *software* atribuirá a pontuação máxima – 100 (cem) pontos, ou seja, é necessário o máximo despacho da GD no AL.

A figura 17 apresenta a matriz de comparação paritária entre valores da base de comparação resultante da função definida para o critério  $P_{kW}$ .

|    | 14           | 10                | 6              | 2                 | 0                  | Escala actual |           |
|----|--------------|-------------------|----------------|-------------------|--------------------|---------------|-----------|
| 14 | nula<br>0.00 | moderada<br>33.34 | forte<br>66.66 | extrema<br>99.99  | positiva<br>100.00 | 100.00        | extrema   |
| 10 |              | nula<br>0.00      | fraca<br>33.32 | moderada<br>66.65 | positiva<br>66.66  | 66.66         | mt. forte |
| 6  |              |                   | nula<br>0.00   | fraca<br>33.33    | positiva<br>33.34  | 33.34         | forte     |
| 2  |              |                   |                | nula<br>0.00      | positiva<br>0.01   | 0.01          | moderada  |
| 0  |              |                   |                |                   | nula<br>0.00       | 0.00          | fraca     |
|    |              |                   |                |                   |                    |               | mt. fraca |
|    |              |                   |                |                   |                    |               | nula      |

**Julgamentos consistentes**

Figura 17 – Matriz de comparação paritária do critério Perdas Ativas.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Após a definição das funções de pontuação de cada critério, com seus limites inferiores e superiores, para os critérios com bases de comparação “Níveis Quantitativos de Performances”, a conversão das performances das alternativas em pontuações requer a introdução prévia das referências de cada critério na tabela das performances do *software* M\_MACBETH.

Os valores das performances das alternativas foram obtidos através do diagnóstico dos aspectos técnicos e operacionais do AL apresentado no Apêndice A, sendo que neste, determinaram-se para cada hora do dia os valores de NT, Ccc, FP e P\_kW do AL.

Para o critério NT optou-se por utilizar os valores dos NT do “ponto 2”, pois é o ponto do AL que apresenta o menor perfil de tensão quando comparado com os outros pontos do AL.

No critério Ccc utilizaram-se os valores percentuais do carregamento dos cabos condutores tronco. Os condutores tronco do AL são 4/0 MCM CAA, os quais possuem uma capacidade de condução de corrente de 282A para uma temperatura final de 50°C.

A figura 18 apresenta o ponto (ponto 2) que possui a maior queda de tensão e o trecho considerado como tronco do AL.

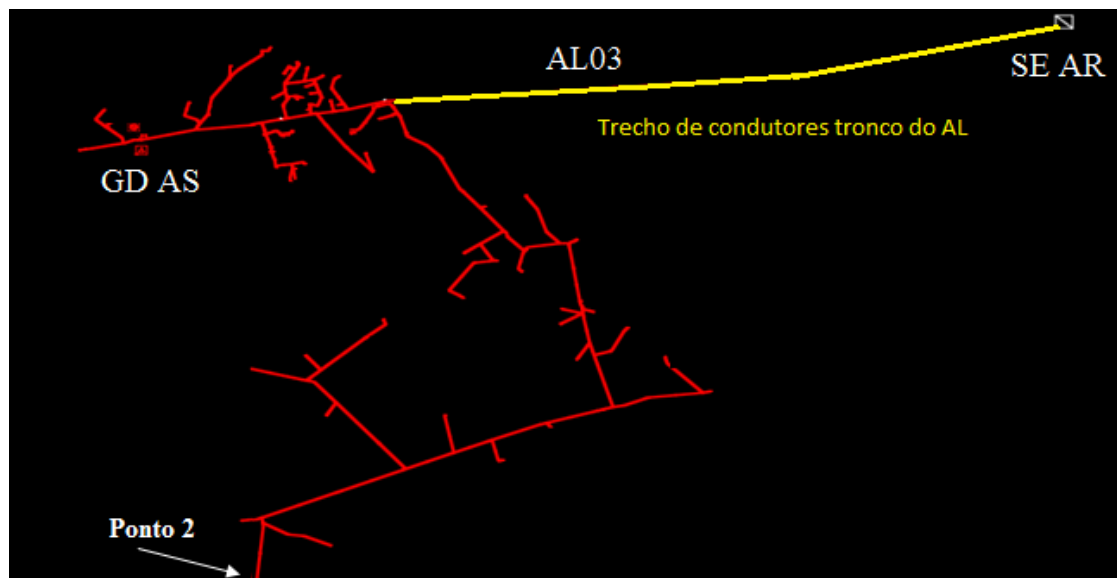


Figura 18 – Trecho de condutores tronco e ponto de menor perfil de tensão do AL

A tabela 5 apresenta o resumo do diagnóstico dos aspectos técnicos e operacionais do AL. (Apêndice A)

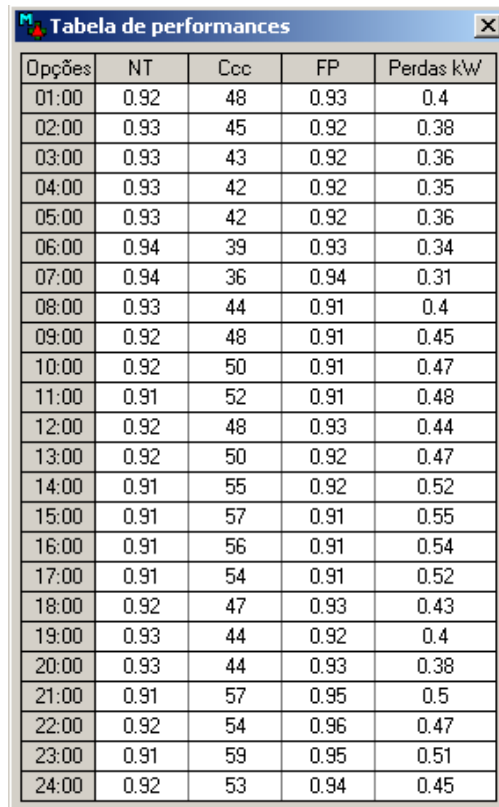
Tabela 5 – Resumo do diagnóstico dos Aspectos técnicos e operacionais do AL

| Diagnóstico dos aspectos técnicos e operacionais do AL |                        |      |      |                                    |       |            |            |     |       |          |
|--|------------------------|------|------|------------------------------------|-------|------------|------------|-----|-------|----------|
| Período  | Curva de demanda do AL |      | FP   | Curva de Carga do Aterro Sanitário |       | NT ponto 1 | NT ponto 2 | Ccc | P_kW  | % perdas |
|  | MW                     | MVAr |      | cos                                | MW    |            |            |     |       |          |
| 00:00  | 5,44                   | 2,02 | 0,94 | 1,238                              | 0,443 | 0,920      | 0,917      | 53  | 24,4  | 0,45     |
| 01:00  | 4,80                   | 1,96 | 0,93 | 1,159                              | 0,454 | 0,926      | 0,924      | 48  | 19,03 | 0,40     |
| 02:00  | 4,56                   | 1,93 | 0,92 | 1,11                               | 0,449 | 0,928      | 0,926      | 45  | 17,23 | 0,38     |
| 03:00  | 4,37                   | 1,90 | 0,92 | 1,082                              | 0,448 | 0,931      | 0,929      | 43  | 15,76 | 0,36     |
| 04:00  | 4,28                   | 1,86 | 0,92 | 1,065                              | 0,433 | 0,932      | 0,930      | 42  | 15,12 | 0,35     |
| 05:00  | 4,28                   | 1,84 | 0,92 | 1,026                              | 0,424 | 0,932      | 0,930      | 42  | 15,34 | 0,36     |
| 06:00  | 4,09                   | 1,56 | 0,93 | 0,914                              | 0,356 | 0,938      | 0,936      | 39  | 14,01 | 0,34     |
| 07:00  | 3,76                   | 1,42 | 0,94 | 0,879                              | 0,34  | 0,943      | 0,941      | 36  | 11,49 | 0,31     |
| 08:00  | 4,39                   | 1,97 | 0,91 | 0,957                              | 0,414 | 0,930      | 0,927      | 44  | 17,35 | 0,40     |
| 09:00  | 4,83                   | 2,22 | 0,91 | 1,021                              | 0,441 | 0,923      | 0,920      | 48  | 21,72 | 0,45     |
| 10:00  | 5,07                   | 2,29 | 0,91 | 1,071                              | 0,451 | 0,920      | 0,916      | 50  | 23,87 | 0,47     |
| 11:00  | 5,20                   | 2,31 | 0,91 | 1,092                              | 0,456 | 0,918      | 0,915      | 52  | 25,05 | 0,48     |
| 12:00  | 4,97                   | 1,99 | 0,93 | 1,063                              | 0,412 | 0,924      | 0,921      | 48  | 21,83 | 0,44     |
| 13:00  | 5,12                   | 2,16 | 0,92 | 1,051                              | 0,424 | 0,921      | 0,918      | 50  | 24,13 | 0,47     |
| 14:00  | 5,48                   | 2,36 | 0,92 | 1,089                              | 0,444 | 0,915      | 0,911      | 55  | 28,47 | 0,52     |
| 15:00  | 5,70                   | 2,54 | 0,91 | 1,148                              | 0,45  | 0,911      | 0,907      | 57  | 31,18 | 0,55     |
| 16:00  | 5,59                   | 2,56 | 0,91 | 1,131                              | 0,461 | 0,912      | 0,908      | 56  | 30,01 | 0,54     |
| 17:00  | 5,46                   | 2,43 | 0,91 | 1,104                              | 0,445 | 0,915      | 0,911      | 54  | 28,37 | 0,52     |
| 18:00  | 4,89                   | 2,00 | 0,93 | 1,062                              | 0,392 | 0,925      | 0,922      | 47  | 21,18 | 0,43     |
| 19:00  | 4,55                   | 1,89 | 0,92 | 1,018                              | 0,395 | 0,930      | 0,927      | 44  | 17,99 | 0,40     |
| 20:00  | 4,53                   | 1,72 | 0,93 | 1,032                              | 0,378 | 0,932      | 0,929      | 44  | 17,17 | 0,38     |
| 21:00  | 5,86                   | 1,85 | 0,95 | 1,227                              | 0,373 | 0,918      | 0,914      | 57  | 29,4  | 0,50     |
| 22:00  | 5,69                   | 1,75 | 0,96 | 1,233                              | 0,381 | 0,921      | 0,917      | 54  | 26,92 | 0,47     |
| 23:00  | 6,08                   | 2,01 | 0,95 | 1,323                              | 0,43  | 0,913      | 0,910      | 59  | 31,12 | 0,51     |

De posse dos valores dos critérios em cada horário foi possível inserir os valores das performances das alternativas no *software* M\_MACBETH.

