

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

**Wagner da Silva Brignol**

**OTIMIZAÇÃO DO ARMAZENAMENTO E GERAÇÃO DE ENERGIA A  
BIOGÁS VISANDO AO GERENCIAMENTO DAS REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO**

Santa Maria, RS  
2017



**Wagner da Silva Brignol**

**OTIMIZAÇÃO DO ARMAZENAMENTO E GERAÇÃO DE ENERGIA A  
BIOGÁS VISANDO AO GERENCIAMENTO DAS REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciane Neves Canha

Santa Maria, RS  
2017

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

da Silva Brignol, Wagner  
OTIMIZAÇÃO DO ARMAZENAMENTO E GERAÇÃO DE ENERGIA A  
BIOGÁS VISANDO AO GERENCIAMENTO DAS REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO / Wagner da Silva Brignol.- 2017.  
133 p.; 30 cm

Orientador: Luciane Neves Canha  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2017

1. Sistema de Armazenamento de Energia a Biogás 2.  
Geração Distribuída 3. Regime Operacional Multi patamar 4.  
Método de Otimização I. Neves Canha, Luciane II. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Wagner da Silva Brignol. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: wagner.brignol@gmail.com

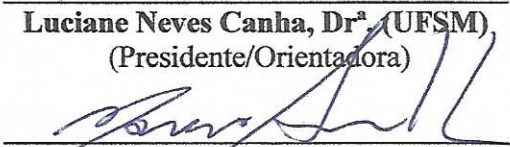
Wagner da Silva Brignol

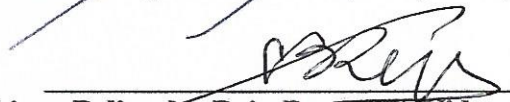
**OTIMIZAÇÃO DO ARMAZENAMENTO E GERAÇÃO DE  
ENERGIA A BIOGÁS VISANDO AO GERENCIAMENTO DAS  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 18 de Agosto de 2017

\_\_\_\_\_  
**Luciane Neves Canha, Dr<sup>a</sup> (UFSM)**  
(Presidente/Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
**Marcio Antônio Nogueira Andrade, Dr. (UFSC)-Videoconferência**

  
\_\_\_\_\_  
**Lineu Belico dos Reis, Dr. (USP)-Videoconferência**

\_\_\_\_\_  
**Vinicius Jacques Garcia, Dr.(UFSM)**

\_\_\_\_\_  
**Felix Alberto Farret, PhD (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2017



## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Cipriano e Carmen, meus grandes exemplos de vida, meus referenciais de trabalho, honestidade e bom caráter.*

*À minha esposa Caroline, minha torcedora número 1, com quem eu compartilho minha vida e meus sonhos e que está sempre pronta para me ajudar nos momentos de dificuldade, sem me deixar fraquejar.*

*Às minhas filhas, Maria Eduarda e Vitória, joias valiosas que Deus me confiou, pelas quais tenho força para lutar dia após dia.*





## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria – UFSM por ter me oportunizado realizar o Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, tanto em nível de Mestrado quanto de Doutorado, o que constituiu uma etapa inesquecível em minha vida.

A ELETROSUL S.A e ao Eng. Dalvir Maguerroski, agradeço pelo apoio técnico e pela oportunidade de adquirir o conhecimento prático e os dados técnicos das propriedades produtoras de suínos que compuseram o P&D Estratégico ANEEL 014/2012.

Aos meus pais, pelo apoio, incentivo e auxílio durante toda minha vida, e em especial durante esta etapa profissional, pois sempre entenderam a importância da continuidade dos meus estudos.

A minha esposa, pela ajuda, afeto, carinho, compreensão e principalmente, pelo amor que me sustentou nos momentos mais difíceis.

As minhas filhas, pelo carinho e alegria que sempre me proporcionam, mesmo nos momentos em que estive ausente devido às atividades profissionais.

A minha orientadora Prof. Dra. Luciane Neves Canha, a qual admiro e tenho um profundo respeito, agradeço pelo incentivo, por todos os ensinamentos que nortearam este trabalho, e principalmente pela amizade e confiança que sempre me propiciou.

Ao Prof. Dr. Vinícius Jacques Garcia, pelas contribuições brilhantes e apoio fundamental em diversas etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon e a Prof. Dra. Alzenira da Rosa Abaide, pelo apoio e amizade, que foram muito importantes durante minhas estadas em Santa Maria.

Aos amigos Eng.º Clóvis Farias e Eng.º Rodrigo Motta de Azevedo, por toda ajuda e apoio, e pelo agradável convívio que deixará boas lembranças, especialmente durante nossos deslocamentos à Santa Maria, quando o chimarrão e as boas experiências foram compartilhadas.

A Deus, por me conceder a vida e todos os ensinamentos propiciados por ele. Muito obrigado meu Deus, por esta oportunidade valiosa! Eu desejo ser digno de receber esta dádiva!



*“Ter desafios é o que faz a vida interessante e  
superá-los é o que faz a vida ter sentido”*

*(Joshua J. Marine)*



## RESUMO

### OTIMIZAÇÃO DO ARMAZENAMENTO E GERAÇÃO DE ENERGIA A BIOGÁS VISANDO AO GERENCIAMENTO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

AUTORA: Wagner da Silva Brignol

ORIENTADORA: Luciane Neves Canha, Dra.

O crescente aproveitamento de fontes renováveis de geração distribuída (GD) e também a perspectiva do uso de sistemas de armazenamento de energia (*Energy Storage System*- ESS) em sistemas de distribuição de energia elétrica torna imprescindível que as distribuidoras adotem medidas que as ajudem a gerenciar e operar suas redes, obtendo um aproveitamento estratégico destas fontes, de forma a minimizar os possíveis impactos negativos decorrentes destas conexões, e garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores. Neste contexto a GD a biogás vem ao encontro desta evolução, uma vez que este tipo de GD possui de forma integrada um sistema de armazenamento de energia a biogás, denominado nesta tese de (*bio Energy Storage System* – bioESS), o qual possibilita que a GD converta o biogás em energia elétrica em momentos adequados. Sendo assim, esta tese visa apresentar o desenvolvimento de uma metodologia de otimização aplicada em sistemas de armazenamento de energia a biogás, com o objetivo de determinar os regimes operacionais multi patamares para GD. Para tanto, utilizou-se a programação linear inteira (PLI) a fim de propor uma função objetivo (FO) que possibilite otimizar o uso do biogás armazenado, adotando como parâmetros: a curva de produção de biogás e a curva de carga da propriedade produtora de biogás. As restrições da FO foram determinadas em função das características operacionais de gerenciamento do bioESS, como: estoque mínimo, máximo e inicial de biogás. O regime operacional que se pretende obter com a aplicação do método baseia-se em dois modelos propostos, nos quais a GD prioriza o uso do biogás para atendimento total ou parcial das cargas da propriedade produtora de biogás, e o potencial energético remanescente é armazenado para uso estratégico. Como resultado da otimização se obtém um regime operacional multi patamar para GD, no qual são indicados a potência e as opções de períodos em que a distribuidora de energia pode ter garantida a utilização da energia armazenada no bioESS, possibilitando um gerenciamento estratégico do despacho e armazenamento da energia que pode ser produzida a partir do biogás. Esta metodologia é verificada por meio de um estudo de caso onde são utilizados os dados de uma propriedade rural produtora de suínos participante do P&D ANEEL P014/2012.

**Palavras-chave:** Sistema de Armazenamento de Energia a Biogás. Geração Distribuída. Regime Operacional Multi patamar. Método de Otimização.



## ABSTRACT

### OPTIMIZATION FOR STORAGE AND ENERGY GENERATION TO BIOGAS WITH VIEWS TO THE MANAGEMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS

Author: Wagner da Silva Brignol  
Advisor: Luciane Neves Canha, Dr.

The increasing use of renewable sources of distributed generation (DG) and also the perspective of the use of energy storage systems (ESS) in distribution systems, makes it imperative that distributors adopt measures to help them manage and operate their distribution networks, obtaining a strategic use of these sources, in order to minimize the possible negative impacts resulting from these connections, and guarantee the quality of energy supply to its consumers. In this context, biogas DG meets this evolution, since this type of DG has an integrated biogas energy storage system, called in this thesis (bio Energy Storage System - bioESS), which allows the DG converts the biogas into electrical energy at appropriate times. Thus, this Thesis aims to present the development of a methodology of optimization applied in biogas energy storage systems with the objective of determining multi-level operational regimes distributed generation. In order to do so, we used the integer linear programming (ILP) to propose an objective function (OF) to optimize the use of the stored biogas, using as parameters from the biogas production curve and the load curve of the biogas producing property. The OF restrictions were determined according to the bioESS management operational characteristics, such as: minimum, maximum and initial biogas stock. The operational regime to be achieved by applying the method is based on two proposed models, in which DG prioritizes the use of biogas for total or partial service of the biogas producing property loads and the remaining energy potential is stored for strategic use. As a result of the optimization, a multi-level operational regime for DG is obtained, in which power and the options of periods are indicated in which the energy distributor can be guaranteed to use the energy stored in the bioESS, allowing a strategic management of the dispatch and storage of the energy that can be produced from biogas. This methodology is verified by means of a case study where the data of a rural swine production participant in ANEEL P&D P14 / 2012 are used.

**Keywords:** Biogas Energy Storage System. Distributed Generation. Multi-level Operational Regime. Methodology of Optimization.





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	- Autoprodutor de Energia
bioESS	- <i>Biogas Energy Storage System</i>
CEESP	- Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência
CH <sub>4</sub>	- Metano
$cd$	- Consumo de biogás da máquina primária para produzir a potência elétrica disponível para a distribuidora
$cm$	- Consumo de biogás da máquina primária
$cm_j$	- Consumo de biogás da máquina primária por período
CO <sub>2</sub>	- Dioxido de carbono
COD	- Centro de Operação da Distribuidora
$C_{pp}$	- Conjunto de períodos de planejamento
$C_{pp0}$	- Conjunto de períodos de planejamento mais o período inicial
$CP_j$	- Consumo de biogás da máquina primária para atendimento das cargas da propriedade por período
$E_0$	- Estoque inicial de biogás ou <i>set point</i> do bioESS
$EE$	- Energia elétrica diária produzida pelo biogás
EEG	- <i>Erneurbare Energien Gesetz</i>
$e_j$	- Estoque de biogás em um determinado período
$e_{j-1}$	- Estoque de biogás no período anterior
$e_f$	- Estoque final de biogás para $j = NP$
$E_{máx}$	- Estoque máximo de biogás no bioESS
$E_{mín}$	- Estoque mínimo de biogás no bioESS
ESS	- <i>Energy Storage System</i>
FO	- Função Objetivo
FV	- Sistema Solar Fotovoltaico
GD	- Geração Distribuída

GWh	
H <sub>2</sub>	- Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	- Ácido Sulfídrico
HDPE	- Polietileno de alta densidade
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
$i_{0j}$	- Início dos intervalos de operação da GD para a distribuidora
kcal/kJ	- Quilocaloria por Quilojoule
kWh/m <sup>3</sup>	- Quilowatt hora por normal metro cúbico de biogás
$M$	- Constante de ajuste das restrições do modelo
mbar	- milibar
MP	- Máquina primária do grupo gerador de energia elétrica
MW	- Megawatt
m <sup>3</sup> biogás	- Metro cúbico de biogás
$N_{io}$	- Número de intervalos de operação da GD para a distribuidora
$NP$	- Número máximo de períodos disponíveis para o regime operacional
O <sub>2</sub>	- Oxigênio
$P1$	- Fator de ponderação de representatividade do $cd$
$P2$	- Fator de ponderação de representatividade do estoque total: $\sum_{j \in Cpp} e_j$
$P3$	- Fator de ponderação de representatividade do estoque final: $e_{NP}$ ;
$P4$	- Fator de ponderação de representatividade dos intervalos de operação da GD para a distribuidora
$PB$	- Produção diária de biogás
$PBh$	- Produção horária de biogás
$PBh_j$	- Produção horária de biogás por período
$PCI$	- Poder calorífico do biogás
$P_e$	- Potência de geração de energia elétrica a biogás
$PGD$	- Potência de geração da GD
$PGD_j$	- Potência de geração da GD por período
$PGDP_j$	- Potência da GD para atender a carga da propriedade por período;

PIE	- Produtor Independente de Energia
PLI	- Programação Linear Inteira
$PP_j$	- Potência elétrica da curva de carga da propriedade por período
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PVC	- Policloreto de vinila
REN	- Resolução Normativa
ROM	- Regime Operacional Multi patamar para GD
$tc_j$	- Tem consumo de biogás para atender a distribuidora
TWh	- Terawatt hora
$TD_{op}$	- Tempo de operação da GD disponível para a distribuidora
$TD_{op_{máx}}$	- Tempo máximo que cada intervalo de operação da GD para a distribuidora pode assumir
$TD_{op_{mín}}$	- Tempo mínimo que cada intervalo de operação da GD para a distribuidora pode assumir
$T_{op}$	- Tempo de operação da GD
$TP_{op}$	- Tempo de operação da GD para atendimento das cargas da propriedade
$T_{prod/h(j)}$	- Taxa de Produção horária (%)
ST	- Sólidos totais
SV	- Sólidos voláteis
UC	- Unidade consumidora de energia elétrica
VE	- Volume específico
$\Delta PGD$	- Potência constante da GD disponibilizada para a distribuidora
$\eta$	- Rendimento grupo gerador de energia elétrica