A figura 19 apresenta a tabela de performances das alternativas (horários) para o despacho da GD no AL.





| Opções | NT   | Ccc | FP   | Perdas kW |
|--------|------|-----|------|-----------|
| 01:00  | 0.92 | 48  | 0.93 | 0.4       |
| 02:00  | 0.93 | 45  | 0.92 | 0.38      |
| 03:00  | 0.93 | 43  | 0.92 | 0.36      |
| 04:00  | 0.93 | 42  | 0.92 | 0.35      |
| 05:00  | 0.93 | 42  | 0.92 | 0.36      |
| 06:00  | 0.94 | 39  | 0.93 | 0.34      |
| 07:00  | 0.94 | 36  | 0.94 | 0.31      |
| 08:00  | 0.93 | 44  | 0.91 | 0.4       |
| 09:00  | 0.92 | 48  | 0.91 | 0.45      |
| 10:00  | 0.92 | 50  | 0.91 | 0.47      |
| 11:00  | 0.91 | 52  | 0.91 | 0.48      |
| 12:00  | 0.92 | 48  | 0.93 | 0.44      |
| 13:00  | 0.92 | 50  | 0.92 | 0.47      |
| 14:00  | 0.91 | 55  | 0.92 | 0.52      |
| 15:00  | 0.91 | 57  | 0.91 | 0.55      |
| 16:00  | 0.91 | 56  | 0.91 | 0.54      |
| 17:00  | 0.91 | 54  | 0.91 | 0.52      |
| 18:00  | 0.92 | 47  | 0.93 | 0.43      |
| 19:00  | 0.93 | 44  | 0.92 | 0.4       |
| 20:00  | 0.93 | 44  | 0.93 | 0.38      |
| 21:00  | 0.91 | 57  | 0.95 | 0.5       |
| 22:00  | 0.92 | 54  | 0.96 | 0.47      |
| 23:00  | 0.91 | 59  | 0.95 | 0.51      |
| 24:00  | 0.92 | 53  | 0.94 | 0.45      |

Figura 19 – Tabela de Performances das alternativas para cada critério

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

### 5 - Quantificações dos pesos de cada Critério (ponderação par a par entre os critérios).

A partir da introdução dos valores das performances dos critérios para todas as alternativas de despacho da GD no AL, o *software* M-MACBETH transforma estes valores em pontuações, a fim de determinar um ranking dos melhores horários de despacho da GD no AL. Para a determinação deste ranking, faz-se necessário que os AD definam, de acordo com seus julgamentos, os pesos que cada critério deve ter para a obtenção do resultado final.

Neste estudo de caso, após a análise dos aspectos técnicos e operacionais do AL, os AD julgaram qual deve ser a ordem de prioridade dos critérios para a definição do melhor regime operacional da GD. A soma dos pesos de cada critério deve resultar em 100 pontos. Sendo assim, os AD decidiram que o critério NT é o que possui maior importância e atribuíram 50 pontos este. O segundo critério mais importante, de acordo com os AD, é o Ccc e atribuíram 25 pontos para este critério, logo após está o critério FP, para o qual atribuíram 16,67 pontos e por fim o critério menos importante dentre os 4 critérios quantitativos é P\_kW com 8,33 pontos.

Realizada esta etapa o *software* M-MACBETH apresenta de forma gráfica a priorização dos critérios – figura 20, conforme os julgamentos estipulados pelos agentes de decisão (AD).

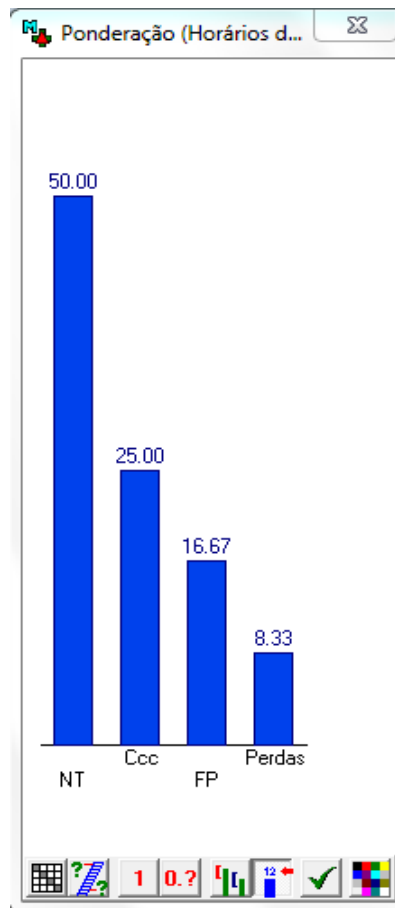


Figura 20 – Pesos dos critérios de acordo com os julgamentos dos AD

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Finalizada a aplicação de todas as etapas descritas, o *software* M\_MACBETH apresenta a classificação final das alternativas avaliadas. Na figura 21 é possível observar o *ranking* das alternativas (horários) em que a GD deve despachar energia elétrica para o AL determinando então o seu regime operacional.

| Opções        | Global | NT     | Ccc    | FP     | Perdas kW |
|---------------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| [ tudo sup. ] | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00    |
| 15:00         | 38.22  | 66.67  | 14.00  | 8.33   | 0.00      |
| 23:00         | 37.83  | 66.67  | 18.00  | 0.00   | 0.00      |
| 16:00         | 37.72  | 66.67  | 12.00  | 8.33   | 0.00      |
| 17:00         | 36.72  | 66.67  | 8.00   | 8.33   | 0.00      |
| 14:00         | 35.83  | 66.67  | 10.00  | 0.00   | 0.00      |
| 11:00         | 35.72  | 66.67  | 4.00   | 8.33   | 0.00      |
| 21:00         | 20.17  | 33.33  | 14.00  | 0.00   | 0.00      |
| 22:00         | 18.67  | 33.33  | 8.00   | 0.00   | 0.00      |
| 24:00         | 18.17  | 33.33  | 6.00   | 0.00   | 0.00      |
| 10:00         | 18.06  | 33.33  | 0.00   | 8.33   | 0.00      |
| 09:00         | 17.06  | 33.33  | -4.00  | 8.33   | 0.00      |
| 13:00         | 16.67  | 33.33  | 0.00   | 0.00   | 0.00      |
| 12:00         | 15.67  | 33.33  | -4.00  | 0.00   | 0.00      |
| [ tudo inf. ] | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00      |
| 01:00         | -1.00  | 0.00   | -4.00  | 0.00   | 0.00      |
| 18:00         | -1.50  | 0.00   | -6.00  | 0.00   | 0.00      |
| 08:00         | -1.61  | 0.00   | -12.00 | 8.33   | 0.00      |
| 02:00         | -2.50  | 0.00   | -10.00 | 0.00   | 0.00      |
| 19:00         | -3.00  | 0.00   | -12.00 | 0.00   | 0.00      |
| 20:00         | -3.00  | 0.00   | -12.00 | 0.00   | 0.00      |
| 03:00         | -3.50  | 0.00   | -14.00 | 0.00   | 0.00      |
| 05:00         | -4.00  | 0.00   | -16.00 | 0.00   | 0.00      |
| 04:00         | -4.00  | 0.00   | -16.00 | 0.00   | 0.00      |
| 06:00         | -5.50  | 0.00   | -22.00 | 0.00   | 0.00      |
| 07:00         | -7.00  | 0.00   | -28.00 | 0.00   | 0.00      |
| Pesos:        |        | 0.5000 | 0.2500 | 0.1667 | 0.0833    |

Figura 21 – Ranking final dos horários de despacho da GD para o AL

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Através dos resultados apresentados na figura 21, é possível verificar que o período mais apropriado para conexão da fonte de GD no AL é na faixa horária das 09 horas às 17:00 horas e das 21:00 horas às 24:00 horas, obedecendo o ranking de pontuações apresentado na segunda coluna da Figura 20, sendo que, o melhor momento para a geração é às 15:00 horas. Horários em que a pontuação final resultou em valores negativos significam que estes são os horários em que a GD não deve despachar energia elétrica para o AL, sendo que às 07:00 horas é o momento menos propício para geração de energia.

A aplicação do método multicritério utilizando os 4 critérios quantitativos descritos neste trabalho resultou em um regime operacional para GD em que esta deve estar conectada ao AL durante 54,17% do dia.

## 5.2.2 Determinação do Regime Operacional da GD AS com Critérios Quantitativos e Qualitativos.

Para determinar o melhor regime operacional, ou seja, em que horários deve ocorrer a conexão da GD AS no AL, os AD estabeleceram como critérios quantitativos, os mesmos critérios utilizados no item 5.2.1. Já os critérios qualitativos estabelecidos pelos AD são os Serviços Ancilares Reserva de Potência Ativa e Suporte de Reativos, de acordo com o descrito no item 4.5 do capítulo 4.

Definidos os critérios quantitativos e qualitativos, devem-se realizar as cinco etapas de modelagem do método no *software* M-MACBETH, conforme descrito no item 5.2.

### 1 - Formulação da Arvore hierárquica de Avaliação:

Com os critérios já citados criou-se no *software* M-MACBETH a árvore hierárquica de avaliação, conforme apresentado na figura 22.

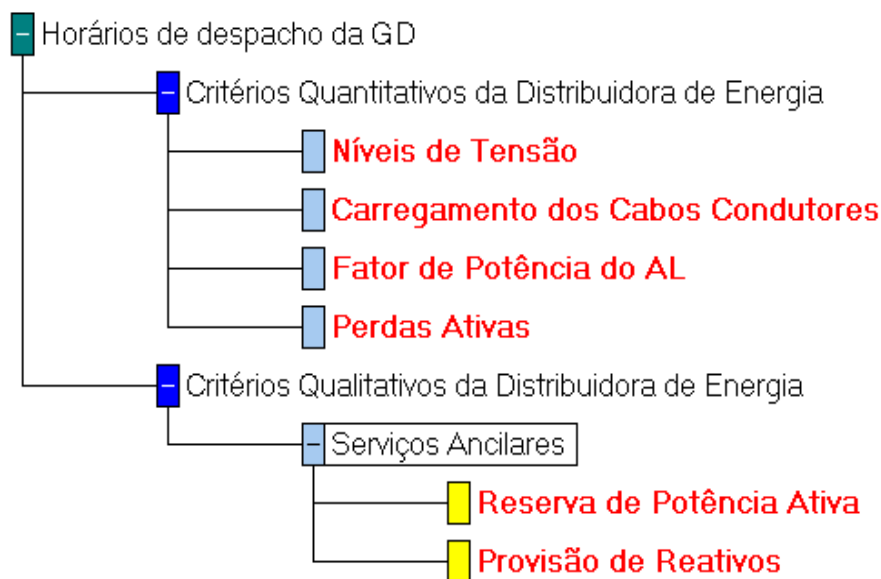


Figura 22 – Árvore hierárquica de avaliação.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH

### 2 - Definições das Alternativas

As “alternativas”, ou seja, os horários em que a GD poderá realizar o despacho para o AL continuam as mesmas apresentadas na Figura 8.

### 3 - Definição da classificação de cada critério quanto à base de comparação

Neste estudo manteve-se os critérios com base de comparação “Níveis Quantitativos de Performances” do item 5.2.1 e acrescentaram-se os critérios com bases de comparação “Níveis Qualitativos de Performances”, ou seja, critérios qualitativos, Reserva de Potência Ativa e Provisão de Reativos.

A figura 23 apresenta as janelas dos 02 critérios com a marcação da base de comparação como níveis qualitativos de performance.

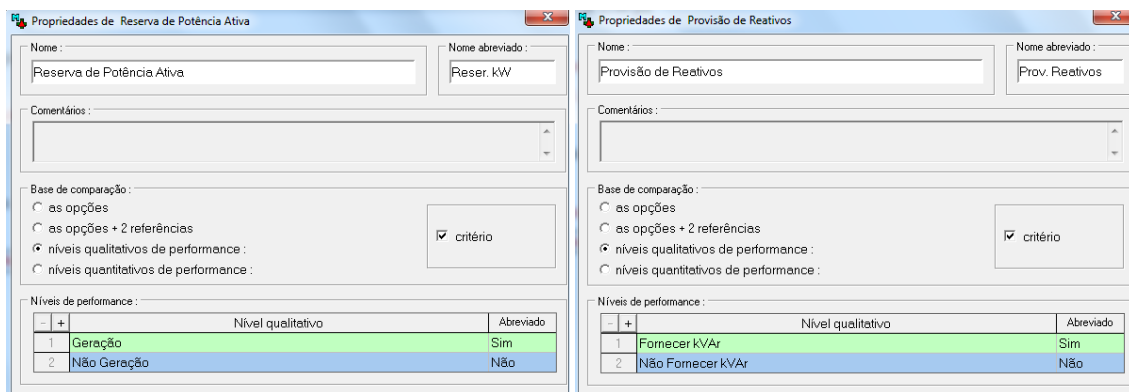


Figura 23 – Janelas dos critérios com a marcação da base de comparação como níveis qualitativos de performance.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Nesta classificação, a base de comparação do critério é indireta, ou seja, avaliação da importância ou “atratividade” das alternativas no critério é feita indiretamente através da utilização de limites (superior e inferior) como ponderação do critério. A referência superior equivale a pontuação igual a 100 (cem) pontos, já a referência inferior equivale a pontuação igual a 0 (zero) pontos. Cabe aos AD a definição dos limites superiores e inferiores de cada critério.

### 4 - Definição das referências superiores e inferiores de cada um dos critérios – formação das matrizes paritárias

Os AD definiram que para o critério “Reserva de Potência Ativa” a referência superior (denominada “Geração”) é a necessidade de complemento de potência ativa ao alimentador através do despacho de energia elétrica pela GD, e a referência inferior (denominada “Não Geração”) como não complemento de potência ativa ao alimentador a ser realizada pela GD.

No critério “Provisão de Reativos” os AD definiram como referência superior (denominada “*Fornecer kVAr*”) a necessidade que a GD realize o suporte de potência reativa ao alimentador e como referência inferior (denominada “*Não Fornecer kVAr*”) a não realização do suporte de potência reativa pela GD ao alimentador.

Definidas as referências superiores e inferiores de cada critério, para os critérios com bases de comparação “Níveis Qualitativos de Performances”, a conversão das performances das alternativas em pontuações requer a introdução prévia das referências de cada critério na tabela das performances do *software* M\_MACBETH. Para isso, após a análise dos aspectos técnicos e operacionais do AL, apresentadas no Apêndice A, os AD julgaram que para o critério “Reserva de Potência Ativa” é necessária à utilização da GD nos horários em que o carregamento do AL atingir 5MW ou mais, nos demais horários não é necessária à utilização da GD.

No critério “Provisão de Reativos” os AD definiram que nos horários em que o carregamento reativo do AL ultrapassar 2MVar é necessária a utilização da GD para realizar o suporte de reativos ao alimentador e nos demais horários não é necessária a utilização da GD. A tabela 6 apresenta o resumo do diagnóstico dos aspectos técnicos e operacionais do AL.

Tabela 6 – Resumo do diagnóstico dos Aspectos técnicos e operacionais do AL

| Diagnóstico dos Aspectos técnicos e operacionais do AL |                        |      |      |                                    |       |            |            |     |       |          |
|--|------------------------|------|------|------------------------------------|-------|------------|------------|-----|-------|----------|
| Período  | Curva de demanda do AL |      | FP   | Curva de Carga do Aterro Sanitário |       | NT ponto 1 | NT ponto 2 | Ccc | P_kW  | % perdas |
|  | MW                     | MVar |      | cos                                | MW    |            |            |     |       |          |
| <b>00:00</b>   | 5,44                   | 2,02 | 0,94 | 1,238                              | 0,443 | 0,920      | 0,917      | 53  | 24,4  | 0,45     |
| <b>01:00</b>   | 4,80                   | 1,96 | 0,93 | 1,159                              | 0,454 | 0,926      | 0,924      | 48  | 19,03 | 0,40     |
| <b>02:00</b>   | 4,56                   | 1,93 | 0,92 | 1,11                               | 0,449 | 0,928      | 0,926      | 45  | 17,23 | 0,38     |
| <b>03:00</b>   | 4,37                   | 1,90 | 0,92 | 1,082                              | 0,448 | 0,931      | 0,929      | 43  | 15,76 | 0,36     |
| <b>04:00</b>   | 4,28                   | 1,86 | 0,92 | 1,065                              | 0,433 | 0,932      | 0,930      | 42  | 15,12 | 0,35     |
| <b>05:00</b>   | 4,28                   | 1,84 | 0,92 | 1,026                              | 0,424 | 0,932      | 0,930      | 42  | 15,34 | 0,36     |
| <b>06:00</b>   | 4,09                   | 1,56 | 0,93 | 0,914                              | 0,356 | 0,938      | 0,936      | 39  | 14,01 | 0,34     |
| <b>07:00</b>   | 3,76                   | 1,42 | 0,94 | 0,879                              | 0,34  | 0,943      | 0,941      | 36  | 11,49 | 0,31     |
| <b>08:00</b>   | 4,39                   | 1,97 | 0,91 | 0,957                              | 0,414 | 0,930      | 0,927      | 44  | 17,35 | 0,40     |
| <b>09:00</b>   | 4,83                   | 2,22 | 0,91 | 1,021                              | 0,441 | 0,923      | 0,920      | 48  | 21,72 | 0,45     |
| <b>10:00</b>   | 5,07                   | 2,29 | 0,91 | 1,071                              | 0,451 | 0,920      | 0,916      | 50  | 23,87 | 0,47     |
| <b>11:00</b>   | 5,20                   | 2,31 | 0,91 | 1,092                              | 0,456 | 0,918      | 0,915      | 52  | 25,05 | 0,48     |
| <b>12:00</b>   | 4,97                   | 1,99 | 0,93 | 1,063                              | 0,412 | 0,924      | 0,921      | 48  | 21,83 | 0,44     |

| Diagnóstico dos Aspectos técnicos e operacionais do AL |                        |      |      |                                    |       |            |            |     |       |          |
|--|------------------------|------|------|------------------------------------|-------|------------|------------|-----|-------|----------|
| Período  | Curva de demanda do AL |      | FP   | Curva de Carga do Aterro Sanitário |       | NT ponto 1 | NT ponto 2 | Ccc | P_kW  | % perdas |
| 13:00  | 5,12                   | 2,16 | 0,92 | 1,051                              | 0,424 | 0,921      | 0,918      | 50  | 24,13 | 0,47     |
| 14:00  | 5,48                   | 2,36 | 0,92 | 1,089                              | 0,444 | 0,915      | 0,911      | 55  | 28,47 | 0,52     |
| 15:00  | 5,70                   | 2,54 | 0,91 | 1,148                              | 0,45  | 0,911      | 0,907      | 57  | 31,18 | 0,55     |
| 16:00  | 5,59                   | 2,56 | 0,91 | 1,131                              | 0,461 | 0,912      | 0,908      | 56  | 30,01 | 0,54     |
| 17:00  | 5,46                   | 2,43 | 0,91 | 1,104                              | 0,445 | 0,915      | 0,911      | 54  | 28,37 | 0,52     |
| 18:00  | 4,89                   | 2,00 | 0,93 | 1,062                              | 0,392 | 0,925      | 0,922      | 47  | 21,18 | 0,43     |
| 19:00  | 4,55                   | 1,89 | 0,92 | 1,018                              | 0,395 | 0,930      | 0,927      | 44  | 17,99 | 0,40     |
| 20:00  | 4,53                   | 1,72 | 0,93 | 1,032                              | 0,378 | 0,932      | 0,929      | 44  | 17,17 | 0,38     |
| 21:00  | 5,86                   | 1,85 | 0,95 | 1,227                              | 0,373 | 0,918      | 0,914      | 57  | 29,4  | 0,50     |
| 22:00  | 5,69                   | 1,75 | 0,96 | 1,233                              | 0,381 | 0,921      | 0,917      | 54  | 26,92 | 0,47     |
| 23:00  | 6,08                   | 2,01 | 0,95 | 1,323                              | 0,43  | 0,913      | 0,910      | 59  | 31,12 | 0,51     |

De posse dos valores dos critérios quantitativos e qualitativos em cada horário inseriu-se os valores das performances das alternativas no software M\_MACBETH.

A figura 24 apresenta a tabela de performances das alternativas (horários) de despacho da GD no AL com o julgamento dos AD dos horários em que é necessário que a GD forneça os SA “Reserva de Potência Ativa” e “Suporte de Reativos”.

| Opções | NT   | Ccc | FP   | Perdas kW | Reser. kW | Prov. Reativos |
|--------|------|-----|------|-----------|-----------|----------------|
| 01:00  | 0.92 | 48  | 0.93 | 0.4       | Não       | Não            |
| 02:00  | 0.93 | 45  | 0.92 | 0.38      | Não       | Não            |
| 03:00  | 0.93 | 43  | 0.92 | 0.36      | Não       | Não            |
| 04:00  | 0.93 | 42  | 0.92 | 0.35      | Não       | Não            |
| 05:00  | 0.93 | 42  | 0.92 | 0.36      | Não       | Não            |
| 06:00  | 0.94 | 39  | 0.93 | 0.34      | Não       | Não            |
| 07:00  | 0.94 | 36  | 0.94 | 0.31      | Não       | Não            |
| 08:00  | 0.93 | 44  | 0.91 | 0.4       | Não       | Não            |
| 09:00  | 0.92 | 48  | 0.91 | 0.45      | Não       | Sim            |
| 10:00  | 0.92 | 50  | 0.91 | 0.47      | Sim       | Sim            |
| 11:00  | 0.91 | 52  | 0.91 | 0.48      | Sim       | Sim            |
| 12:00  | 0.92 | 48  | 0.93 | 0.44      | Não       | Não            |
| 13:00  | 0.92 | 50  | 0.92 | 0.47      | Sim       | Sim            |
| 14:00  | 0.91 | 55  | 0.92 | 0.52      | Sim       | Sim            |
| 15:00  | 0.91 | 57  | 0.91 | 0.55      | Sim       | Sim            |
| 16:00  | 0.91 | 56  | 0.91 | 0.54      | Sim       | Sim            |
| 17:00  | 0.91 | 54  | 0.91 | 0.52      | Sim       | Sim            |
| 18:00  | 0.92 | 47  | 0.93 | 0.43      | Não       | Sim            |
| 19:00  | 0.93 | 44  | 0.92 | 0.4       | Não       | Não            |
| 20:00  | 0.93 | 44  | 0.93 | 0.38      | Não       | Não            |
| 21:00  | 0.91 | 57  | 0.95 | 0.5       | Sim       | Não            |
| 22:00  | 0.92 | 54  | 0.96 | 0.47      | Sim       | Não            |
| 23:00  | 0.91 | 59  | 0.95 | 0.51      | Sim       | Sim            |
| 24:00  | 0.92 | 53  | 0.94 | 0.45      | Sim       | Sim            |

Figura 24 – Tabela de Performances das alternativas para cada critério.

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

## 5 - Quantificações dos pesos de cada Critério (ponderação par a par entre os critérios).

A partir da introdução dos valores das performances dos critérios para todas as alternativas (horários) o software M-MACBETH consegue transformar estes valores em pontuações, a fim de determinar um *ranking* de melhores horários de despacho da GD no AL. Para a determinação deste *ranking*, faz-se necessário que os AD definam, de acordo com seus julgamentos, os pesos que cada critério deve ter para a obtenção do resultado final.

Neste estudo de caso, após a análise dos aspectos técnicos e operacionais do AL, os AD julgaram qual deve ser a ordem de prioridade dos critérios para a definição do melhor regime operacional da GD. A soma dos pesos de cada critério deve resultar em 100 pontos. No item 5.2.1, que possuía somente critérios quantitativos os AD definiram os pesos (importância) dos critérios, sendo estes: NT = 50%; Ccc =25%; FP = 16,67% e P\_kW = 8,33% dos pontos possíveis, onde a soma resulta em 100% dos pontos. Neste caso acrescentaram-se os critérios qualitativos, sendo assim, os AD definiram que os critérios quantitativos devem representar em 90% dos pontos e dos critérios qualitativos 10% dos pontos.

Os AD julgaram também que os pesos (importância) dos dois critérios qualitativos são iguais, ou seja, cada critério qualitativo representa 50% da pontuação total dos critérios qualitativos.

Realizada esta etapa, o *software* M-MACBETH apresenta de forma gráfica a priorização dos critérios de acordo com os julgamentos estipulados pelos agentes de decisão, conforme Figura 25.

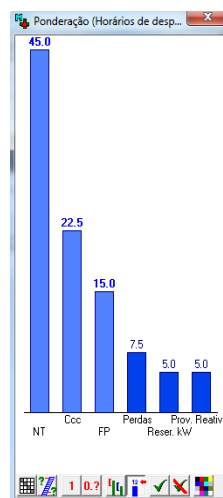


Figura 25 – Pesos dos critérios de acordo com os julgamentos dos AD

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.