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Geração Energia Elétrica por Fonte no Mundo 2015 (%) .....	46
Figura 3.2 - Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil em 2016 (%).....	47
Figura 3.3 - Distribuição de Bovinos no Território Brasileiro .....	49
Figura 3.4 - Distribuição de Suínos no Território Brasileiro.....	50
Figura 3.5 - Distribuição de Frangos no Território Brasileiro.....	50
Figura 3.6 – Processo de Geração de Energia Elétrica a Biogás de Dejetos de Animais.....	51
Figura 3.7 - Biodigestor Modelo Indiano .....	53
Figura 3.8 - Biodigestor Modelo Chinês .....	54
Figura 3.11 - Biodigestor Modelo Canadense de Fluxo Tubular .....	54
Figura 3.10 – bioESS com Biodigestor de Fluxo Tubular .....	57
Figura 3.11 – bioESS Tipo Balão Independente .....	58
Figura 3.12 - bioESS Tipo Balão Independente Instalado ao lado de um bioESS com Biodigestor de Fluxo Tubular.....	58
Figura 3.13 - bioESS Independente de Dupla Membrana.....	59
Figura 3.14 - Componentes de um bioESS Independente de Dupla Membrana .....	60
Figura 3.15 - Componentes de um bioESS de Membrana Dupla Montado sobre Tanque.....	61
Figura 3.16 - bioESS com Membrana em Teto Intermediário acima do Biodigestor .....	62
Figura 3.17 - Componentes de um bioESS com Membrana em Teto Intermediário acima do Biodigestor .....	62
Figura 3.18 - Planta de uma GD a Biogás. ....	68
Figura 3.19 – Curvas de Produção de Biogás, Consumo de Biogás da Máquina Primária e Geração de Energia Elétrica da GD a Biogás.....	69
Figura 3.20 – Geração de energia elétrica da GD a biogás com perfil diferente da curva de produção de biogás .....	70
Figura 3.21 – Curva de Geração da GD x Curva de Carga da Propriedade .....	71
Figura 4.1 - Estruturação do Método de Otimização para Sistemas de Armazenamento de Energia a Biogás.....	73
Figura 4.2 - Etapas para o Desenvolvimento do Método. ....	75
Figura 4.3 - Modelo 1 de Regime Operacional Multi patamar para GD.....	76
Figura 4.4 - Modelo 2 de Regime Operacional Multi patamar para GD.....	77
Figura 4.5 - Períodos x horas da Curva de Geração da GD.....	79
Figura 4.6 - bioESS com GD e fatores que influenciam no seu gerenciamento. ....	83
Figura 4.7 - Diagrama de Desenvolvimento da Modelagem Matemática. ....	91
Figura 4.8 - Planilha “ Modelagem”.....	99
Figura 4.9 - Planilha “Regime Operacional” .....	99
Figura 4.10 - Apresentação dos Resultados Obtidos pelo Método Proposto. ....	100
Figura 5.1 - Caso 1: Curvas de Biogás .....	104
Figura 5.2 - Caso 1: Regime Operacional Multi patamar para GD.....	104
Figura 5.3 - Caso 2: Curvas de Biogás .....	105
Figura 5.4 - Caso 2: Regime Operacional Multi patamar para GD.....	105
Figura 5.5 - Caso 3: Curvas de Biogás .....	106
Figura 5.6 - Caso 3: Regime Operacional Multi patamar para GD.....	106
Figura 5.7 - Caso 4: Curvas de Biogás .....	107
Figura 5.8 - Caso 4: Regime Operacional Multi patamar para GD.....	107
Figura 5.9 - Caso 5: Curvas de Biogás .....	108
Figura 5.10 - Caso 5: Regime Operacional Multi patamar para GD.....	108
Figura 5.11 - Caso 6: Curvas de Biogás .....	109

Figura 5.12 - Caso 6: Regime Operacional Multi patamar para GD .....	109
Figura 5.13 - Caso 7: Curvas de Biogás.....	110
Figura 5.14 - Caso 7: Regime Operacional Multi patamar para GD .....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Energia Elétrica Produzida por Fontes Renováveis na União Europeia 2014.....	45
Tabela 3.2 – Número de Usinas de Geração de Energia Elétrica em Operação em Função do Tipo de Fonte.....	47
Tabela 3.3 – Equivalência energética de 1m <sup>3</sup> de biogás em comparação com outros combustíveis.....	53
Tabela 3.4 – Produção de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais.....	55
Tabela 3.5 – Aspectos Característicos dos bioESS .....	56
Tabela 4.1 – Resultados do estoque de biogás considerando Modelo 2 de ROM para GD com 1 intervalo de operação da GD para a distribuidora.....	87
Tabela 4.2 – Resultados do estoque de biogás considerando Modelo 2 de ROM para GD com 2 intervalos de operação da GD para a distribuidora.....	88
Tabela 5.1 – Valores do <i>CPj</i> para atendimento da curva de carga da propriedade.....	102
Tabela 5.2 - Regime Operacional Multi patamar para GD (01 intervalo de operação da GD para a distribuidora).....	104
Tabela 5.3 - Regime Operacional Multi patamar para GD (02 intervalos de operação da GD para a distribuidora).....	105
Tabela 5.4 - Regime Operacional Multi patamar para GD (03 intervalos de operação da GD para a distribuidora).....	106
Tabela 5.5 - Regime Operacional Multi patamar para GD (01 intervalo de operação da GD para a distribuidora).....	107
Tabela 5.6 - Regime Operacional Multi patamar para GD (02 intervalos de operação da GD para a distribuidora).....	108
Tabela 5.7 - Regime Operacional Multi patamar para GD (03 intervalos de operação da GD para a distribuidora).....	109
Tabela 5.8 - Regime Operacional Multi patamar para GD (02 intervalos de operação da GD para a distribuidora).....	110
Tabela 5.9 – Resultados dos Casos Estudados .....	111





## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	25
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	28
1.2 OBJETIVOS.....	29
1.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS DO TRABALHO .....	30
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	33
2.1 IMPACTOS DAS FONTES RENOVÁVEIS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO .....	33
2.2 USO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA REDUÇÃO OS IMPACTOS NEGATIVOS DE FONTES RENOVÁVEIS DE GD.....	35
2.3 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	36
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	41
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	43
3.1 FONTES RENOVÁVEIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS.....	43
3.1.1 Geração de Energia Elétrica a Biogás no Mundo.....	43
3.1.2 Geração de Energia Elétrica à Biogás no Brasil.....	46
3.2 POTENCIAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE DEJETOS DE ANIMAIS .....	49
3.3 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA .....	51
3.3.1 O Biogás e seu Processo de Produção .....	52
3.3.2 Sistemas de Armazenamento de Energia a Biogás.....	55
3.3.3 Produção de Energia Elétrica .....	62
3.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS ORIUNDO DE DEJETOS DE ANIMAIS.....	64
3.4.1 Geração Distribuída.....	64
3.4.2 Fundamentos do Regime Operacional de GD a biogás.....	67
3.4.3 Curva de Geração da GD à Biogás x Curva de Carga da Propriedade Produtora de Biogás .....	71
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	72
4 METODOLOGIA PROPOSTA .....	73
4.1 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE REGIMES OPERACIONAIS MULTI PATAMAR PARA GD A BIOGÁS .....	75
4.1.1 Modelo 1 de Regime Operacional Multi patamar para GD.....	76
4.1.2 Modelo 2 de Regime Operacional Multi patamar da GD.....	77
4.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE GERAÇÃO DA GD .....	78
4.3 CARACTERÍSTICAS DE GERENCIAMENTO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A BIOGÁS.....	81
4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO APLICADO A SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A BIOGÁS.....	86
4.4.1 Determinação dos Parâmetros e Conjuntos .....	91
4.4.2 Determinação das Variáveis .....	92
4.4.3 Determinação da Função Objetivo (FO) .....	94
4.4.4 Definição dos Limites e Restrições das Grandezas Envolvidas no Problema - “Restrições do Modelo” .....	95
4.5 SOLUÇÃO DO MÉTODO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	98
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	100
5 ESTUDO DE CASO .....	101

5.1 DADOS PARA O ESTUDO DE CASO .....	101
5.2 DETERMINAÇÃO DA <i>P<sub>Bhj</sub></i> e <i>CP<sub>j</sub></i> .....	101
5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A BIOGÁS .....	103
5.4 RESULTADOS.....	103
5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	111
6. CONCLUSÕES .....	115
6.1 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS DA TESE.....	116
6.2 TRABALHOS FUTUROS .....	117
6.3 PUBLICAÇÕES .....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
APÊNDICES.....	127
APÊNDICE A – PASSO À PASSO PARA MODELAGEM DO MÉTODO COM O USO DO <i>MS OPENOFFICE CALC</i> .....	128

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia sob suas mais diferentes formas é um dos fatores que contribuem para o desenvolvimento da humanidade. A consolidação deste desenvolvimento está diretamente ligada à garantia de que as fontes energéticas estejam suficientemente disponíveis e acessíveis a fim de dar suporte à demanda de energia que sustenta o progresso da sociedade moderna. Levando-se em consideração o avanço tecnológico do aproveitamento das fontes renováveis de energia elétrica verificado nos últimos anos e a necessidade de se buscar um suprimento de energia elétrica sustentável com a qualidade e abrangência exigidas pela sociedade, a discussão acerca do tema da Geração Distribuída (GD) a partir de fontes renováveis de energia é imprescindível.

As principais características das fontes renováveis de energia são a capacidade de renovação constante e a conservação dos recursos naturais. Dentre estes tipos de fontes, pode-se citar a energia hídrica, solar, eólica, geotérmica, hidrogênio e a biomassa, sendo esta última a responsável pela produção de biogás.

Mesmo com o avanço do aproveitamento de fontes renováveis, 78,32% da oferta mundial de energia ainda é derivada de recursos não renováveis (EPE, 2016 apud EIA, 2015). No Brasil, as fontes renováveis de geração de energia elétrica a biomassa, fotovoltaica e eólica, representam 15,16% da oferta interna de energia, (SFG, 2017). Em reunião realizada em junho de 2015, Estados Unidos e Brasil se comprometeram a aumentar o uso de fontes renováveis para que estas possam produzir 20% da sua energia elétrica, em um prazo de 15 anos. A meta não inclui a energia gerada por hidrelétricas, que no Brasil já respondem por mais de 60% da matriz elétrica. Isto faz com que pesquisadores da área debatam alternativas de geração com menor impacto ao meio ambiente, em busca do desenvolvimento sustentável.

Devido ao aumento das restrições socioambientais para expansão do sistema através de centrais geradoras de grande porte (hidrelétricas e/ou termoelétricas), a exploração dos recursos renováveis pela implantação de GD nos sistemas de distribuição tem ganhado um destaque cada vez maior, especialmente pelo grande potencial ainda a ser explorado, dentre os quais, podemos destacar o biogás produzido a partir da biomassa residual, como os dejetos de animais (BRIGNOL et al. 2016).

A produção de energia elétrica a partir do biogás oriundo de dejetos de animais no Brasil é de apenas 0,0013% do total da energia produzida (SFG, 2017). Porém, o país possui um grande potencial energético a ser explorado, uma vez que o Brasil possui uma produção de 215 milhões de bovinos, 40,6 milhões de suínos e 1332 milhões de aves (IBGE, 2015). As

propriedades produtoras destes animais em confinamento estão distribuídas pelo interior de todo território brasileiro. Logo os potenciais de produção de biogás e, conseqüentemente, de geração de energia elétrica também estão distribuídos por todo território, possibilitando o seu aproveitamento em GD. Aliado a isso, diversos mecanismos de incentivo para o uso de fontes renováveis de GD foram desenvolvidos nos últimos anos a fim de consolidar o uso de GD de pequeno porte no sistema elétrico brasileiro. Dentro os quais se destacam a resolução normativa (REN) 482/2012 e a REN 687/2015, as quais instituíram a classificação da GD de acordo com a faixa de potência como minigeração distribuída (miniGD) e microgeração distribuída (microGD), permitindo que cada unidade consumidora de energia elétrica produza sua própria energia e despache o excedente de sua produção para redes de distribuição.

Inúmeros são os benefícios ao sistema de distribuição com a conexão de fontes renováveis de GD em unidades consumidoras. Em contrapartida, este tipo de conexão torna esse sistema bem mais complexo sob o ponto de vista de operação, manutenção e planejamento, principalmente no que tange a novos arranjos de redes e modos de operação, uma vez que pode ocorrer fluxo de potência bidirecional, aumento dos níveis de tensão, aumento das perdas, entre outros (BRIGNOL et al. 2017). A composição destes fatores aumenta os riscos e incertezas nos cenários de planejamento e operação das redes de distribuição, uma vez que a maioria das fontes renováveis de GD são não-despacháveis, pois são intermitentes e dependem das variações das condições climática, dificultando portanto seu gerenciamento por parte das distribuidoras de energia elétrica. Para fazer frente a este cenário, uma das apostas globais tem sido a concepção de sistemas de distribuição mais estáveis a partir do desenvolvimento de métodos eficazes para realizar a integração de fontes renováveis de GD de forma a minimizar seus efeitos negativos. Neste contexto, o armazenamento de energia (*energy storage system*- ESS) em sistemas de distribuição pode auxiliar a resolver estas preocupações e facilitar o equilíbrio entre a oferta e demanda de energia à medida que dissocia o tempo de geração e de consumo.

Nos próximos anos espera-se um aumento da demanda por ESS para viabilizar a integração de fontes renováveis de GD consideradas intermitentes, aos sistemas de distribuição atuais. Além disto, quando se investe em armazenamento de energia, se reduz a dependência das usinas geradoras de eletricidade alimentadas por combustíveis fósseis para atender consumos em horários de pico (como as termoelétricas, no caso brasileiro).