Finalizada a aplicação de todas as etapas descritas, o *software* M\_MACBETH apresenta a classificação final das alternativas avaliadas. Na Figura 26 observa-se o resultado final com o *ranking* das alternativas (horários) em que a GD deve despachar energia elétrica para o AL determinando então o seu regime operacional

| Opções        | Global | NT     | Ccc    | FP     | Perdas kW | Reser. kW | Prov. Reativos |
|---------------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|----------------|
| [ tudo sup. ] | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00    | 100.00    | 100.00         |
| 15:00         | 44.40  | 66.67  | 14.00  | 8.33   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 23:00         | 44.05  | 66.67  | 18.00  | 0.00   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 16:00         | 43.95  | 66.67  | 12.00  | 8.33   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 17:00         | 43.05  | 66.67  | 8.00   | 8.33   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 14:00         | 42.25  | 66.67  | 10.00  | 0.00   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 11:00         | 42.15  | 66.67  | 4.00   | 8.33   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 24:00         | 26.35  | 33.33  | 6.00   | 0.00   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 10:00         | 26.25  | 33.33  | 0.00   | 8.33   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 13:00         | 25.00  | 33.33  | 0.00   | 0.00   | 0.00      | 100.00    | 100.00         |
| 21:00         | 23.15  | 33.33  | 14.00  | 0.00   | 0.00      | 100.00    | 0.00           |
| 22:00         | 21.80  | 33.33  | 8.00   | 0.00   | 0.00      | 100.00    | 0.00           |
| 09:00         | 20.35  | 33.33  | -4.00  | 8.33   | 0.00      | 0.00      | 100.00         |
| 12:00         | 14.10  | 33.33  | -4.00  | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 18:00         | 3.65   | 0.00   | -6.00  | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 100.00         |
| [ tudo inf. ] | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 01:00         | -0.90  | 0.00   | -4.00  | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 08:00         | -1.45  | 0.00   | -12.00 | 8.33   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 02:00         | -2.25  | 0.00   | -10.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 19:00         | -2.70  | 0.00   | -12.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 20:00         | -2.70  | 0.00   | -12.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 03:00         | -3.15  | 0.00   | -14.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 05:00         | -3.60  | 0.00   | -16.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 04:00         | -3.60  | 0.00   | -16.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 06:00         | -4.95  | 0.00   | -22.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| 07:00         | -6.30  | 0.00   | -28.00 | 0.00   | 0.00      | 0.00      | 0.00           |
| Pesos :       |        | 0.4500 | 0.2250 | 0.1500 | 0.0750    | 0.0500    | 0.0500         |

Figura 26 – Ranking final dos horários de despacho da GD para o AL

Fonte: Plataforma *software* M-MACBETH.

Com os resultados apresentados na Figura 26, verifica-se que o período mais apropriado para conexão da fonte de GD no AL equivale a 14 horas/dia, sendo este, compreendido nos intervalos das 09:00 horas às 18:00 horas e das 21:00 horas às 24:00 horas.

A segunda coluna da figura 25 apresenta o *ranking* de pontuações dos horários ideais para o despacho, sendo que o melhor momento para a geração é às 15:00 horas.

Os horários em que a pontuação final resultou em valores negativos significa que estes são os horários em que a GD não deve despachar energia elétrica para o AL, sendo que às 07:00 horas é o momento menos propício para geração de energia.

A aplicação do método multicritério utilizando quatro critérios quantitativos e dois critérios qualitativos resultaram em um regime operacional para GD em que esta deve estar conectada ao AL durante 58,33% do dia

Comparando-se os dois regimes operacionais definidos pelo método multicritério apresentados nesta dissertação, verifica-se que no segundo regime operacional é necessária a

conexão da GD também às 18:00 horas, ou seja, os momentos necessários de despacho da GD aumentou de 13 horas/dia para 14 horas/dia. Demonstrando-se aí, que a utilização de critérios qualitativos pode alterar o regime operacional de forma a atender necessidades que não são levadas em conta quando se utilizam critérios essencialmente quantitativos.

## Resumo do Capítulo 5

Neste capítulo apresentou-se a aplicação da metodologia multicritério AHP, através do *software* M\_MACBETH, para definição do melhor regime operacional de uma GD a biogás de RSU conectada a uma de distribuição. Para tanto se desenvolveu um estudo de caso onde foram definidos dois regimes operacionais, para uma GD a biogás de RSU de um aterro sanitário localizado na região metropolitana de Porto Alegre e conectada a um alimentador pertencente à CEEE-D.

Para definir o primeiro regime operacional utilizaram-se somente critérios quantitativos e obteve-se um regime operacional de 13 horas/dia. Já no para o segundo regime operacional utilizaram-se critérios quantitativos e qualitativos e obteve-se um regime operacional de 14 horas/dia.

## CONCLUSÕES

A produção de biogás com a decomposição de RSU é uma forma de reduzir as emissões de CH<sub>4</sub> na atmosfera, um dos gases mais agressivos ao meio ambiente, cuja, maioria dos autores afirma ter seu poder de poluição 21 vezes mais agressividade que o CO<sub>2</sub>. Em muitos casos o metano 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 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 autossuficiente de energia elétrica em aterros, que acarreta a sustentabilidade do projeto em que o excedente de energia gerada pode ser comercializado com a distribuidora de energia elétrica local ou com consumidores livres.

O interesse nacional 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 em eletrônica, 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.

Considerando que diversos aspectos técnicos e operacionais das redes de distribuição são influenciados pela conexão de fontes de Geração Distribuída, como por exemplo, os apresentados neste trabalho, conclui-se que é importante não ter somente um critério para definir os momentos de despacho de energia elétrica de GD, mas sim vários critérios. De posse desses vários critérios, sejam estes quantitativos e/ou qualitativos, a aplicação de metodologias multicritérios para definição de regimes operacionais de GD é o mais adequado, pois estas metodologias utilizam conceitos, ferramentas e procedimentos para ajudar-nos a fazer a melhor escolha em presença de ambiguidade e incerteza, obtendo-se então regimes operacionais mais prudentes.

Pôde-se verificar neste trabalho que a aplicação da metodologia multicritério AHP, através do *software* M\_MACBETH, possibilita além de definir o melhor regime operacional de uma GD, também obter um *ranking* dos melhores horários de conexão da GD no

alimentador. Este *ranking* de horários é uma informação que se torna muito importante para que o produtor de energia possa avaliar e decidir em que momento do dia é menos prejudicial para o sistema, a desconexão da GD, caso haja necessidade de desligamento do gerador em algum horário dentro do regime operacional estabelecido.

Com a aplicação do método AHP, no estudo de caso apresentado, foram definidos dois regimes operacionais para uma GD a biogás de RSU de um aterro sanitário localizado na região metropolitana de Porto Alegre e conectada a um alimentador pertencente à CEEE-D. Para definição do primeiro regime operacional utilizaram-se somente critérios quantitativos e obteve-se um regime operacional de 13 horas/dia. Já no para o segundo regime operacional utilizaram-se critérios quantitativos e qualitativos e obteve-se um regime operacional de 14 horas/dia, ou seja, a utilização dos critérios qualitativos formado pelos S.A Reserva de Potência e Provisão de Reativos fez com que incluísse no regime operacional o horário das 18:00 horas, o qual a conexão da GD não era necessária quando avaliados somente os critérios quantitativos. Com isso conclui-se, que para um mesmo caso, quando inseridos mais critérios haverá alteração nos resultados.

Outro fator que influencia os resultados é os pesos (importância) atribuídos pelo AD aos critérios. No estudo de caso apresentado, para definição do segundo regime operacional, os AD decidiram que os Serviços Ancilares devem representar somente 10% do total de pontos, e mesmo assim, houve alteração no resultado, com a inclusão de mais uma hora no regime operacional.

Este percentual foi adotado pelo fato destes serviços ainda não estarem regulamentados para os sistemas de distribuição, logo não é atrativo para as distribuidoras nem para os produtores de energia realizar, por exemplo, a provisão de reativos. Porque 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 distribuidoras. E quando isto ocorre, a GD terá uma diminuição em sua capacidade de produção de potência ativa.

Este fato anuncia à necessidade de regulamentar a comercialização dos SA tanto para o produtor de energia quanto para as distribuidoras.

Para o produtor de energia esta regulamentação é importante para incentivá-lo a fornecer S.A e obter assim mais uma forma de receita.

Para as distribuidoras esta regulamentação é importante para que, tanto o valor pago à GD pelo fornecimento dos SA, quanto os investimentos a serem feitos na RD para permitir a conexão da GD, sejam reconhecidos na sua tarifa. A definição dos valores para remuneração

destes serviços fará com que a importância desses critérios seja maior e por consequência, influenciem na definição dos regimes operacionais das GDs.

Quanto mais estudos e pesquisas para demonstrar os impactos das GDs a biogás de RSU em sistemas de distribuição melhor, pois os RSU é uma problema social e ambiental que deve ter ações eficientes por parte dos governos. A diversificação da matriz energética com a utilização de gerações descentralizadas pode contribuir para amenizar o déficit de energia elétrica existente atualmente.

### **Principais contribuições**

Esta dissertação apresentou a análise do panorama atual do biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos de aterros sanitários de forma a incentivar o uso deste biogás como fonte de geração de energia elétrica através da utilização de GD, a aplicação da metodologia multicritério AHP para definição de regimes operacionais de fontes de GD e uma modelagem matemática para contribuição dos sistemas de distribuição futuros que vão incorporar sistemas inteligentes de gerenciamento, os quais devem tomar decisões eficazes.

### **Perspectivas para trabalhos futuros**

Como perspectivas futuras desta dissertação pode-se realizar:

1. A análise do regime operacional de uma GD a biogás de RSU para uma rede de distribuição dinâmica, através da utilização dos aspectos técnicos e operacionais obtidos instantaneamente com o advento das redes inteligentes (smart grids);
2. Desenvolver uma metodologia adaptativa para o gerenciamento do despacho de várias fontes de GDs no sistema de distribuição;
3. 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

BRIGNOL, W. da S., MARTINS, L. F. G., BARIN, A., CANHA, L. N., ABAIDE, A. da R., 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.

BRIGNOL, W. da S., MARTINS, L. F. G., BARIN, A., CANHA, L. N., ABAIDE, A. da R., 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.

BRIGNOL, W. da S., MARTINS, L. F. G., BARIN, A., CANHA, L. N., ORLING, R. B. Avaliação da Geração Distribuída para o fornecimento de Serviços Ancilares em Redes de Distribuição. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – SEPOPE, Maio, 20 à 23, Rio de Janeiro –RJ – Brasil.

BRIGNOL, W. da S., MARTINS, L. F. G., BARIN, A., CANHA, L. N., ORLING, R. B. Avaliação da Geração Distribuída para o fornecimento de Serviços Ancilares em Redes de Distribuição. XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro Rio de Janeiro - RJ – Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT [Associação Brasileira 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 2011.

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](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. 2004. **Regulamenta o PROINFA, na primeira etapa e dá outras providências**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bdec20045025.pdf>>. Acesso: julho, 2011.

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](http://www.aneel.gov.br/cedoc/dec20045163.pdf) - Acesso: maio, 2011.

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](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, 2010** – disponível em [http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id\\_area=82](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=82). Acesso: maio, 2011.

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, 2011.

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, 2011.

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, 2011.

ARAPONGAS, **Tecnologia Mecânica**, Rio de Janeiro/RJ, disponível em <<http://www.gasbrasil.com.br/noticia/arquivos/ARAPONGAS%20MOTORES%20ESTACION%20C3%81RIOS%20A%20G%20C3%81S.pdf>>. Acesso: outubro, 2011.

BANA E COSTA, C.A. **Struturation, constrution et exploitation d'un modele multicritère d'aide à la décision**. Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa, 1992.

BANA E COSTA, C.A. & VANSNICK, J.C. **A theoretical framework for Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)**. In: Clímaco, J. *Multicriteria Analysis*. Berlim, 1995.

BANA E COSTA, C. A.; CORTE, J. M. D.; VANSNICK, J. C. “**MACBETH**”, LSE-OR Working Paper, 56, 2003.

BANA E COSTA, C. A. & VANSNICK, J.C. **Guia do Utilizador do Software M\_MACBETH**, 2005.

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.

BECKER Barbara; BRAUNSCHWEIG Thomas. **Choosing Research priorities by using the analytic hierarchy process: an application to international agriculture**. SwissCentre for International Agriculture (ZIL), Swiss Federal Intitute of Technology. Zurich Switzerland.

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: julho 2011.

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 2011.

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](http://www.mme.gov.br/programs_display.do?chn=877)>. acesso: julho, 2011.



BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA), 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.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Produto 6 – Resumo Executivo **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**, Disponível em [http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011033201.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf), acesso maio de 2012.

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.

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, 2004.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA , **Ambiente de Contratação**, disponível em <<http://www.ccee.org.br/cceeinterdsm/v/index.jsp?vgnextoid=65daa5c1de88a010VgnVCM10000aa01a8c0RCRD>>, acesso: outubro 2010.

CHAN, Alan H.S, KWOK W. Y, DUFFY Vincent G. **Using AHP for determining priority in safety management & Data Systems**, Volume 104, 2004.

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. **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, 2009. Disponível em <[http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/plnjop/Servicos\\_Ancilares.pdf](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 <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%2053.pdf>> acesso: out. 2011

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.

DECISION SUPPORT SYSTEMS GLOSSARY (DSS), 2006. Disponível em <<https://www.dssresources.com>>, acessado em novembro de 2011.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA –, **Balço energético nacional 2010 – ano base 2009: resultados preliminares** - Brasília, 2010.

FENG, Y.J., LU H., BI K. Na **AHP/DEA Method for Measurement of the Efficiency of R&D Management Activities in Universities**. International Federation of Operational Research, 2004

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.

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

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 2011.

FRANCISCHINI, P.G., CABEL G. M. B. **Proposição de um indicador geral utilizando AHP**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Ouro Preto, 2003 Anais, Ouro Preto: Abrepo, 2003.

GRANDZOL, Jhon R. **Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: A Case for the Analytic Hierarchy Process**. Bloomsburg University of Pennsylvania. IR Applications Volume 6, August 24, 2005.

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](http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=187)>, acesso: maio 2011.

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.

HUMMEL, Marjan; ROSSUM, Vouter van; VERKERKE, Gisjsbertus J.; RAKHORST, Gerhard. **Product Desing Planning with the Analytic Hierarchy Process inter-Organizational Networks**. University of Twente, Netherlands R&D Management 32,5. Blackwell Publishers Ltd. USA, 2002.

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

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](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/010/contribuicao/inee_-_instituto_nacional_de_efici%C3%Aancia_energetica.pdf). Acesso: abril de 2011.

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, 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.

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](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/GD-AMDA.pdf). Acesso: março, 2009.

- MALFA, E., “ABB on Sustainable Energy Markets”, Università di Brescia, 2002
- 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.
- MARTINS, L. F. G, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Brasil. Título: **Metodologia para Despacho de Fontes de GD a Biogás em Redes de Distribuição Utilizando Lógica Fuzzy**, Ano, 2012.
- 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.
- MEYER, MARSHAL W; EBRARY, INC. **Rethinking performance measurement: beyond the balanced scorecard**. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2002.
- MURAKAMI, Milton; ALMEIDA, Martinho; FEA – USP, **Decisão Estratégica em TI: Um estudo de caso**, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, 2003.
- NEST – Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica Distribuída. **Custos da Obtenção de H<sub>2</sub> a partir de biomassa e a Viabilidade da Geração de Eletricidade com Diferentes Tecnologias de Conversão**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, 2007.
- 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.
- SAATY, Thomas L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 1991.

SAATY Thomas L. How to Make a Decision: **The Analytic Hierarchy Process**. The Institute for Operations Research and the Management Sciences, Interfaces, USA, 2004.

SANTANA, Winston Carvalho; PIZZOLATO, Nélio Domingues; **Proposto de modelo de desenvolvimento de sistemas de medição de desempenho logístico**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2004..

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.

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](http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/conteudo_280524.shtml)>, Acesso: outubro, 2009.

## APÊNDICE A - DIAGNÓSTICO DOS ASPECTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DO AL03

Para que sejam determinados, através da utilização de uma metodologia multicritério, os melhores períodos do dia para a conexão da GD a biogás de RSU de um aterro sanitário na rede de distribuição, são necessários que se conheçam algumas condições técnicas e operacionais da rede de distribuição em questão de forma a obter-se um diagnóstico do AL.

O alimentador onde está conectado o aterro sanitário é denominado de AL03 da Subestação Areal (SE AR), localizada no município de Butiá – RS, pertencente à Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D. O alimentador possui uma tensão de trabalho de 23 kV e sustenta além do aterro sanitário, consumidores comerciais, residenciais e industriais.

A figura 27 apresenta a configuração georeferenciada do AL03 e as localizações da SE AR e da GD AS.



Figura 27 – Alimentador onde ocorrerá a conexão da GD a biogás de RSU.

Neste diagnóstico analisaram-se os dados obtidos através de medições realizadas por equipamentos instalados no AL03 da SE AR, tais como: Medidor Universal de Grandezas (MUG) da barra do AL03 e o medidor de energia elétrica do aterro sanitário.

As medições são referentes ao mês de Janeiro de 2011, sendo este o máximo carregamento dos últimos 24 meses. Também foram simuladas outras características técnicas e operacionais que se fazem necessárias para a continuidade deste trabalho. Tais características são:

- Curva de Demanda de Potência Ativa e Reativa do AL03;
- Curva de Carga do Aterro Sanitário;

- Curva de Corrente na Saída do Alimentador;
- Curva do Carregamento dos Cabos condutores troco do AL03;
- Perdas Ativas e Reativas do AL03;
- Níveis de Tensão do Alimentador AL03.

### Curva de Demanda de Potência Ativa e Reativa do AL03;

Com os valores correspondentes aos dados de memória de massa do medidor universal de grandezas elétricas (MUG) instalado na barra de 23kV do AL03 na SE AR, geraram-se as curvas da demanda ativa e reativa diária do mês de janeiro de 2011, as quais são apresentadas nas figuras 28 e 29.

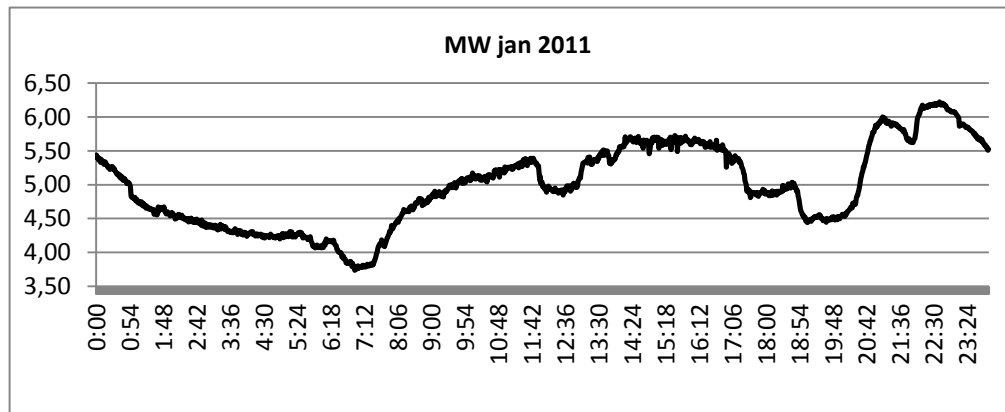


Figura 28 – Curva da demanda ativa diária do AL03.

Fonte: Memória de massa do AL 03 - MUG CEEE-D.

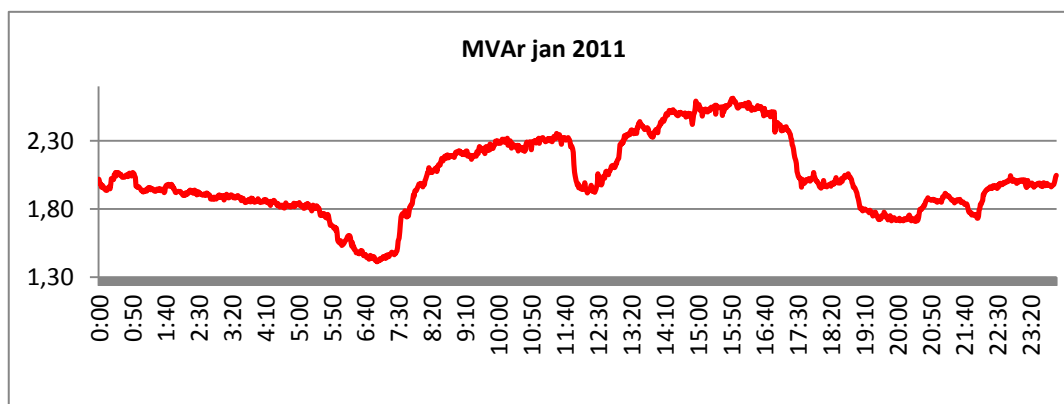


Figura 29 – Curva de demanda reativa diária do AL03.

Fonte: Memória de massa do AL 03 - MUG CEEE-D.

Através das curvas apresentadas acima, realizaram-se as modelagens das curvas de demanda ativa e reativa no *Software* PSL®DMS - versão demo 1.0.1.1 da Powersyslab Engenharia e Sistemas Ltda - sendo este uma das ferramentas de análise de fluxo de potência utilizada pela CEEE-D.

As figuras 30 e 31 apresentam as curvas de demanda ativa e reativa modelada no *software* PSL®DMS.

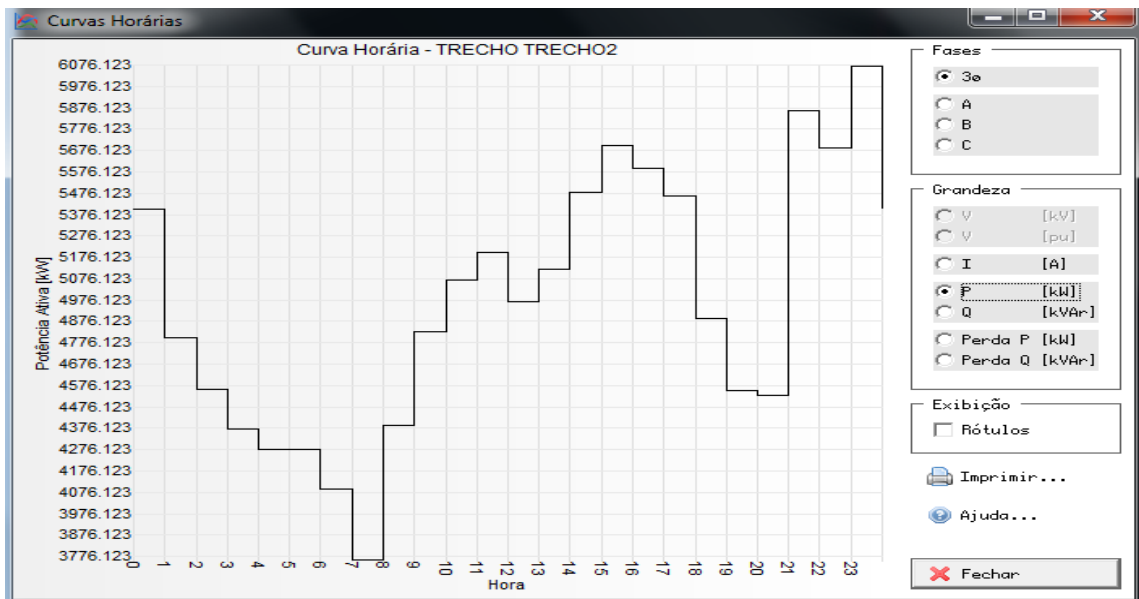


Figura 30 – Curva de demanda ativa diária do AL03.