Existem diversos tipos sistemas de armazenamento de energia, dentre os quais estão: o bombeamento de água para reservatórios e posterior geração hidroelétrica; sistemas de ar comprimido; “rodas inerciais” (*flywheels*); baterias e tanques de armazenamento de calor (sal em estado líquido – aquecido), além dos capacitores eletroquímicos, campos magnéticos

gerados em supercondutores e o armazenamento de energia utilizando a eletrólise da água para formação de hidrogênio.

Os sistemas de armazenamento de energia citados podem estar associados ou não a alguns tipos de fontes renováveis de GD, diferentemente das fontes de GD a biogás, as quais obrigatoriamente necessitam de um armazenador de biogás para possibilitar a geração de energia elétrica.

Em uma fonte de GD a biogás oriundo de dejetos de animais, o biogás é formado em um biodigestor anaeróbico, e sua produção é armazenada em câmaras de armazenamento de gás (gasômetros), sendo denominado nesta Tese de sistema de armazenamento de energia a biogás (*biogas energy storage system* – bioESS), o qual possibilita equilibrar a produção contínua de biogás e o consumo descontínuo do mesmo.

Neste contexto, devido o potencial brasileiro de produção de biogás de dejetos de animais, e a necessidade da utilização de fontes renováveis de GD e ESS, as fontes de GD a biogás vem ao encontro desta evolução dos sistemas de distribuição uma vez que este tipo de GD possui um bioESS integrado, o qual armazena a energia em forma de biogás para que seja convertido em eletricidade nos momentos adequados, podendo inclusive, realizar a complementação de fontes renováveis de GD intermitentes. Sendo assim, torna-se importante desenvolver metodologias para o uso de fontes de GD com bioESS que vise obter o gerenciamento estratégico do despacho e armazenamento da energia que pode ser produzida a partir do biogás.

Esta Tese propõe um método inovador para otimização para sistemas de armazenamento de energia a biogás para determinar regimes operacionais multi patamares para Geração Distribuída.

A metodologia desenvolvida utiliza a programação linear inteira (PLI) e propõe uma função objetivo que possibilite otimizar o uso do biogás armazenado, utilizando como parâmetros a produção horária de biogás e a curva de carga da propriedade produtora de biogás, entre outros. As restrições da função objetivo foram determinadas em função das características operacionais de gerenciamento do bioESS, tais como: estoque mínimo, estoque máximo e estoque inicial de biogás.

O regime operacional que se obteve com aplicação do método proposto neste tese baseia-se em dois modelos, nos quais a GD prioriza o uso do biogás para atendimento total ou parcial das cargas da propriedade produtora de biogás, e o potencial energético remanescente é armazenado para uso estratégico da distribuidora. Como resultado o método apresenta um regime operacional multi patamar para GD no qual são indicados os valores de potência e as

opções de períodos que a distribuidora de energia pode ter garantia de utilizar a energia armazenada no bioESS, possibilitando que esta tenha conhecimento de qual planta de GD com bioESS pode ser acionada, e por quanto tempo terá garantida esta energia, aumentando a segurança operacional das redes de distribuição na presença de fontes de geração intermitentes. Portanto, o método propõe a ideia de gerenciamento estratégico do despacho e armazenamento da energia que pode ser produzida a partir do biogás oriundo de dejetos de animais, o que poderá reduzir os impactos negativos nos sistemas de distribuição.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Um dos aspectos motivadores desta Tese está associado ao atual cenário regulatório para instalação de GD no sistema elétrico. Devido a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ter estabelecido regras destinadas a reduzir barreiras para instalação de pequenos geradores que utilize de fontes renováveis de energia, esse fato trouxe facilidades para que os consumidores possam gerar sua própria energia e injetar o excedente na rede. Ocorre que quando esta prática for amplamente difundida, provocará uma transformação da concepção do sistema de distribuição, como, por exemplo, perda da sua característica radial, deixando de operar com um único ponto de suprimento passando a várias fontes de injeção de potência intermitente, e em muitos casos imprevisíveis. Como a difusão dessa forma de geração de energia tende a crescer e se consolidar nos próximos anos, é necessário que as distribuidoras adotem medidas que as ajudem a gerenciar e operar suas redes, obtendo um aproveitamento estratégico destas fontes, de forma a minimizar os possíveis impactos negativos decorrentes destas conexões, e garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores.

Ao mesmo tempo em que a disseminação do uso de fontes renováveis de GD podem, se não gerenciadas, causar impactos negativos nos sistemas de distribuição, faz-se necessário o aproveitamento dos diversos potenciais de fontes renováveis de energia, para que se obtenha a diversificação da matriz energética brasileira, uma vez que o país produz mais de 60% da sua energia através de grandes centrais hidroelétricas, e estas dependem de uma capacidade de armazenamento plurianual, complementadas por usinas térmicas acionadas diante da eminência de um período de estiagem.

Portanto, considerando um cenário em que o aproveitamento das fontes renováveis de GD é imprescindível, e que as distribuidoras devem estar preparadas para conexão de diversas fontes de GD intermitentes, os sistemas de armazenamento de energia (ESS) tendem a

contribuir para que as distribuidoras consigam gerenciar a operação de seus sistemas de distribuição, uma vez que as tecnologias de armazenamento de energia podem resolver estas preocupações e facilitar o balanceamento de energia, à medida que dissociam o tempo de geração e o de consumo.

Estes são fatores que oportunizam o aproveitamento do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo da biodigestão de dejetos de animais no Brasil, uma vez que este tipo de fonte renovável GD é composto por um bioESS, o qual possibilita a conversão do biogás em energia elétrica em momentos adequados, independente de variações das condições climáticas. Além disso, a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica dos dejetos possibilita uma destinação à um passivo ambiental decorrente da criação de animais, que por muitas vezes, causam externalidades negativas que podem comprometer a sustentabilidade e limita a expansão das atividades agropecuárias de criação de animais confinados.

Por fim, considerando a potencialidade, as características da produção, e a capacidade de armazenamento do biogás a partir da biodigestão de dejetos de animais, e também as transformações previstas para o setor elétrico, através da mudança de concepção dos sistemas de distribuição, torna-se oportuno desenvolver metodologias e estratégias para o uso ESS a biogás a fim de determinar regimes operacionais para GD, nos quais parte do potencial de geração possa ficar armazenado para ser utilizado quando houver necessidade pela distribuidora.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta Tese é desenvolver um método inovador de otimização aplicado a sistemas de armazenamento de energia a biogás (bioESS) para determinar regimes operacionais multi patamares de Geração Distribuída a biogás, que priorize o uso deste insumo para atendimento das propriedades produtoras de animais, e com o potencial energético remanescente obtenha-se a potência que pode ser reservada para a distribuidora e os períodos de disponibilidade. Para isso, esta Tese conta com os seguintes objetivos específicos:

- Propor modelos de regime operacionais multi patamar para GD a biogás a serem adotados para o desenvolvimento da metodologia;
- Identificar as características de gerenciamento da operação do bioESS;
- Desenvolver uma Função Objetivo e Restrições do Modelo para através da PLI otimizar o uso do biogás armazenado no bioESS considerando o estoque de biogás, produção

horária de biogás e curva de carga da propriedade produtora de animais como parâmetros;

- Obter o regime operacional multi patamar da GD, no qual serão indicados o valor de potência e as opções de períodos que a distribuidora pode ter garantida o uso da energia armazenada no bioESS;
- Obter o tamanho do sistema de armazenamento de energia a biogás para o regime operacional multi patamar estabelecido.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS DO TRABALHO

Esta Tese pretende contribuir com originalidade nos itens:

- Desenvolvimento de uma metodologia de otimização aplicável a sistemas de armazenamento de energia a biogás, para determinar regimes operacionais para GDs que utilizam biogás como combustível, e que seja ajustável a qualquer tipo de curva de carga da propriedade produtora de biogás e curva de produção de biogás;
- Incentivo ao uso dos sistemas de geração a biogás não apenas para geração de energia, mas para uso como sistema armazenador de energia visando contribuir na operação de sistemas que possuam participação de gerações intermitentes.
- Aplicação de sistemas de armazenamento de energia a biogás para o uso integrado entre propriedade produtora de biogás e distribuidora de energia elétrica através da reserva de parte do potencial de geração da GD para a distribuidora em períodos pré-estabelecidos independente de variações das condições climáticas;

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta Tese está organizada em 6 (seis) capítulos, incluindo esta Introdução. O segundo capítulo é dedicado a Revisão Bibliográfica.

O capítulo 3 descreve a Fundamentação Teórica, na qual são apresentados as características de produção e armazenamento do biogás e o potencial brasileiro de produção de biogás, assim como os fundamentos dos regimes operacionais de GD a biogás de dejetos de animais.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento da metodologia proposta através da definição dos modelos de ROM e da modelagem matemática do problema de otimização.



O estudo de caso da metodologia proposta utilizando dados de uma propriedade de criação de suínos e as análises dos resultados são apresentados no capítulo 5.

O capítulo 6 contém as conclusões e as contribuições inovadoras apresentadas pela Tese.

O Apêndice A descreve passo a passo a modelagem do método utilizando o *MS Open Office calc.*



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos trabalhos estudados para a fundamentação desta Tese, contemplando: os impactos das fontes renováveis de geração distribuída em sistemas de distribuição; o uso de sistemas de armazenamento de energia; e modelos de otimização para sistemas de armazenamento de energia.

### 2.1 IMPACTOS DAS FONTES RENOVÁVEIS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

As fontes renováveis de geração distribuída podem apresentar uma série de vantagens para os sistemas de distribuição como a redução do carregamento da rede nos horários de alto consumo, balanceamento do fluxo de carga, suporte no controle de tensão e reativos, capacidade de apoio de emergência, entre outros. Por outro lado, devido alguns tipos de fontes serem intermitentes, o elevado número de conexões podem causar instabilidade à rede elétrica e afetar os sistemas de proteção pelo aumento da corrente de curto-circuito (TOORIAN, H.; NOURIAN, S. 2016).

No artigo de Shih et al. (2016), os autores afirmam que as fontes de GD podem contribuir para aspectos importantes, tais como: alívio de congestionamento de linha, redução global de perdas e aumento da confiabilidade das redes. Porém, como muitas são intermitentes e não despacháveis, elas podem causar impactos negativos como fluxo reverso e aumento da corrente de curto-circuito.

Para Wang, Han e Wu (2015), a necessidade de sistemas de energia elétrica mais flexíveis e eficientes pode ser suprida pela inserção de fontes renováveis de geração distribuída. No entanto, a grande intermitência de fontes como a eólica e solar trazem impactos ao planejamento e a operação dos sistemas de distribuição. As incertezas aumentam à medida que o grau de inserção dessas fontes fazem interface com a rede, e um dos mais importantes impactos a serem analisados é referente ao fluxo de potência. Neste contexto, a conexão destas fontes de GD ao longo de uma rede de distribuição pode afetar os níveis de tensão. (ESSACKJEE; AH KING, 2016).

No trabalho desenvolvido por Martins e Borges (2011) são apresentados dados que comprovam que a alta inserção de fontes renováveis de GD podem trazer vários impactos sobre o planejamento e operação das redes de distribuição de energia elétrica. Para os autores, como

são significativas às incertezas destas fontes, é necessário um planejamento da conexão destas GDs, uma vez que os impactos devem limitar a capacidade de um sistema de distribuição em receber GD para que não sejam violadas suas restrições operacionais.

Para Hadi et al. (2016) a tendência de integrar mais fontes renováveis a rede elétrica e a redução do uso de gerações à combustível fóssil em um futuro próximo, reduz a flexibilidade operacional e põem em perigo a estabilidade do sistema elétrico. Portanto a aplicação de sistemas de armazenamento de energia (ESS) auxiliará a resolver alguns desses desafios iminentes aos sistemas de energia.

Já Pavithra e Munther (2015) afirmam que as fontes de energia renováveis são fontes não-despacháveis, pois são variáveis e dependem de incertezas da natureza, e que em grandes níveis de inserção, essa variabilidade pode representar desafios significativos na operação da rede elétrica. Para os autores, tecnologias de armazenamento de energia podem resolver todas estas preocupações e facilitar o balanceamento de energia à medida que dissocia o tempo de geração e de consumo. Portanto, tendo em vista as incertezas apresentadas pela maioria das fontes renováveis de GD, é necessário o desenvolvimento de métodos eficazes para integração destas fontes de forma a minimizar os efeitos secundários, e neste contexto, o uso de sistemas de armazenamento de energia em sistemas de distribuição podem auxiliar a resolver estas questões (SANTOS, et al. 2016).

Esta Tese propõe o desenvolvimento de uma metodologia a ser aplicada em sistemas de armazenamento de energia a biogás para determinar regimes operacionais multi patamares de GD a serem conectadas em sistemas de distribuição, de forma a obter a máxima potência que pode ser reservada para as distribuidoras e os períodos de disponibilidade. Com isso há uma previsibilidade da energia disponível para as distribuidoras, o que poderá auxiliar a causar menos impactos negativos que os demais tipos de fontes renováveis de GD. Isto é possível, pois se trata de um tipo de geração que se diferencia das demais em relação ao seu funcionamento, uma vez que armazenado o biogás, sua conversão em energia elétrica torna-se previsível, não havendo variações conforme as condições climáticas. Portanto, a metodologia desenvolvida nesta Tese pode auxiliar o planejamento da distribuidora para conexão deste tipo de fonte renovável.

## 2.2 USO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA REDUÇÃO OS IMPACTOS NEGATIVOS DE FONTES RENOVÁVEIS DE GD.