Fonte: *Software* PSL®DMS,

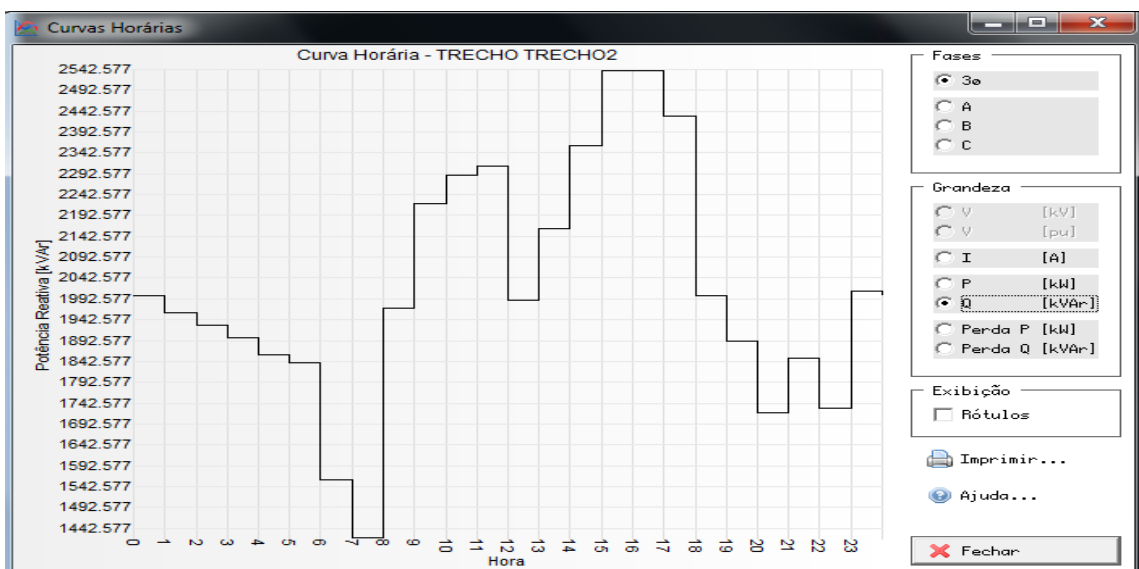


Figura 31 – Curva de demanda reativa diária do AL03.

Fonte: *Software* PSL®DMS



### Curva de Carga do Aterro Sanitário

Com os valores correspondentes aos dados de memória de massa do medidor eletrônico de energia elétrica Elo 2113 instalado na cabine de medição do Aterro Sanitário geraram-se as curvas de carga de demanda ativa e reativa diária do mês de janeiro de 2011, apresentadas nas figuras 32 e 33.

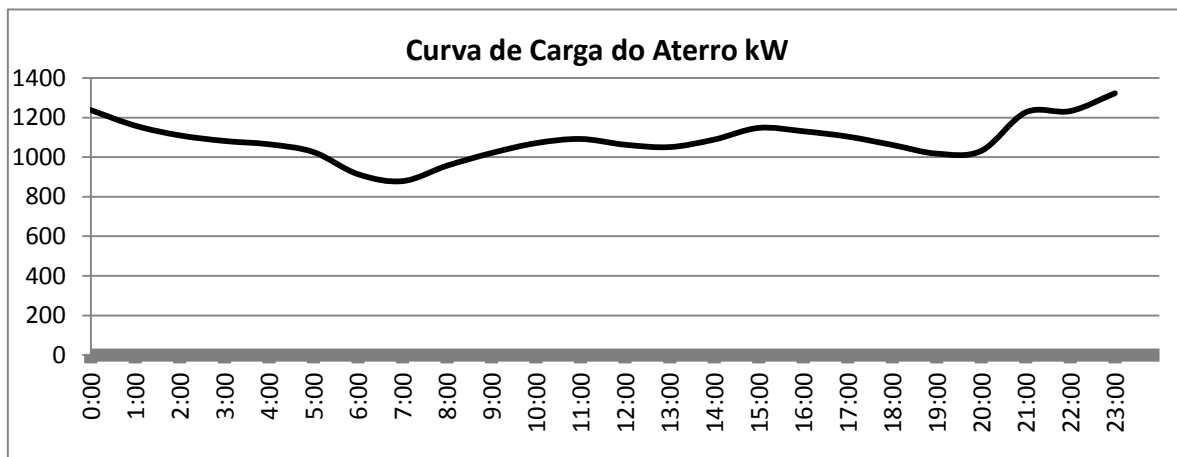


Figura 32 – Curva da carga ativa diária do aterro sanitário.

Fonte: Memória de massa do Medidor Eletrônico de Energia Elétrica Elo 2113, Aterro Sanitário.

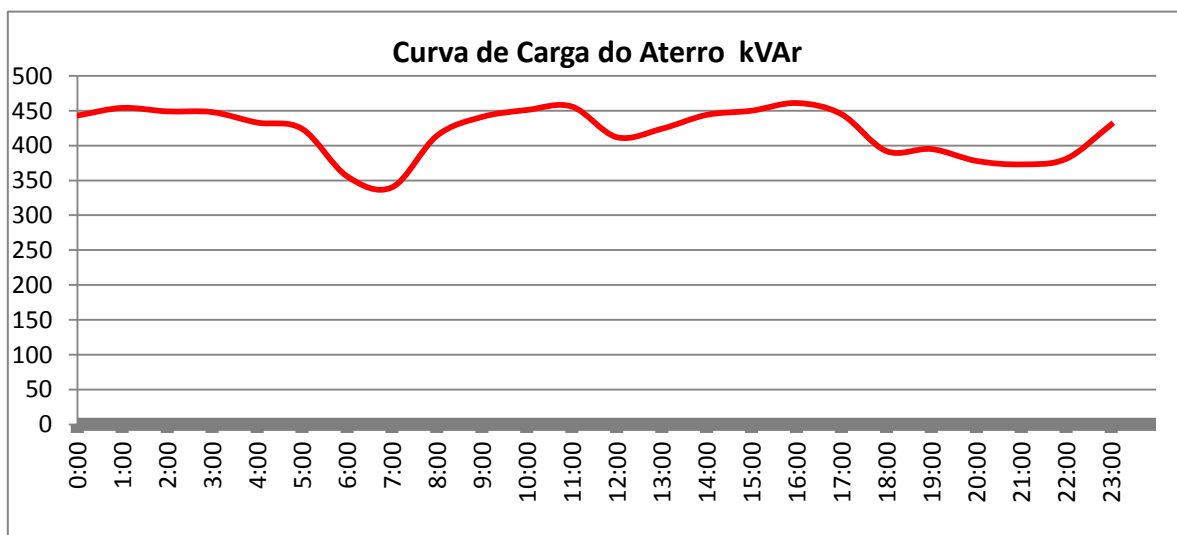


Figura 33 – Curva da carga reativa diária do aterro sanitário.

Fonte: Memória de massa do Medidor Eletrônico de Energia Elétrica Elo 2113, Aterro Sanitário.

A partir das curvas apresentadas, realizaram-se a modelagem das curvas de carga de demanda ativa e reativa no *Software* PSL®DMS. A figura 34 apresenta as curvas de carga modelada no *software* PSL®DMS.

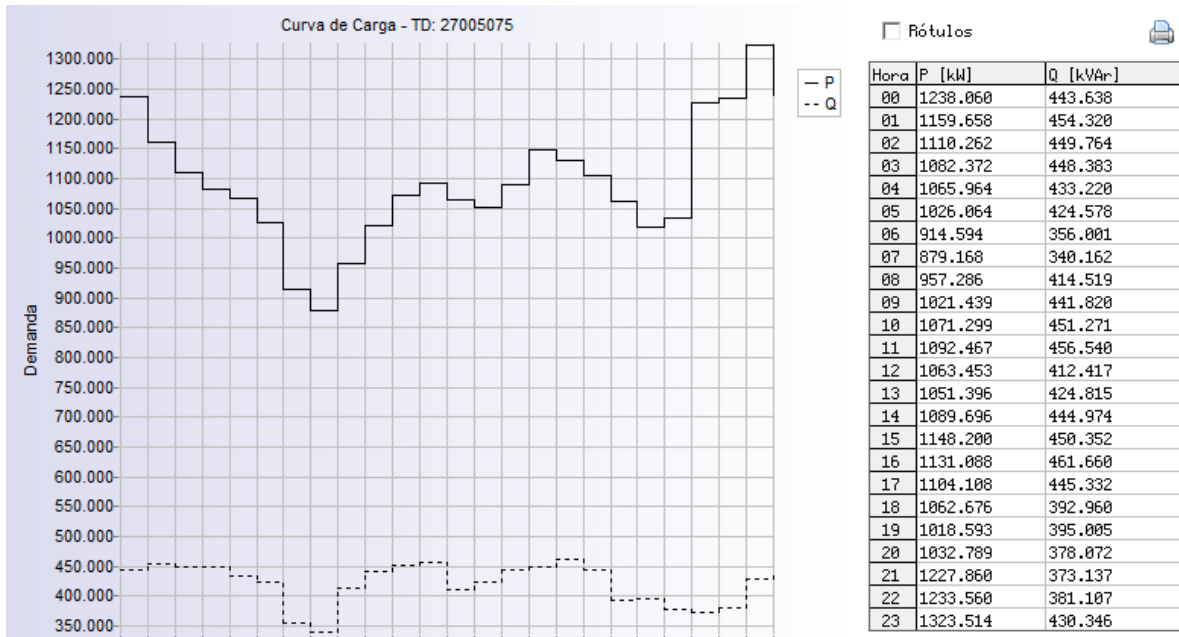


Figura 34 – Curva da Carga ativa e reativa diária do aterro sanitário.

Fonte: *Software PSL@DMS*

### Curva de corrente na saída do alimentador

Modeladas às curvas de demanda ativa e reativa do AL03 no PSL@DMS, para realizar a validação dos resultados apresentados pelo *software*, comparou-se a curva horária de corrente do AL03, medida na SE Areal, com a curva horária de corrente do AL03 simulada.

As figuras 35 e 36 apresentam as curvas citadas.

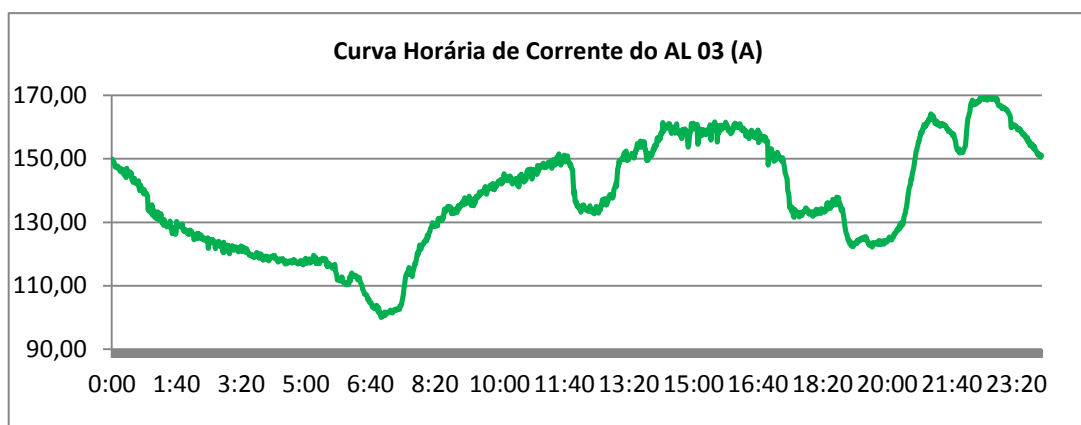


Figura 35 – Curva de Corrente por fase do AL03.

Fonte: Memória de massa do AL 03 - MUG CEEE-D.