Diversos estudos vêm sendo realizados sobre armazenamento de energia para diminuir possíveis impactos negativos causados pelas incertezas de diversos tipos de fontes renováveis de energia.

Devlin, et al.(2016) apresentam o armazenamento de energia através de um modelo de despacho econômico e compromisso unitário do mercado único da eletricidade da Irlanda do Norte, para mitigar impactos operacionais negativos no sistema de distribuição devido a altas inserções de energia eólica.

Greenwood et al. (2016) apresentam um método probabilístico para calcular o tamanho de um sistema de armazenagem de energia elétrica para atender um período de pico de demanda e, conseqüentemente aumentar a confiabilidade da rede, adiando uma obra de reforço convencional, e também para aumentar a disponibilidade de armazenamento de energia para participar nos mercados de serviços comerciais. Para isto, os autores consideraram uma combinação entre o armazenamento de energia e a variabilidade da capacidade de fornecimento de energia da rede, inerentes as condições térmicas em tempo real (*real-time thermal rating – RTTR*) devido as mudanças das condições meteorológicas.

Nan Li et al. (2016) apresentam um modelo para avaliar o valor do potencial de armazenamento de energia em sistemas de energia com geração renovável. Este modelo é dividido em duas etapas. Na primeira, é formulada uma abordagem de uma unidade de compromisso estocástica com incerteza da previsão da energia eólica e armazenamento de energia. Na segunda etapa, a solução da unidade de compromisso estocástica é utilizada para derivar um horário flexível para armazenamento de energia no despacho econômico, onde o horizonte *look-ahead* (horizonte de tempo à frente) é limitado.

Thapa e Karki (2016) propõem um modelo de geração de energia eólica em conjunto com um sistema de armazenamento de energia condicionados ao vento inicial e às condições de armazenamento para o fornecimento da potência de déficit em prazos curtos de operação, reduzindo assim a incerteza associada a este tipo de geração. Este modelo foi desenvolvido através de um método probabilístico condicional para avaliar a contribuição da confiabilidade do armazenamento de energia usando dois índices probabilísticos: o risco de compromisso de energia eólica e o risco de compromisso unitário.

A partir da premissa do agendamento adequado, os dispositivos de armazenamento podem armazenar a energia quando a geração renovável é alta ou o preço da eletricidade é

baixo, e atender a demanda quando a eletricidade é cara ou há falta de geração. O artigo de Rahbari-Asr, Zhang e Chow (2016), propõe um algoritmo desenvolvido através de uma metodologia de escalonamento totalmente distribuída baseada no controle ótimo de tempo discreto, descida de gradiente primal-dual e redes de consenso. Na abordagem proposta, o requisito para o centro de controle é eliminado e o cronograma ótimo para todos os dispositivos é encontrado somente através da coordenação iterativa de cada dispositivo com seus vizinhos. Cada dispositivo de armazenamento despachável no sistema encontra a sua programação ideal apenas através da coordenação *peer-to-peer* com os seus vizinhos, ou seja, compartilhando informações diretamente, sem necessitar de um centro de controle. A única informação trocada entre dispositivos é a estimativa de variáveis globais e nenhum dispositivo precisa divulgar com outras informações sobre sua geração/demanda.

### 2.3 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.

A possibilidade do uso de sistemas de armazenamento de energia em conjunto com fontes renováveis de geração de energia para reduzir as incertezas destes tipos de fontes pode ser verificada nos trabalhos apresentados no item 2.2 deste capítulo. Entretanto, as pesquisas não se limitam em somente aplicar sistemas de armazenamento de energia em sistemas de distribuição, mas também, em desenvolver estratégias e modelos para otimizar o uso de armazenadores de energia junto a fontes renováveis, seja sob o ponto de vista técnico ou econômico. Portanto, diversos autores vêm realizando trabalhos que foram pesquisados para contribuir com o desenvolvimento desta Tese.

Baker, Hug e Xin Li (2017) apresentam ferramentas para dimensionar de forma otimizada um sistema de armazenamento de energia para sistemas de geração eólica, sob a premissa de que ele será operado sob um esquema de controle preditivo e que a previsão dos recursos de energia renovável inclui erros de previsão. Para isto, é formulado e resolvido um controle preditivo do modelo estocástico de dois estágios, no qual os erros de previsão de vento são levados em conta no problema de otimização, obtendo simultaneamente a utilização ótima e o tamanho do armazenamento.

Pavithra e Munther (2015) desenvolveram uma metodologia para identificar uma política de gestão de armazenamento ideal e, por sua vez, o tamanho ideal do armazenamento de energia. Para tanto, realizaram a modelagem do problema através de um programa dinâmico estocástico de custo de tempo discreto ao longo de um horizonte infinito que visa minimizar o custo médio da energia elétrica utilizada em longo prazo e o investimento em armazenamento,

e ao mesmo tempo, satisfazer a demanda, considerando: restrições de rampa, perdas de conversão, perdas de dissipação durante carga e descarga e o custo de investimento. Com este trabalho os autores indicam que o valor marginal do armazenamento diminui com o seu tamanho, e que o tamanho de armazenamento ideal pode ser calculado de forma eficiente. Assim como o trabalho apresentado por Pavithra e Munther (2015), esta Tese também define o tamanho do armazenamento, porém através de um ponto de vista diferente. O trabalho apresentado pelos autores propõe definir o tamanho ideal do armazenamento através da minimização do custo médio da energia utilizada, somado com o valor do investimento, o que faz com que o resultado seja certa quantidade de energia a ser armazenada (tamanho de armazenamento), porém sem considerar se haverá disponibilidade desta quantidade de energia. Já esta Tese pode indicar o tamanho a ser adotado pelo sistema de armazenamento de biogás, de acordo com a maximização do uso do estoque de biogás ao longo do tempo de operação da GD, considerando diversas restrições operacionais do bioESS.

Nguyen, Song e Zhu Han (2015) desenvolveram uma metodologia de gerenciamento de sistemas de armazenamento através do consumo de energia e otimização de armazenamento. Esta metodologia considera um ambiente *smart grid* no qual os usuários estão equipados com dispositivos de armazenamento de energia, e pretendem reduzir seu pagamento de energia por programação conjunta de seus aparelhos e controlar o processo de carga e descarga de seus dispositivos de armazenamento de energia. Estes solicitam suas demandas a um distribuidor de energia que determina seus pagamentos de com base nos perfis de carga dos usuários. Para modelagem da otimização do armazenamento, os autores utilizaram a teoria dos jogos para formular o consumo e o armazenamento de energia para o *design* distribuído, em que os jogadores são os usuários e suas estratégias são os esquemas de consumo de energia para aparelhos e dispositivos de armazenamento. Os resultados das simulações realizadas pelos autores mostram que os algoritmos propostos fornecem otimização tanto para o distribuidor de energia como para os usuários.

Esta Tese, assim como o trabalho dos autores, trata do desenvolvimento de uma metodologia a ser aplicada em sistemas de armazenamento, baseada no consumo de energia e otimização de armazenamento. Outro ponto em que esta Tese se assemelha ao trabalho dos autores é o fato da necessidade da metodologia ser desenvolvida considerando um ambiente *smart grid*, porém, enquanto no trabalho apresentado pelos autores o ambiente é necessário para que o distribuidor de energia atue na programação dos aparelhos e no uso da energia armazenada pelo consumidor, na Tese o ambiente *smart grid* é necessário para que a

distribuidora utilize a energia reservada para ela, através da operação da GD responsável pela conversão da energia armazenada na forma de biogás em energia elétrica.

Mesmo que hajam muitas semelhanças, as abordagens das metodologias se diferem em diversos pontos. O ponto mais relevante está no fato de que no trabalho de Nguyen, Song e Zhu Han (2015) o objetivo é a redução dos gastos com energia dos usuários (consumidores). Para isto, o método atua na programação de seus aparelhos e no uso da energia armazenada, considerando os preços da energia como restrições para o modelo de otimização. Já na metodologia desenvolvida nesta Tese, o objetivo é disponibilizar o máximo de energia para a distribuidora nos períodos estabelecidos, através de um sistema de armazenamento a biogás. Logo, a curva de carga da propriedade, produção de biogás e as características físicas do sistema de armazenagem de energia a biogás são consideradas como restrições para o modelo de otimização.

Alguns trabalhos abordam o uso do biogás para auxiliar na otimização de sistemas de armazenamento de energia, seja utilizando diretamente a geração de energia elétrica a biogás para complementar outras fontes renováveis, ou considerando o próprio biogás armazenado como um sistema de armazenamento de energia.

Neste contexto, Lai e McCulloch (2016) desenvolveram uma abordagem determinística para o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico (SFV) com suporte de armazenamento de energia, e de uma geração de energia elétrica a biogás de digestão anaeróbia. Neste trabalho, os autores têm como objetivo conseguir um custo de energia mínimo para o sistema híbrido com a presença de armazenamento de energia com baterias, minimizando o desequilíbrio de energia entre geração e demanda, devido às restrições dos geradores a biogás e dos recursos solares. Além disso, os autores visam também maximizar o dimensionamento de um SFV, de forma a atingir o custo de energia mínimo. Para o desenvolvimento desta metodologia, Lai e McCulloch (2016), caracterizaram este como um problema de otimização, no qual custo da energia é a função objetivo. Para obter sua solução foi escolhida a técnica de otimização de enxame de partículas com método de ponto interior. Tanto o trabalho apresentado pelos autores quanto esta Tese, consiste em caracterizar suas metodologias como um problema de otimização aplicado à geração de energia elétrica a biogás de digestão anaeróbia, sendo que algumas de suas características são utilizadas como restrições do modelo. Mesmo contendo pontos em comum, esta Tese diferencia-se do trabalho desenvolvido pelos autores tanto nos objetivos quanto na modelagem matemática. Enquanto os autores visam minimizar os custos de energia de um sistema híbrido e maximizar o dimensionamento FV, esta Tese consiste em maximizar a potência que pode ser reservada para a distribuidora e determinar os períodos de



disponibilidade, utilizando um sistema de armazenamento de energia a biogás. Os autores utilizam sistemas de armazenamento com baterias como um elemento para auxiliar o sistema FV, e o sistema a biogás no desequilíbrio entre geração e demanda. Já esta Tese utiliza o sistema de armazenamento de energia a biogás para atender a curva de carga da propriedade produtora de biogás, e o potencial de geração remanescente é destinado para a distribuidora. Em se tratando de técnica de otimização, enquanto os autores escolheram o enxame de partículas com método de ponto interior, optou-se utilizar nesta Tese a programação linear inteira.

Salehin et al. (2014) desenvolveram um modelo de otimização para um sistema de energia híbrida (FV-biogás-diesel-baterias) com base nos custos de cada tecnologia a ser aplicado para fornecimento de eletricidade para a população da ilha de Adorsho Char - Bangladesh. Para obter os resultados do sistema energético híbrido desenvolvido, os autores utilizaram o modelo de otimização híbrida para energias renováveis (HOMER) do Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos. Como resultado da aplicação do modelo, obteve-se o gerador de biogás com a maior participação (82%) na geração de eletricidade, seguida de energia solar e gerador diesel. Assim como nesta Tese, os autores utilizam em seu estudo o biogás para geração de energia elétrica, porém em um sistema híbrido e com métodos de otimização distintos. No trabalho desenvolvido pelos autores é formulado um problema de otimização para determinar qual deve ser a participação de cada fonte para atender a carga solicitada. Já nesta Tese, o problema de otimização é formulado para determinar o quanto de energia do sistema de armazenamento a biogás pode ser reservado para uso da distribuidora e quais períodos esta energia está disponível. Além disso, o modelo desenvolvido por Salehin et al. (2014) visa obter seus resultados com base nos custos de cada tecnologia utilizada, enquanto no modelo desenvolvido nesta Tese, a base utilizada para obtenção dos resultados são as características técnicas do sistema de armazenamento de energia a biogás.

Manabe e Hara (2014) participaram do projeto chamado “sistemas de operação de área ampla para várias usinas de energia renovável”, promovido pelo Ministério do Meio Ambiente do Japão. Neste projeto, as saídas de geração de cinco usinas de energia elétrica renováveis são monitoradas *on-line* e a flutuação na produção total é absorvida por uma combinação de três diferentes sistemas de armazenamento de energia a baterias e um gerador a biogás com bioESS. Para isto, os autores desenvolveram um controle cooperativo de três ESSs e do gerador a biogás, considerando a diferença de características como, por exemplo, a razão entre a capacidade de energia (kWh), a potência (kW) e a resposta dinâmica. As finalidades deste sistema são 30 minutos de equilíbrio entre a produção real e programada, e absorção da flutuação de curto prazo de saída (menos de 30 minutos). Adicionalmente, o trabalho desenvolvido por Manabe e

Hara (2014) descreve também o procedimento de *design* de parâmetros de capacidade e controle baseado no método de entropia cruzada, sendo esta a técnica de otimização utilizada. Assim como nesta Tese, os autores utilizam em seu projeto o gerador a biogás com um sistema de armazenamento de energia. A diferença é que a geração com sistema de armazenagem de energia a biogás foi utilizada para atuar em conjunto com mais três ESS, para garantir a potência de saída da usina de energia renovável, enquanto que nesta Tese, é utilizado somente o sistema de armazenamento de biogás com GDs, sem a integração de outros ESS, e parte da energia armazenada como biogás fica reservada para o uso da distribuidora em períodos específicos, convertendo-a em energia elétrica somente se necessário. Os autores utilizaram em seu trabalho o método de entropia cruzada como técnica de otimização, enquanto que nesta Tese utiliza-se a programação linear inteira. Porém, mesmo com técnicas de otimização diferentes, tanto nesta Tese quanto no trabalho de Manabe e Hara (2014) utilizaram-se características físicas da geração e dos ESS para determinar as restrições do modelo de otimização, diferentemente dos outros trabalhos apresentados neste capítulo, que utilizaram características econômicas como restrições aos seus modelos.