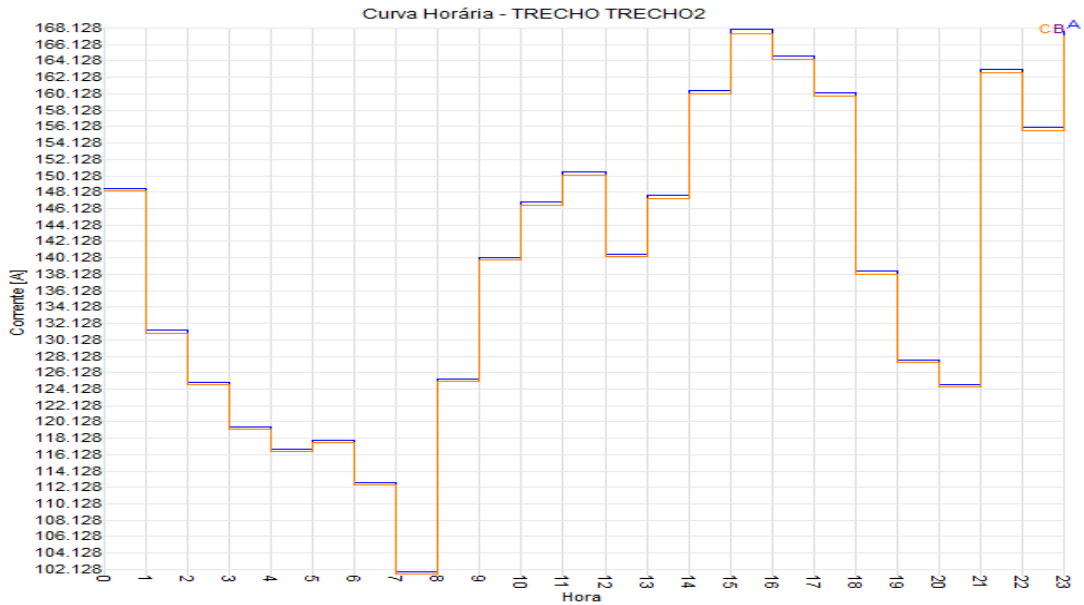


Figura 36 – Curva de corrente por fase do AL03.

Fonte: Software PSL@DMS

### Curva de Carregamento dos Cabos condutores tronco do AL03 (Ccc)

De posse dos valores de corrente por fase determinou-se o percentual de Ccc do AL03. O cabo condutor tronco do AL03 é o 4/0 MCM CAA, o qual possui uma capacidade de condução de corrente de 282A para uma temperatura final de 50°C. A figura 37 apresenta o percentual de Ccc do AL03.

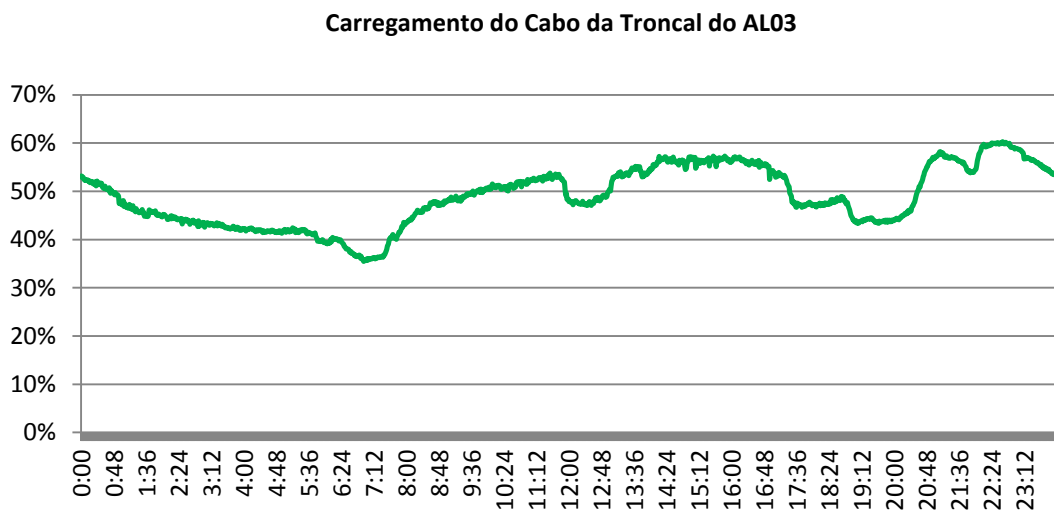


Figura 37 – Curva do percentual Ccc do AL03.

### Perdas Ativas do AL03

O *Software* PSL®DMS possibilita aos seus usuários a visualização dos níveis de perdas ativas (P\_kW) acumuladas no AL. A figura 38 apresenta os resultados das simulações das perdas ativas deste alimentador.

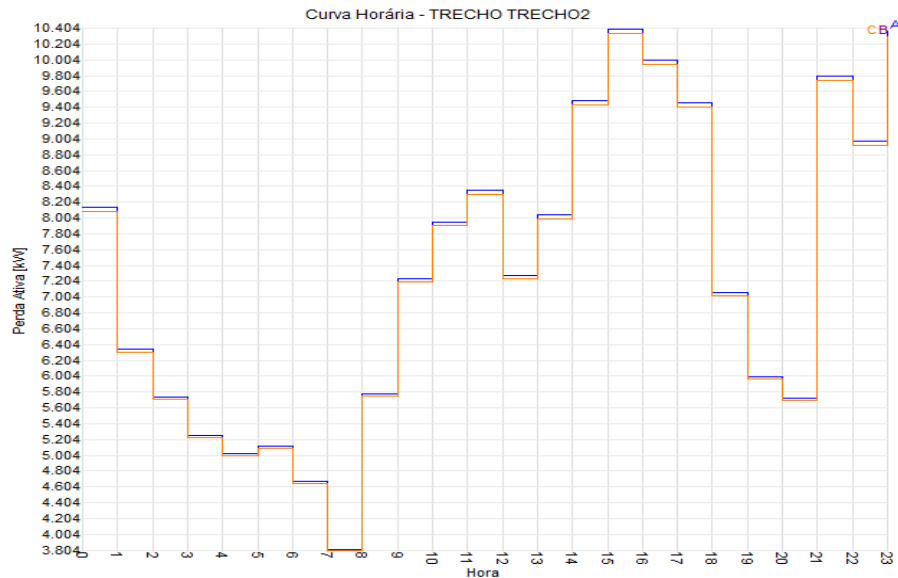


Figura 38 – Curva de Perdas Ativas por fase do AL03.

Fonte: *Software* PSL®DMS

### Níveis de Tensão do Alimentador AL03 (NT)

Para determinar as condições dos níveis de tensão apresentadas neste alimentador realizaram-se simulações em diversos pontos do AL e escolheram-se quatro pontos para análise. O ponto 1 é o ponto onde está localizado o aterro sanitário, conseqüentemente é o ponto de conexão da GD no AL. Os outros três pontos foram os pontos que apresentaram piores perfis de níveis de tensão neste AL.

A figura 38 apresenta a indicação dos quatro pontos estudados do AL apresentam as curvas horárias dos níveis de tensão em cada um dos pontos selecionados. As figuras 39, 40, 41 e 42 apresentam os perfis dos níveis de tensão dos quatro pontos estabelecidos.

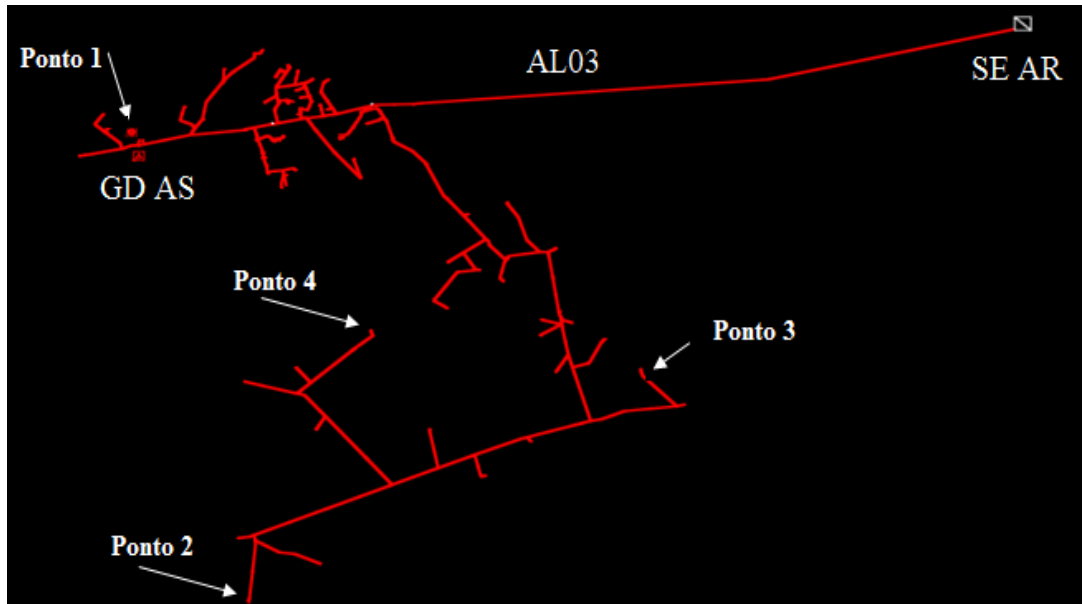


Figura 39 – Pontos do AL03 para análise dos níveis de tensão (NT).

Fonte: Software PSL@DMS

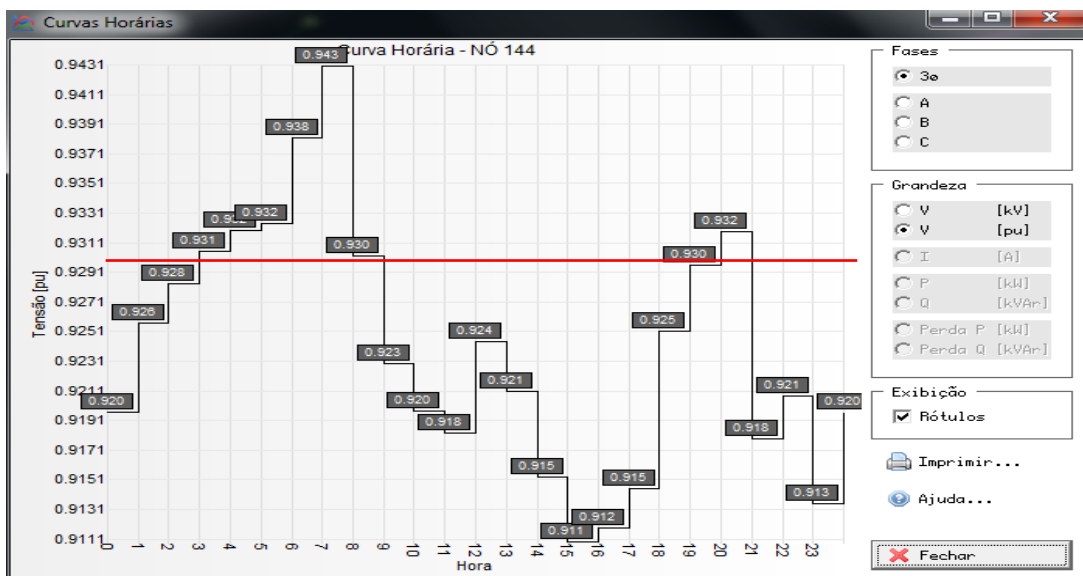


Figura 40 – Níveis de tensão no Ponto 1.