A programação linear inteira é uma técnica de otimização que busca a distribuição eficiente de recursos limitados para atender um determinado objetivo, em geral, maximizar ou minimizar resultados. Devido a estas características, esta técnica é utilizada em trabalhos que buscam otimização do uso de armazenadores de energia.

Hadi et al. (2016) desenvolveram um algoritmo de despacho ótimo em tempo real, através da formulação de um problema de otimização a ser resolvido pelo uso programação linear inteira. Este algoritmo é aplicável a usinas de geração eólica com sistemas de armazenamento de energia em larga escala à ar comprimido, que visa gerar receita principalmente explorando oportunidades de arbitragem de preços de eletricidade, preparando de forma ótima o ESS para maximizar a sua contribuição para o alívio do congestionamento enquanto serviço auxiliar. O trabalho desenvolvido pelos autores assemelha-se com esta Tese no que se refere à importância do uso de sistemas de armazenamento de energia para sistemas elétricos que contenham conexões de fontes de energias renováveis, e também, quanto a utilização do armazenamento para suprir a demanda de energia somente quando necessário, como um serviço auxiliar, além de aplicar a programação linear inteira para modelagem matemática do problema de otimização. Porém, mesmo se tratando da utilização de sistemas de armazenamento de energia, esta Tese diferencia-se do trabalho desenvolvido pelos autores em diversos pontos, como por exemplo, na forma em que a energia é armazenada. Na Tese, o armazenamento de energia ocorre antes da conversão em energia elétrica, pois é o biogás que é

armazenado, e sua conversão em energia elétrica só irá ocorrer quando houver necessidade. Já no armazenamento de energia a ar comprimido, haverá a necessidade da conversão da energia elétrica excedente da geração eólica em ar comprimido, e novamente a conversão do potencial armazenado em energia elétrica.

Outro ponto em que esta Tese se difere, está na aplicação do sistema de armazenamento. Enquanto os autores propõem o uso de sistemas de armazenamento em larga escala para sistemas de transmissão, maximizando sua utilização de acordo com os preços da eletricidade, a Tese propõe a utilização de sistemas de armazenamento a biogás - que pode ser de pequena, média ou grande escala (de acordo com o potencial de produção de biogás) - aplicado a sistemas de distribuição, maximizando o uso do estoque de biogás, para determinar o valor de potência da GD reservada para a distribuidora e os períodos de disponibilidade.

O trabalho desenvolvido por Santos, et al. (2016) apresenta um modelo de otimização para geração eólica com participação de sistema de armazenamento genérico, conectados a redes de distribuição. Este modelo determina o equilíbrio entre carga e geração através da minimização do custo da energia durante o período de operação e para isto, os autores utilizaram a programação linear inteira mista estocástica como técnica de otimização. Com a aplicação do modelo os autores apresentam a análise dos impactos da GD eólica e da participação do armazenamento, em um sistema de distribuição ao longo de um período de 24 horas.

O método proposto nesta Tese utiliza a programação linear inteira como técnica de otimização para determinar a máxima potência que pode ser reservada para a distribuidora e os períodos de disponibilidade. Isto se deve por esta ser uma das técnicas mais utilizadas, em se tratando de problemas de otimização que buscam a distribuição eficiente de recursos limitados para atender um determinado objetivo, e também, pelo fato do modelo físico adotado se enquadrar em um modelo linear composto de uma função objetivo e restrições lineares.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados diversos trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento desta Tese, sendo possível avaliar as pesquisas relacionadas a sistemas de armazenamento de energia, tanto no que se refere ao seu uso para minimizar problemas apresentados pela conexão de fontes renováveis de GD, quanto ao desenvolvimento de métodos de otimização aplicados ao uso de sistemas de armazenamento de energia.

Esta proposta se diferencia dos trabalhos apresentados neste capítulo, pois enquanto estes desenvolveram métodos de otimização de sistemas de armazenamento de energia que

utilizam principalmente custos (compra de energia, geração ou da implantação da tecnologia) para determinar o melhor uso dos sistemas de armazenamento, esta Tese utiliza as características técnicas operacionais que compõem o sistema de armazenamento de energia a biogás tais como: produção de biogás, curva de carga do produtor de biogás e características físicas do bioESS, para maximizar a energia que pode ser reservada para a distribuidora e determinar os períodos de disponibilidade.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 FONTES RENOVÁVEIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS**

As fontes de energia renováveis compreendem uma alternativa às tradicionais, como petróleo e o carvão, pois são perenes e causam menos impactos ao meio ambiente.

As principais características das fontes renováveis de energia são a capacidade de renovação constante e conservação dos recursos naturais. Dentre as fontes renováveis de energia podemos citar a energia solar, eólica, hídrica, geotérmica, hidrogênio e biomassa, sendo esta a responsável pela produção de biogás.

Os investimentos para o uso de fontes de energias renováveis vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos (SFG, 2017). Neste contexto, o biogás proveniente de dejetos produzidos em propriedades de produção de animais confinados para fins comerciais como (bovinos de corte, bovinos de leite, suínos e aves) podem contribuir para o aumento do uso deste tipo de fonte renovável, além de serem uma alternativa para redução de possíveis impactos ambientais causados pela não destinação adequada destes dejetos.

##### **3.1.1 Geração de Energia Elétrica a Biogás no Mundo**

A maior parte da produção de biogás ocorre nos Estados Unidos, onde é baseada predominantemente na coleta de gás de aterro, e na Europa, onde a produção se concentra mais na digestão anaeróbia de resíduos agrícolas, incluindo dejetos de animais, e cada vez mais sobre a digestão de restos de comida recuperados, como por exemplo é realizado na Suécia e no Reino Unido (SVENSSON, 2015; LUKEHURST, 2015).

A capacidade de bioenergia do Reino Unido em 2016 atingiu 5,6GW de potência instalada, devido principalmente a 85 novas instalações de biodigestão anaeróbia, atingindo a marca de 400 instalações de produção de biogás para a geração de energia elétrica. Contudo, o aumento na produção de energia elétrica foi de apenas 1%, pois o aumento na produção de biogás por biodigestão anaeróbia foram compensados por reduções na geração de biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos. (NNFCC, 2017).

Na Polônia, os leilões de capacidade com parcelas dedicadas para plantas de resíduos sólidos urbanos e para a geração baseada em biogás estimulou a implantação de nova capacidade instalada de bioenergia, atingindo a marca de 1,34GW em 2016 (REN21, 2017).

A Alemanha é o maior produtor de biogás para geração de energia elétrica da Europa. Em 2010 existiam na Alemanha 4880 centrais de geração de energia elétrica a partir do biogás, totalizando uma potência instalada total de 1,8GW, sendo que 34% das unidades com potências instaladas entre 200 e 499 kW, 28% entre 500 e 999 kW e 22% com potências elétrica instaladas inferiores a 200 kW. Já na produção de biogás, 41% utilizam culturas energéticas, 43% dejetos de animais, 10% resíduos orgânicos e 6% utilizam resíduos agrícolas para produção de biogás (PROBIOGÁS, 2010). Em 2013, o número de centrais de geração de energia elétrica a partir do biogás atingiu a marca de 10.000 centrais, sendo que 8000 utilizam culturas energéticas, 1400 resíduos orgânicos, 400 resíduos sólidos urbanos, 180 dejetos de animais e 80 utilizam resíduos industriais (ATB, 2015). Em 2015 a potência instalada de geração de energia elétrica a partir de biogás foi de 5,43GW, sendo responsável por gerar 31,55TWh, equivalente a 16,8% da energia gerada através de fontes renováveis de energia e 5,3% de todo consumo de energia elétrica do país. (BMW, 2015).

Estima-se que até 2020 a Alemanha atinja 40.000 instalações dedicadas à produção de energia, correspondendo a mais de 12,0GW instalados. Estas instalações serão essencialmente agrícolas individuais, ou de pequenas associações de agricultores. A força motriz para o desenvolvimento do uso do biogás na Alemanha foi à Legislação de Energias Renováveis do ano de 2001 (*Erneuerbare Energien-Gesetz* ou EEG) que promove, através do pagamento de tarifas e diversos bônus, a produção de eletricidade a partir de biogás. A garantia de 20 anos na remuneração da energia é um fator de segurança importante para os investidores (ALEMANHA, 2009).

Outras regiões, incluindo a Ásia e África, estão utilizando de forma mais substancial as tecnologias para geração de energia elétrica a biogás a partir de 2016. As taxas de crescimento foram mais elevadas nessas novas regiões, embora a partir de um nível inicial baixo.

A Tabela 3.1 apresenta a energia elétrica produzida a partir do biogás nos países da União Europeia em 2014.

Tabela 3.1– Energia Elétrica Produzida por Fontes Renováveis na União Europeia 2014.

	Hídrica	Eólica	Biomassa	Biogás	Fotovol.	Térmica Solar	Geotérm	Oceânica	Total	Participação das Fontes renováveis na geração total
	TWh									%
Austria	41	3,8	3,7	0,6	0,8	-	0,001	-	50	66,9
Belgica	0,3	4,6	3,5	0,9	2,9	-	-	-	12,3	13,6
Bulgária	4,6	1,3	0,1	0,1	1,3	-	-	-	7,4	19,4
Chipre	-	0,2	-	0,1	0,1	-	-	-	0,3	7,3
República Tcheca	1,9	0,5	2,1	2,6	2,1	-	-	-	9,2	13,2
Dinamarca	0,02	13,1	3,9	0,4	0,6	-	-	-	18,1	51,6
Estônia	0,03	0,6	0,7	0,04		-	-	-	1,4	
Finlândia	13,4	1,1	11,4	0,4	0,01	-	-	-	26,3	30,5
França	62,8	17,2	3,5	1,5	5,9	-	-	0,5	91,5	18,5
Alemanha	19,6	57,4	17,9	31,1	36,1	-	0,1	-	162,6	27,4
Grécia	4,5	3,7	-	0,2	3,8	-	-	-	12,2	20,5
Hungria	0,3	0,7	1,8	0,3	0,1	-	-	-	3,1	7,3
Irlanda	0,7	5,1	0,3	0,2		-	-	-	6,4	22,4
Itália	58,5	15,2	6,2	8,2	22,3	-	5,9	-	120,7	37,7
Lituânia	0,4	0,6	0,3	0,1	0,1	-	-	-	1,5	12,6
Luxemburgo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-	0,4	5,1
Malta	-	-	-	0,007	0,07	-	-	-	0,1	3,3
Holanda	0,1	5,8	4,2	1	0,8	-	-	-	12,4	10,5
Polônia	2,2	7,7	9,2	0,9	0,01	-	-	-	19,9	12,3
Portugal	15,6	12,1	2,8	0,3	0,6	-	0,2	-	31,6	58,8
Romênia	18,8	6,2	0,5	0,1	1,6	-	-	-	27,1	46,3
Eslováquia	4,2	0,01	0,9	0,5	0,6	-	-	-	6,2	21,9
Espanha	39,2	52	4,7	0,9	8,2	5,5	-	-	110,4	40,1
Suécia	63,8	11,2	10,7	0,01	0,05	-	-	-	85,8	62,2
Reino Unido	5,9	32	16,8	5,9	4,1	-	0,002	-	64,7	18

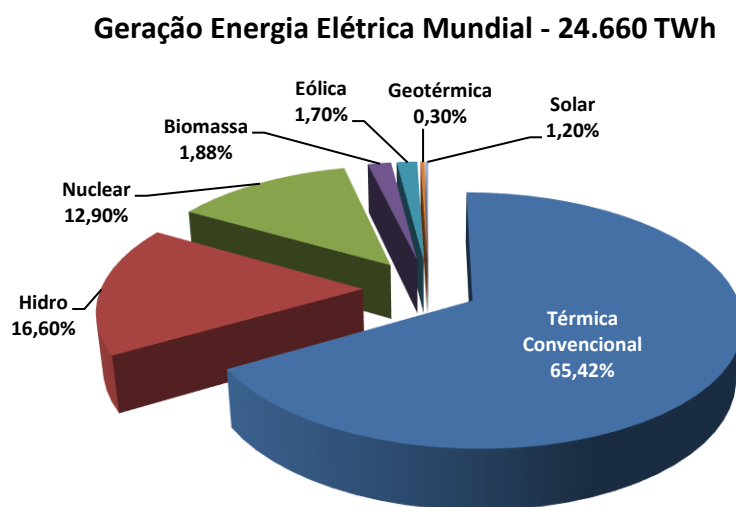
Fonte: adaptado BMWi (2015).

Na Índia, onde a capacidade de biogás é estimada em 300 MW, muitos processos industriais agora produzem biogás, impulsionados pelos fortes padrões de qualidade da água que limitam o lançamento de efluentes nos cursos de água. Em outras partes da Ásia, há uma tendência semelhante para produzir e usar biogás obtido a partir de tratamento de efluentes líquidos e de resíduos. No final de 2016, a *Green & Smart Holdings* anunciou o início das operações de sua primeira usina de energia utilizando biogás (2MW), que vai despachar energia elétrica para a rede nacional da Malásia (REN21, 2017).

Na África, a produção de biogás é oriunda de resíduos municipais e agrícolas. Na África do Sul, o desenvolvedor de energia renovável *New Horizons* juntou-se à empresa de gás *Afrox* para instalar uma usina de biogás de energia de resíduos perto da Cidade do Cabo, no valor de US\$ 29 milhões. No Quênia, a primeira planta de geração de energia elétrica a partir do biogás do país conectada à rede está instalada em uma fazenda comercial, produzindo 2MW de energia elétrica, cujo excedente é suficiente para abastecer entre 5.000 e 6.000 casas rurais deste país. (REN21, 2017).

A capacidade instalada mundial de geração de energia com base na biomassa expandiu cerca de 5% em 2015, aumentando para 106,4GW. A geração de energia a partir da biomassa aumentou cerca de 8%, totalizando 464TWh, sendo que destes 20% utilizam biogás. A Figura 3.1 apresenta a participação percentual por tipo de fonte na matriz energética mundial em 2015 (REN21, 2017).

Figura 3.1 - Geração Energia Elétrica por Fonte no Mundo 2015 (%)



Fonte: EPE (2016 apud EIA 2015)

### 3.1.2 Geração de Energia Elétrica à Biogás no Brasil

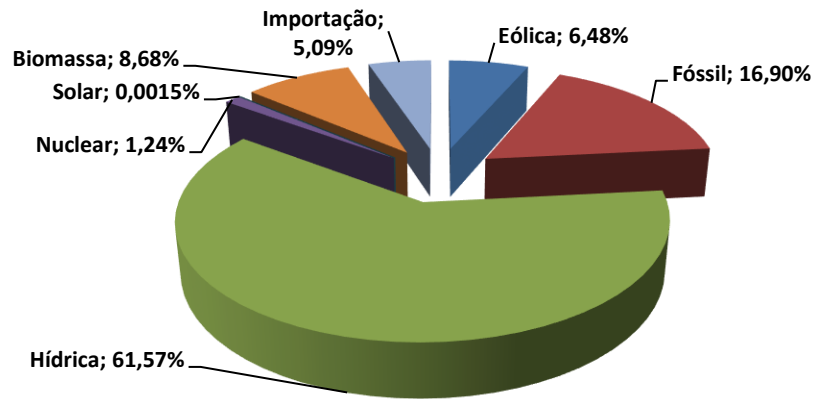
O Brasil dispõe de condições climáticas favoráveis e quantidade expressiva de biomassa para explorar esse amplo mercado que figura entre os mais promissores na atualidade, podendo assim, evitar a continuidade da exploração dos recursos hídricos, atualmente o potencial de geração de energia elétrica mais utilizado no país.

No Brasil, o aproveitamento do biogás ainda é incipiente, pois conta com apenas 118,60MW de capacidade instalada, distribuídas em 29 usinas de um total de 530 usinas à



biomassa (SFG, 2017). A Figura 3.2 apresenta a composição da matriz energética brasileira em função do tipo de fonte, e a Tabela 3.2 apresenta o número de usinas em operação em função do tipo de fonte.

Figura 3.2 - Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil em 2016 (%).



Fonte: SFG (2017).

Tabela 3.2 – Número de Usinas de Geração de Energia Elétrica em Operação em Função do Tipo de Fonte.

(continua)

Origem	Fonte		Capacidade Instalada			Total		
	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(kW)	%	Nº de Usinas	(kW)	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de cana de Açúcar	395	10.881.420	6,7861	413	10.994.275	6,8564
		Biogás - AGR	3	1.822	0,0011			
		Capim Elefante	3	65.700	0,0409			
		Casca de Arroz	12	45.333	0,0282			
	Biocombustíveis Líquidos	Etanol	1	320	0,0001	3	4.670	0,0029
		Óleos Vegetais	2	4.350	0,0027			
	Floresta	Carvão Vegetal	8	54.097	0,0337	87	2.830.248	1,765
		Gás de alto forno-biomassa	10	114.265	0,0712			
		Lenha	2	14.650	0,0091			
		Licor Negro	17	2.261.136	1,4101			
		Resíduos Florestais	50	386.100	0,2407			
	Resíduos Animais	Biogás - RA	11	2.099	0,0013	11	2.009	0,0013
	Resíduos Sólidos Urbanos	Biogás - RU	15	114.680	0,0715	16	117.380	0,0732
Carvão RU		1	2.700	0,0016				
Eólica	Cinética do Vento	Cinética do Vento	424	10.393.742	6,4819	424	10.393.742	6,4819

(Conclusão)

Fonte			Capacidade Instalada			Total		
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(kW)	%	Nº de Usinas	(kW)	%
Fóssil	Carvão Mineral	Calor de Processo-CM	1	24.400	0,0152	24	3.830.995	2,3891
		Carvão Mineral	13	3.389.465	2,1138			
		Gás de Alto Forno-CM	10	417.130	0,2601			
	Gás Natural	Calor de Processo-GN	1	40.000	0,0249	161	13.012.617	8,1152
		Gás Natural	160	12.972.617	8,0902			
	Outros Fósseis	Calor de Processo-OF	1	147.300	0,0918	1	147.300	0,0918
	Petróleo	Gás de Refinaria	6	315.560	0,1967	2228	10.106.325	6,3027
		Óleo Combustível	43	4.056.847	2,53			
		Óleo Diesel	2161	4.753.590	2,9645			
		Outros energéticos do petróleo	18	980.328	0,6113			
Hídrica	Potencial Hidráulico	Potencial Hidráulico	1263	98.724.977	61,569	1263	98.724.977	61,569
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,241	2	1.990.000	1,241
Solar	Radiação Solar	Radiação Solar	44	23.761	0,0148	44	23.761	0,0148
Importação	Paraguai			5.650.000	3,5235			5,0951
	Argentina			2.250.000	1,4031			
	Venezuela			200.000	0,1247			
	Uruguai			70.000	0,0436			
<b>Total</b>			<b>4677</b>	<b>160.348.389</b>	<b>100</b>	<b>4677</b>	<b>160.348.389</b>	<b>100</b>

Fonte: SFG (2017).

Considerando a elevada concentração da população brasileira em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial na área rural, o atual aproveitamento do biogás no Brasil encontra-se bastante aquém do seu potencial, visto que apenas 0,0728% do total da energia elétrica produzida no país em 2016 provêm do uso do biogás.

Dentre os diversos tipos de biomassa encontrados na natureza e que podem ser utilizados para produção de biogás, pode-se citar os resíduos sólidos urbanos, efluentes líquidos e dejetos de animais.

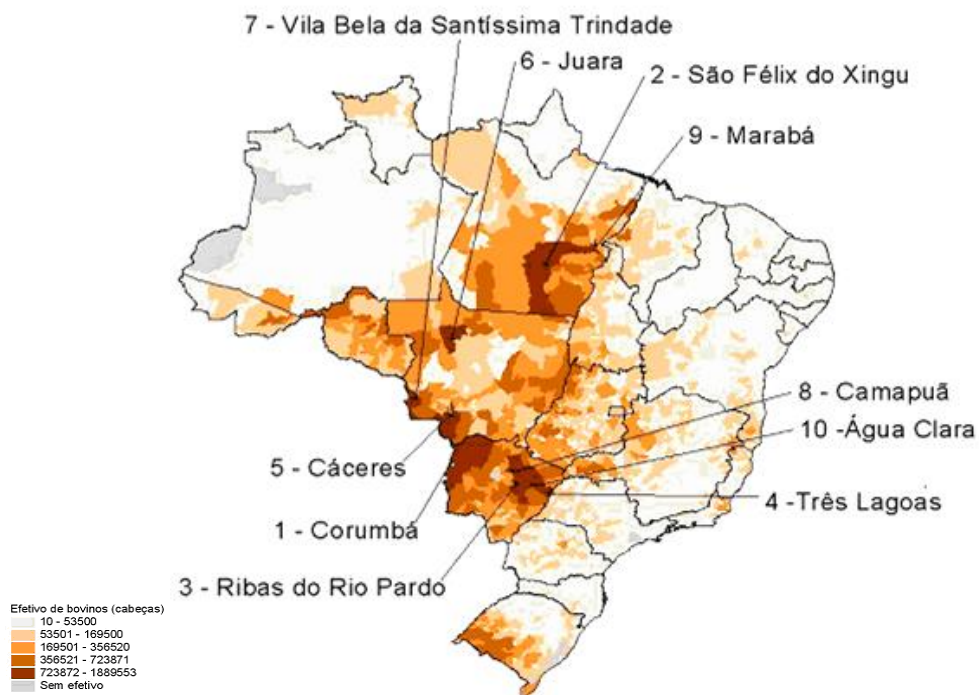
Nesta Tese considerou-se somente o biogás oriundo de dejetos animais para o desenvolvimento da metodologia proposta, tendo em vista que a partir deste, é possível obter pequenos, médios e grandes potenciais de produção de biogás, e também por este possuir um grande potencial de produção a ser explorado.

### 3.2 POTENCIAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS ORIUNDO DE DEJETOS DE ANIMAIS

A pecuária, suinocultura e avicultura exercem uma grande relevância nas exportações brasileiras, além de abastecer o mercado interno, sendo estas atividades econômicas desenvolvidas em áreas rurais.

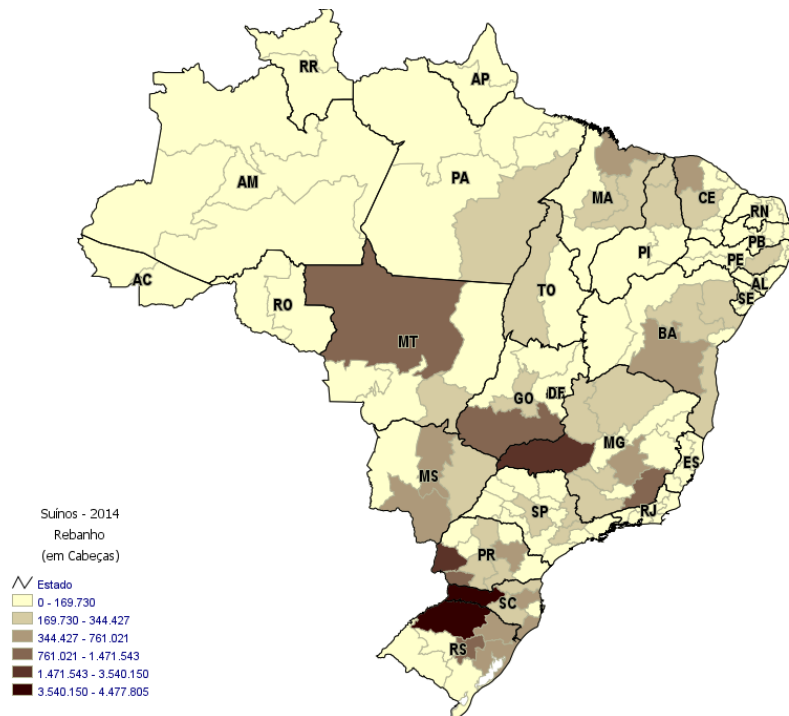
Segundo os últimos dados levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em 2015 o Brasil ocupava o primeiro lugar no mundo em produção bovina (215 milhões de animais), além do terceiro lugar na produção de suínos (40,3 milhões de animais) e terceiro lugar na produção de aves (1332 milhões de animais). As propriedades criadoras de animais estão em áreas rurais distribuídas ao longo do território brasileiro, porém com uma concentração maior no interior do país. Logo, o potencial de produção de biogás e consequentemente de energia elétrica possui a mesma distribuição. As Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam, respectivamente, a distribuição da produção de bovinos, suínos e aves no território nacional.

Figura 3.3 - Distribuição de Bovinos no Território Brasileiro



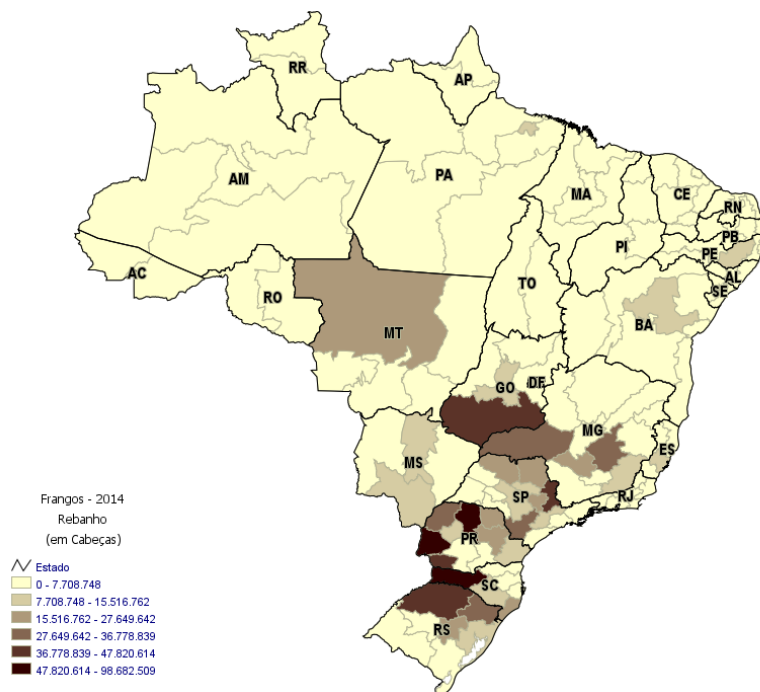
Fonte: IBGE (2015).

Figura 3.4 - Distribuição de Suínos no Território Brasileiro.



Fonte: Embrapa (2014).

Figura 3.5 - Distribuição de Frangos no Território Brasileiro.



Fonte: Embrapa (2014).