Fonte: Software PSL@DMS

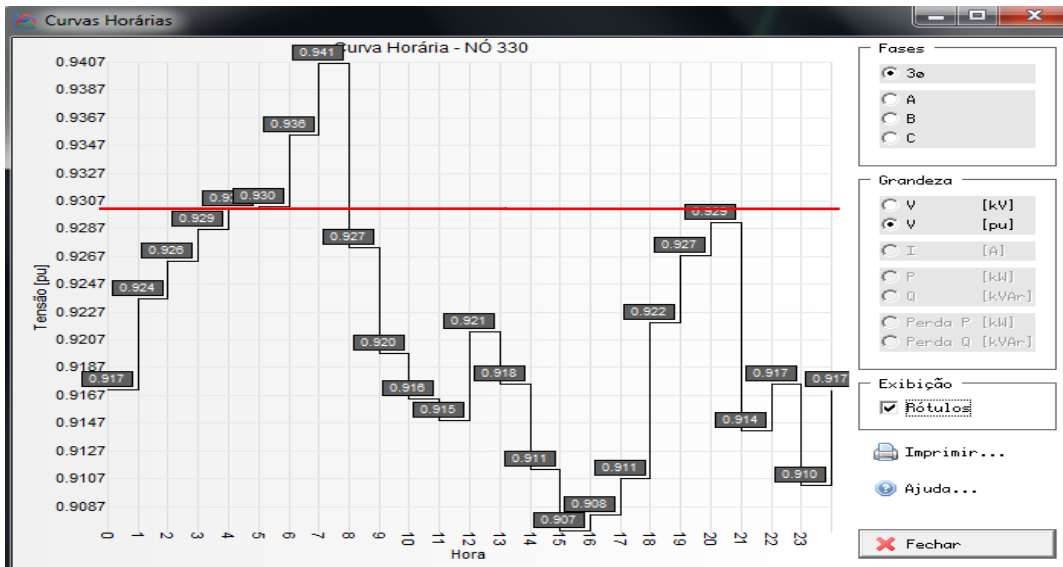


Figura 41 – Níveis de tensão no Ponto 2.

Fonte: Software PSL®DMS

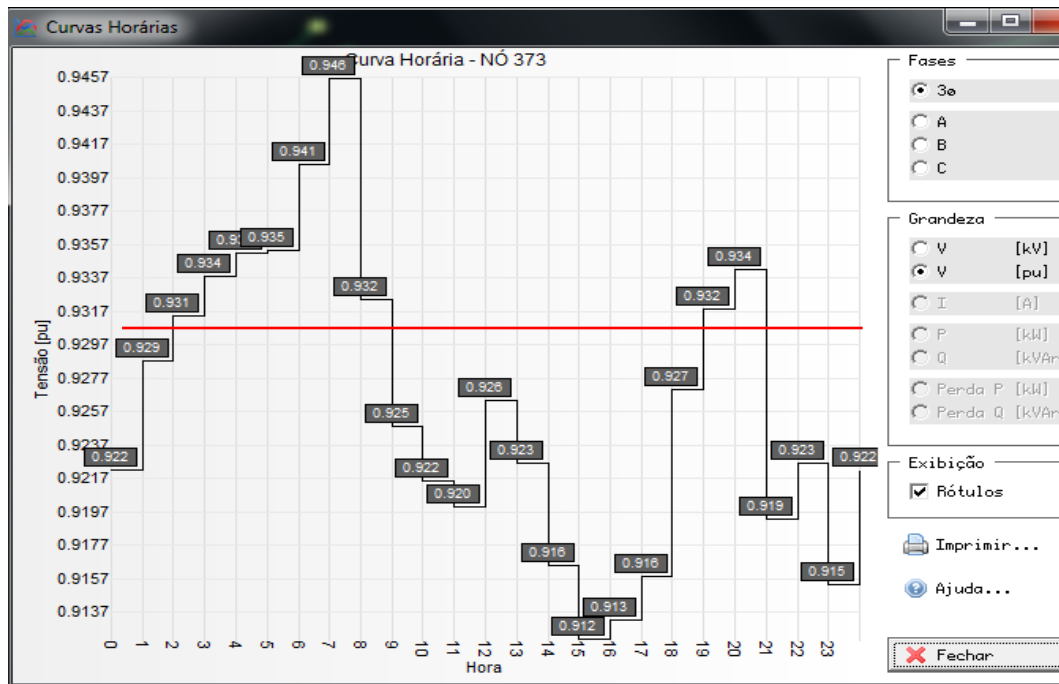


Figura 42 – Níveis de tensão no Ponto 3.

Fonte: Software PSL®DMS

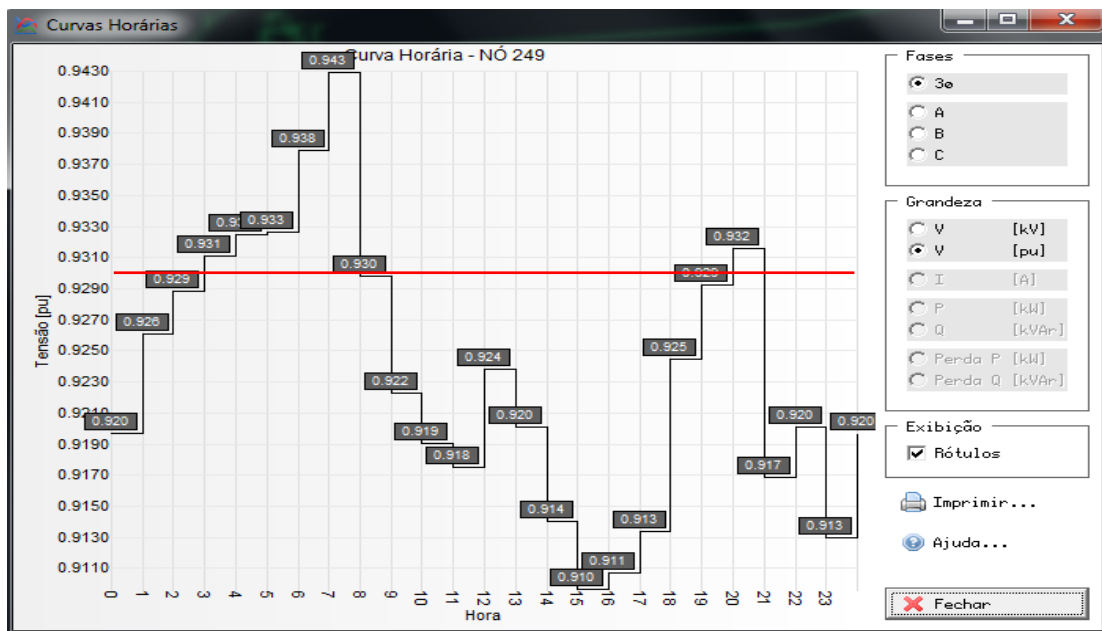


Figura 43 – Níveis de tensão no Ponto 4.

Fonte: *Software PSL®DMS*

As figuras 40, 41, 42 e 43 possuem um traço indicativo que delimita o nível de tensão em 0,93 pu, ou seja, 7% de queda de tensão - limite dos níveis de tensão considerado adequado - conforme apresentado no item 4.1 do capítulo 4.

Com as análises dos perfis de tensão dos quatro pontos, verificou-se que o ponto 2 apresentou o pior perfil dos níveis de tensão ao longo do dia típico. Sendo assim, para determinar o diagnóstico do AL03 consideraram-se os níveis de tensão no ponto 1 (conexão da GD) e ponto 2 (pior nível de tensão do AL). A tabela 6 apresenta os resultados das análises das leituras dos equipamentos de medição do AL03 e das simulações das grandezas elétricas realizadas através do *software PSL®DMS*.

Tabela 6 – Resumo do diagnóstico das Condições Técnicas do AL03

| Diagnóstico das Condições Técnicas do AL03 |                          |      |      |                                    |       |            |            |     |       |          |
|--|--------------------------|------|------|------------------------------------|-------|------------|------------|-----|-------|----------|
| Período                                    | Curva de demanda do AL03 |      | FP   | Curva de Carga do Aterro Sanitário |       | NT ponto 1 | NT ponto 2 | Ccc | P_kW  | % perdas |
| hora                                       | MW                       | MVAr | cos  | MW                                 | MVAr  | pu         | pu         | %   | kW    | %        |
| 00:00                                      | 5,44                     | 2,02 | 0,94 | 1,238                              | 0,443 | 0,920      | 0,917      | 53  | 24,4  | 0,45     |
| 01:00                                      | 4,80                     | 1,96 | 0,93 | 1,159                              | 0,454 | 0,926      | 0,924      | 48  | 19,03 | 0,40     |
| 02:00                                      | 4,56                     | 1,93 | 0,92 | 1,11                               | 0,449 | 0,928      | 0,926      | 45  | 17,23 | 0,38     |
| 03:00                                      | 4,37                     | 1,90 | 0,92 | 1,082                              | 0,448 | 0,931      | 0,929      | 43  | 15,76 | 0,36     |
| 04:00                                      | 4,28                     | 1,86 | 0,92 | 1,065                              | 0,433 | 0,932      | 0,930      | 42  | 15,12 | 0,35     |
| 05:00                                      | 4,28                     | 1,84 | 0,92 | 1,026                              | 0,424 | 0,932      | 0,930      | 42  | 15,34 | 0,36     |
| 06:00                                      | 4,09                     | 1,56 | 0,93 | 0,914                              | 0,356 | 0,938      | 0,936      | 39  | 14,01 | 0,34     |
| 07:00                                      | 3,76                     | 1,42 | 0,94 | 0,879                              | 0,34  | 0,943      | 0,941      | 36  | 11,49 | 0,31     |
| 08:00                                      | 4,39                     | 1,97 | 0,91 | 0,957                              | 0,414 | 0,930      | 0,927      | 44  | 17,35 | 0,40     |
| 09:00                                      | 4,83                     | 2,22 | 0,91 | 1,021                              | 0,441 | 0,923      | 0,920      | 48  | 21,72 | 0,45     |
| 10:00                                      | 5,07                     | 2,29 | 0,91 | 1,071                              | 0,451 | 0,920      | 0,916      | 50  | 23,87 | 0,47     |
| 11:00                                      | 5,20                     | 2,31 | 0,91 | 1,092                              | 0,456 | 0,918      | 0,915      | 52  | 25,05 | 0,48     |
| 12:00                                      | 4,97                     | 1,99 | 0,93 | 1,063                              | 0,412 | 0,924      | 0,921      | 48  | 21,83 | 0,44     |
| 13:00                                      | 5,12                     | 2,16 | 0,92 | 1,051                              | 0,424 | 0,921      | 0,918      | 50  | 24,13 | 0,47     |
| 14:00                                      | 5,48                     | 2,36 | 0,92 | 1,089                              | 0,444 | 0,915      | 0,911      | 55  | 28,47 | 0,52     |
| 15:00                                      | 5,70                     | 2,54 | 0,91 | 1,148                              | 0,45  | 0,911      | 0,907      | 57  | 31,18 | 0,55     |
| 16:00                                      | 5,59                     | 2,56 | 0,91 | 1,131                              | 0,461 | 0,912      | 0,908      | 56  | 30,01 | 0,54     |
| 17:00                                      | 5,46                     | 2,43 | 0,91 | 1,104                              | 0,445 | 0,915      | 0,911      | 54  | 28,37 | 0,52     |
| 18:00                                      | 4,89                     | 2,00 | 0,93 | 1,062                              | 0,392 | 0,925      | 0,922      | 47  | 21,18 | 0,43     |
| 19:00                                      | 4,55                     | 1,89 | 0,92 | 1,018                              | 0,395 | 0,930      | 0,927      | 44  | 17,99 | 0,40     |
| 20:00                                      | 4,53                     | 1,72 | 0,93 | 1,032                              | 0,378 | 0,932      | 0,929      | 44  | 17,17 | 0,38     |
| 21:00                                      | 5,86                     | 1,85 | 0,95 | 1,227                              | 0,373 | 0,918      | 0,914      | 57  | 29,4  | 0,50     |
| 22:00                                      | 5,69                     | 1,75 | 0,96 | 1,233                              | 0,381 | 0,921      | 0,917      | 54  | 26,92 | 0,47     |
| 23:00                                      | 6,08                     | 2,01 | 0,95 | 1,323                              | 0,43  | 0,913      | 0,910      | 59  | 31,12 | 0,51     |

Com esse resumo pôde-se verificar o comportamento deste AL, sob o ponto de vista de seu carregamento, níveis de tensão, fator de potência e carregamento dos cabos condutores tronco.