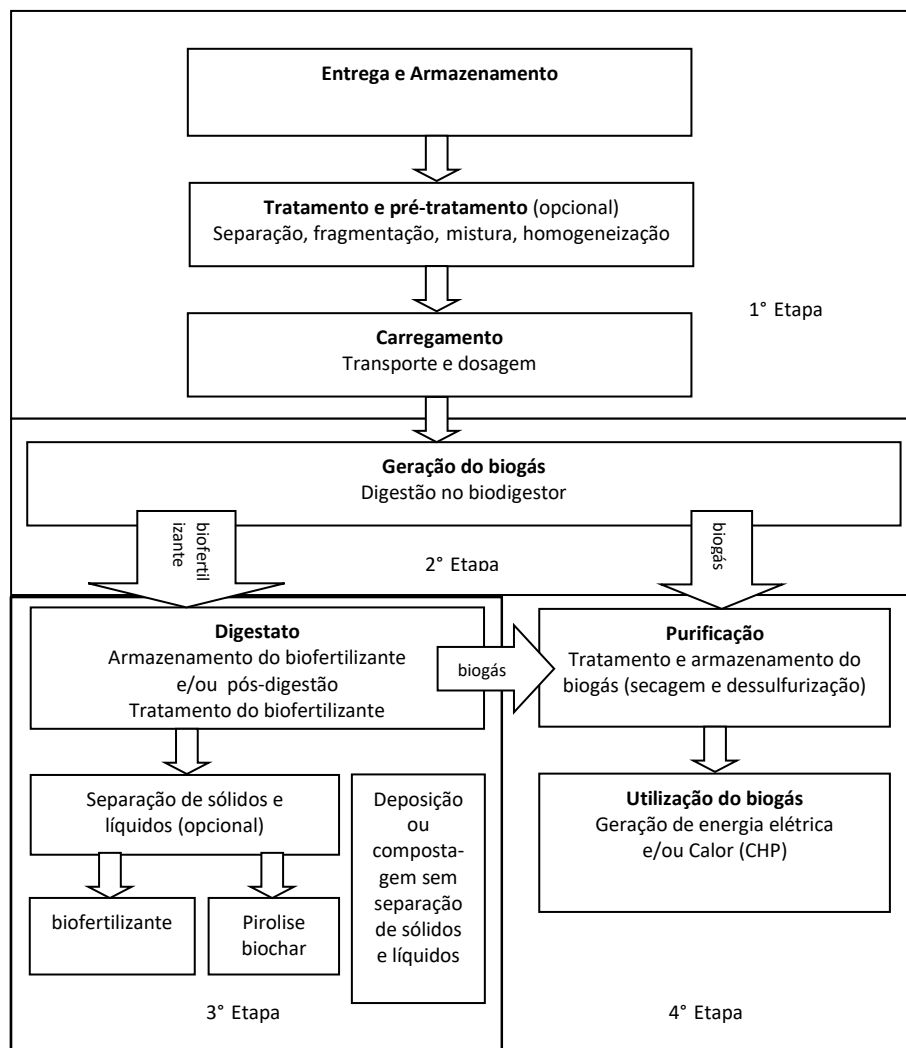
O Brasil possui capacidade de produzir uma quantidade significativa de biogás a partir de dejetos de animal, o qual pode ser armazenado para ser convertido em energia elétrica.

Portanto, há um grande potencial energético que pode ser utilizado, e como este potencial encontra-se distribuído pelo território brasileiro, seu aproveitamento pode acarretar em um aumento considerável do número de GD a biogás, uma vez que até 2016, havia somente 2.099kW de potência instalada divididas em 11 usinas, totalizando 0,0013% da capacidade instalada da matriz energética brasileira.

### 3.3 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA

O biogás pode ter diversas aplicações, dentre elas, a utilização como combustível para geração de energia elétrica. O processo para geração de energia elétrica a partir de biogás depende de várias etapas conforme apresentado na Figura 3.6 (PROBIOGÁS, 2010).

Figura 3.6 – Processo de Geração de Energia Elétrica a Biogás de Dejetos de Animais



Fonte: adaptado Probiogás (2010).

### 3.3.1 O Biogás e seu Processo de Produção

O biogás é uma mistura gasosa combustível inodora e incolor, sendo um dos produtos finais da digestão anaeróbia de biomassa. A digestão anaeróbia é um processo biológico natural que ocorre na ausência de oxigênio molecular livre, no qual populações consorciadas bacterianas interagem estritamente para promover complexas reações bioquímicas, sequenciais, que sob a ação de microrganismos decompõem a matéria orgânica, estabilizando-a por seus processos metabólicos, de fermentação e respiração. (MOSEY, 1983). Deste processo de estabilização, e também de autorregulação da matéria orgânica (compostos orgânicos complexos como: carboidratos, proteínas e lipídeos) resultam produtos mais simples, principalmente os gases: metano ( $\text{CH}_4$ ), que normalmente representa de 50 a 80% da mistura, e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que representa teor de 30 a 40%. Outros gases também participam da mistura, mas em proporções bem menores, como o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), traços de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Diversos fatores influenciam nos processos anaeróbios de produção do biogás, tais como: Temperatura no interior do biodigestor, valor do potencial Hidrogeniônico (pH), concentração de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), substâncias tóxicas, concentração de nutrientes (relação Carbono/Nitrogênio), hidrodinâmica e tipo de substrato, são os (ALVES, J. W. S, 2000).

O poder calorífico do biogás depende da quantidade de metano na mistura, ou seja, quanto maior for a concentração de metano, melhor será o biogás em termos energéticos. O gás metano puro e em condições normais de pressão e temperatura, pode obter um poder calorífico de aproximadamente 9,9 kWh/m<sup>3</sup>. Já o biogás, como produto final, com um teor de metano entre 50 e 80%, terá um poder calorífico entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup>. (COLDEBELLA, 2004). A Tabela 3.3 mostra a equivalência energética do biogás em comparação com outros combustíveis

Tabela 3.3 – Equivalência energética de 1m<sup>3</sup> de biogás em comparação com outros combustíveis.

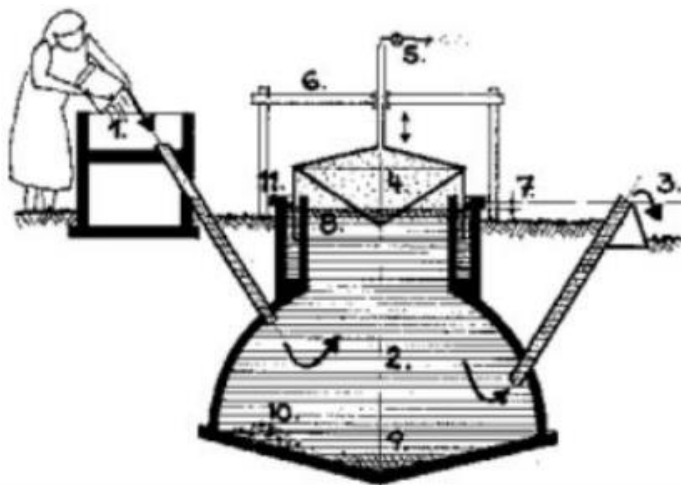
Fonte de Energia	Ferraz e Mariel (1980)	Sganzeira (1983)	Nogueira (1986)	Barrera (2003)
Gasolina (L)	0,61	0,61	0,61	0,61
Querosene (L)	0,58	0,58	0,62	0,58
Diesel (L)	0,55	0,55	0,55	0,55
GLP (kg)	0,45	0,45	0,43	0,45
Álcool (L)	-	0,79	0,8	0,79
Carvão mineral (kg)	-	0,74	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,52	3,5	1,54
Energia Elétrica (kwh)	1,43	1,428	-	1,43

Fonte: Ferraz e Mariel, (1980); Sganzeira, (1983); Nogueira, (1986); Barrera, (2003)

A produção do biogás se dá em um equipamento denominado de biodigestor, o qual é projetado e construído de modo a oferecer condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento da digestão anaeróbia, e com isso, controlar o processo de decomposição anaeróbia, criando condições propícias para manter a biomassa de bactérias ativas, de maneira que seja alcançada a eficiência almejada para o sistema.

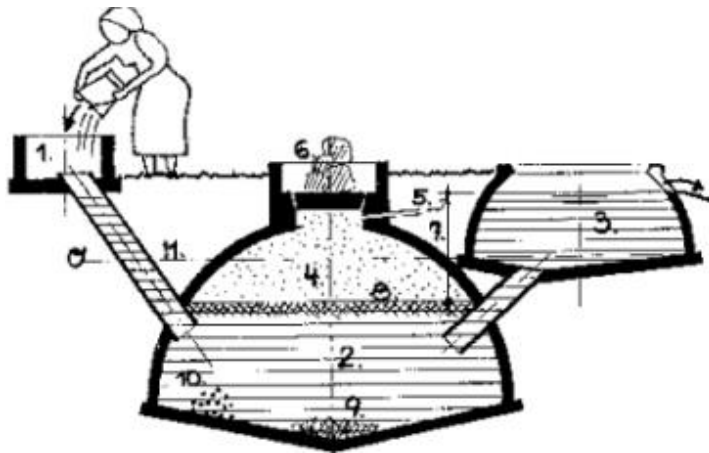
Os sistemas de biodigestores rurais contínuos mais difundidos são os modelos: modelo indiano, modelo chinês, modelo canadense de fluxo tubular ou *plug flow* e o modelo alemão ou *Continuous Flow Stirred-Tank Reactor* (CSTR). As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam algumas características dos biodigestores modelo indiano, chinês e canadense de fluxo tubular, respectivamente.

Figura 3.7 - Biodigestor Modelo Indiano



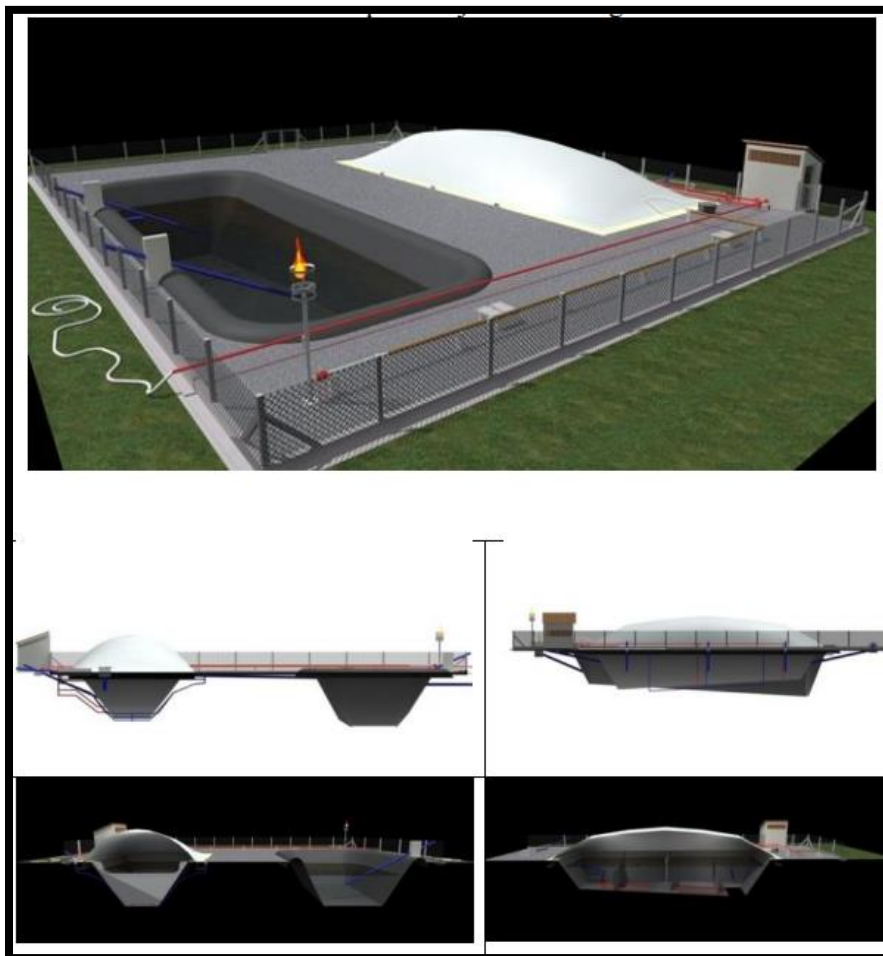
Fonte: Sasse (1988).

Figura 3.8 - Biodigestor Modelo Chinês



Fonte: Sasse (1988).

Figura 3.9 - Biodigestor Modelo Canadense de Fluxo Tubular



Fonte: Nazaro (2016 apud Acervo do Projeto Alto Uruguai Eletrosul/Eletróbrás).



Os biodigestores modelo indiano, chinês, canadense são do tipo contínuo, nos quais a matéria-prima é colocada continuamente e quase sempre diretamente. A matéria-prima a ser utilizada deve ser de fácil biodegradação e ter boa disponibilidade. Sendo assim, a produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos de animais ocorre de forma contínua ao longo do dia, desde que sejam controlados alguns parâmetros do processo anaeróbico, tais como: temperatura, pH, alcalinidade e manejo adotado nos sistemas de produção de animais confinados (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

Outro fator que influencia na produção de biogás é a própria característica do resíduo utilizado como substrato para o crescimento dos microrganismos no biodigestor. Essa diferença na capacidade de produção de biogás está associada a vários fatores, como dieta dos animais e sistema digestivo, que fazem com que sejam produzidos resíduos de características e potencialidades distintas na produção de biogás (KUNZ; OLIVEIRA, 2006). A Tabela 3.4 apresenta o potencial de produção de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais.

Tabela 3.4 – Produção de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais.

<b>Animal</b>	kg esterco/animal/dia	m <sup>3</sup> biogás/ kg esterco	m <sup>3</sup> biogás/kgSV	m <sup>3</sup> biogás/animal/dia
Bovinos (500kg)	10 -15	0,038	0,094-0,31	0,36
Suínos (90kg)	2,3 – 2,8	0,079	0,37-0,50	0,24
Aves (2,5kg)	0,12 - 0,18	0,055	0,31-0,62	0,014

Fonte: Cenbio (2012)

### 3.3.2 Sistemas de Armazenamento de Energia a Biogás

Uma característica do biogás é que sua produção pode ser armazenada em câmaras de armazenamento de gás denominadas de gasômetros ou acumuladores. O gasômetro executa a função de equilibrar as variações de produção e consumo devido às mudanças de volume provocadas por variações de temperatura, bem como, equilibrar a produção contínua de biogás e o consumo descontínuo do mesmo. Por exemplo, a baixa produção de biogás é acumulada por um período longo para ser consumida após, em um curto período, mas com maior desempenho, ou seja, acumula certa quantidade de energia durante um longo período, para ser consumida em uma escala maior em um curto período. Devido estas características o gasômetro pode ser considerado um sistema de armazenamento de energia a biogás, sendo denominado nesta Tese de (*biogas energy storage system – bioESS*).

Em termos construtivos, o bioESS consiste em um equipamento expansível que infla e desinfla como um balão de acordo com a produção e consumo de biogás. Precisa ser impermeável a gases, resistente a pressão, raios ultravioleta, temperatura, intempéries, e a ação das substâncias em contato, sendo assim, a maior parte utilizam membranas flexíveis de diversos tipos, tais como: manta em laminado de PVC (policloreto de vinila), Etileno propileno dieno monómero (EPDM) e Polietileno de alta densidade (PEAD) (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

O tamanho e a complexidade variam desde bioESS pequenos e simples, normalmente utilizados em pequenas propriedades rurais produtoras de animais, até bioESS de grandes volumes e de construção mais complexa, utilizados em grandes propriedades rurais e em aplicações industriais.

Os bioESS possuem um queimador (*flare*) responsável pela queima do excesso de biogás produzido e que não pode ser armazenado nos momentos em que já se atingiu a capacidade máxima de armazenamento para uma certa pressão de operação.

A pressão de operação é mantida através de uma válvula de regulação de pressão e uma válvula de segurança, que atua como proteção contra pressão excessiva de biogás. A pressão de operação varia de 0,5mbar até 50 mbar, e esta é definida de acordo com o tipo de instalação e *design* do bioESS (SATTLER; CENO-TEC, 2016). A Tabela 3.5 apresenta alguns aspectos característicos de bioESS para plantas de biogás.

Tabela 3.5 – Aspectos Característicos dos bioESS

Dimensionamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De pequenos volumes até 2000 m<sup>3</sup></li> <li>• Pressão de operação: 0,5 – 50mbar (baixa pressão)</li> <li>• Permeabilidade da lona: aceitável entre 0,1-0,5% de perda de biogás por dia;</li> <li>• Materiais: PVC; EPDM; HDPE; borracha butílica;</li> </ul>	
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armazenamento de biogás;</li> <li>• A concentração do metano no biogás pode ser medida no gasômetro</li> </ul>	
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O uso de pesos sobre a lona flexível permite aumentar a pressão;</li> <li>• Podem exigir espaços maiores na planta de biogás</li> </ul>	
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conforme o caso pode necessitar edificação adicional;</li> <li>• Quando instalados em edifícios, é necessário assegurar a boa ventilação do local para evitar misturas de gases explosivos;</li> </ul>	
Formas Construtivas	Aplicação em Pequenas Propriedades Rurais - Pequeno volume	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalado junto ao biodigestor anaeróbio (lagoa coberta);</li> <li>• Balão independente ou separado;</li> </ul>
	Aplicação Industrial ou Grandes Propriedades Rurais - Médio e Grande volume	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membrana dupla montada sobre um tanque;</li> <li>• Membrana em teto intermediário acima do biodigestor;</li> <li>• Independente de dupla membrana;</li> </ul>

Os bioESS de pequenos volumes (menor capacidade de armazenamento) são equipamentos mais simples e normalmente utilizados em pequenas propriedades rurais produtoras de animais, podendo ser de dois tipos: instalado junto ao biodigestor anaeróbico ou separado (balão independente).

O bioESS instalado junto ao biodigestor anaeróbico mais aplicado em propriedades rurais de criação de animais é o bioESS com biodigestor modelo canadense ou fluxo tubular. Este modelo de biodigestor possui uma construção simplificada do tipo horizontal com a câmara de biodigestão escavada no solo e a membrana do bioESS é instalada sobre o biodigestor formando uma cúpula. Durante a produção de biogás, a cúpula do biodigestor infla por ser feita de material plástico maleável (PVC) (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). A Figura 3.10 apresenta um bioESS instalado junto com um biodigestor de fluxo tubular em uma propriedade rural de suinocultura no município de Tucunduva - RS.

Figura 3.10 – bioESS com Biodigestor de Fluxo Tubular



Fonte: Alves, R. et al. (2010).

Tanto neste tipo de biodigestor quanto nos demais, o biogás pode ser enviado para um bioESS denominado de balão independente, permitindo um armazenamento de biogás separado do biodigestor, seja como armazenador principal, ou nos casos em que se queira aumentar a capacidade de armazenamento (LUCAS JUNIOR; SOUZA 2009)

As Figuras 3.11 e 3.12 apresentam um bioESS independente utilizado para armazenagem de biogás em uma propriedade rural de suinocultura no município de Tucunduva - RS .

Figura 3.11 – bioESS Tipo Balão Independente



Fonte: Alves, R. et al (2010).

Figura 3.12 - bioESS Tipo Balão Independente Instalado ao lado de um bioESS com Biodigestor de Fluxo Tubular.



Fonte: adaptado Alves,R. et al. (2010).

Os bioESS de médio e grande volumes possuem maior complexidade e necessitam de mais equipamentos incorporados para seu funcionamento, tais como: ventiladores, válvulas de regulagem de pressão, *flare*, membranas intermediárias e etc. Podem ser de diversos formatos tais como: independente de dupla membrana, membrana dupla montado sobre um tanque, membrana em teto intermediário acima do biodigestor.

O bioESS independente de dupla membrana é instalado sobre uma base de concreto e é constituído por uma membrana exterior, uma interior, e outra inferior. O volume efetivo de armazenagem de biogás está entre a membrana interior e a membrana de fundo. O ventilador

pressuriza o ar entre a membrana interior e a exterior, mantendo a forma desta membrana estável em todos os momentos. A pressão de operação é mantida constante através de uma válvula de regulagem de pressão. A pressão de ar constante é responsável pela forma da membrana externa e assegura que o sistema de armazenamento de biogás possa suportar o vento. As tubulações de entrada e saída de biogás em alguns casos ficam localizadas na base de concreto.

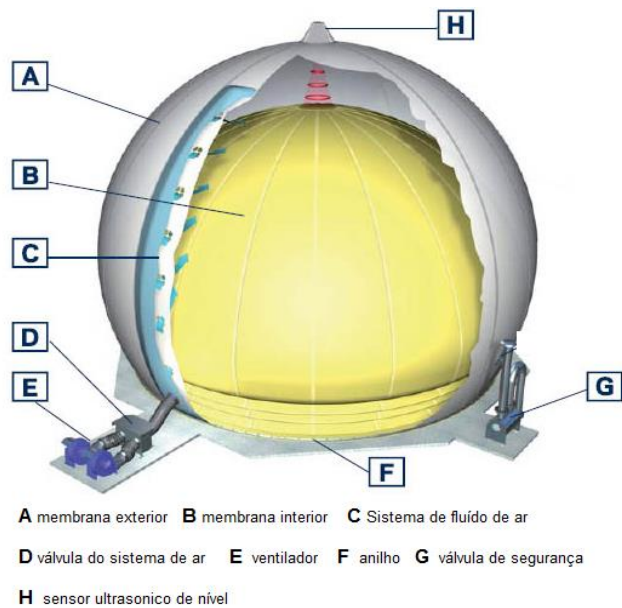
A membrana externa tem uma janela de inspeção que permite o controle visual do nível de enchimento. No entanto, a medição do grau de enchimento é assegurada através de um sistema de medição por ultrassom. Portanto, o bioESS independente de dupla membrana é dotado de uma válvula de segurança para proteção contra pressão excessiva de biogás, *flare*, condutos para biogás, sistema de purificação de biogás, e ventiladores. Este tipo de bioESS possui as seguintes características: maior pressão de operação, volumes grandes, resistência à vento e neve, baixos custos de investimento, operação e manutenção em comparação com os depósitos aço; construção de curto prazo, alta segurança operacional, e medição precisa do nível do biogás. A Figura 3.13 apresenta um bioESS independente de dupla membrana e a Figura 3.14 apresentam alguns componentes de um bioESS independente de dupla membrana.

Figura 3.13 - bioESS Independente de Dupla Membrana



Fonte: <http://www.albrecht.com.br>

Figura 3.14 - Componentes de um bioESS Independente de Dupla Membrana



Fonte: adaptado Sattler, Ceno-Tec (2016).

O bioESS de membrana dupla montado sobre um tanque é composto de uma membrana externa responsável pela forma, e uma membrana interior, que executa a função de vedação do fermentador. Um ventilador de ar de suporte de operação contínua transporta o ar para os espaços vazios, mantendo assim a pressão constante, independentemente da produção de biogás. A pressão nos espaços vazios cumpre a função de preservar a forma da membrana externa assegurando assim que bioESS seja resistente a todos os tipos de carga externa (SATTLER, CENO-TEC, 2016). Ambas as membranas são ancoradas na parede exterior do tanque de aço e uma subestrutura previne que membrana interna seja imersa no substrato e seja danificada pelo sistema de mistura. As válvulas de segurança protegem o bioESS contra ou sobrepessão ou depressão. A Figura 3.15 apresenta os componentes de um bioESS de membrana dupla montado sobre tanque.

Figura 3.15 - Componentes de um bioESS de Membrana Dupla Montado sobre Tanque



- |                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| 1 Membrana externa   | 7 Medidor de nível de enchimento |
| 2 Membrana interna   | 8 Ventilador de Insuflamento     |
| 3 Sistema de fixação | 9 Válvula reguladora de pressão  |
| 4 Mastro central     | 10 Válvula anti-retorno          |
| 5 Ancoragem          | 11 Válvula de segurança          |
| 6 Janela de Inspeção |                                  |

Fonte: Tecon (2013).

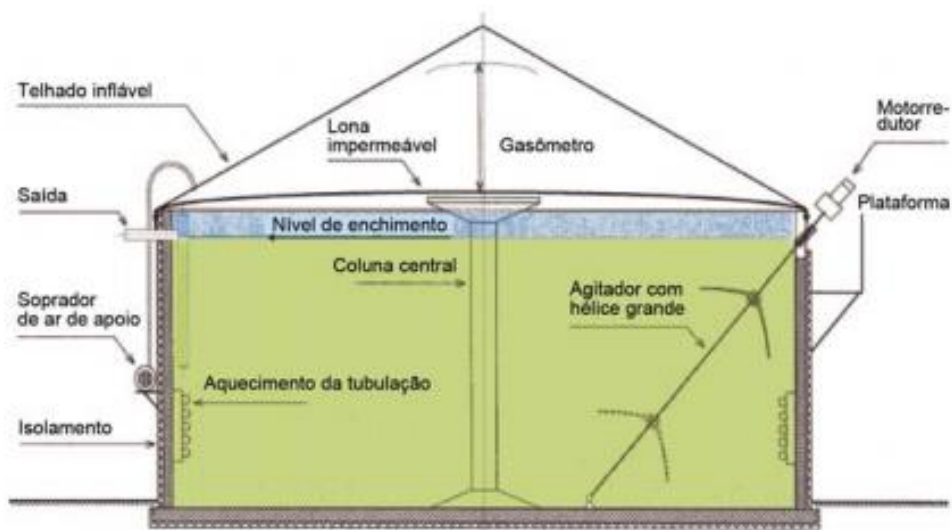
O bioESS com membrana em teto intermediário acima do biodigestor é composto de uma membrana externa e uma para vedação interior fechando o reator. Um mastro central, que sobe para o ponto mais alto é responsável pela formação da membrana externa. Ambas as membranas são ancoradas nas paredes exteriores de aço do reator. A válvula de alívio de pressão de biogás protege o acumulador.

Figura 3.16 - bioESS com Membrana em Teto Intermediário acima do Biodigestor



Fonte: Sattler, Ceno-Tec (2016).

Figura 3.17 - Componentes de um bioESS com Membrana em Teto Intermediário acima do Biodigestor



Fonte: Probiogás (2010).

### 3.3.3 Produção de Energia Elétrica

A produção de energia elétrica a partir do biogás é realizada por meio de um grupo gerador composto por uma máquina primária (MP) e um gerador de energia elétrica síncrono ou assíncrono. Através do grupo gerador, a energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada na máquina



primária, a qual aplica esta energia mecânica em forma de torque no gerador de energia elétrica, convertendo a energia do biogás em energia elétrica.

As principais tecnologias envolvidas para geração de energia elétrica através do uso do biogás 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 as células à combustível (BARIN, 2012)

As microturbinas a gás e os motores de combustão interna de ciclo Otto são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão de energia, porém a utilização de microturbinas ainda apresenta custos elevados, e o seu tempo de vida útil operando com biogás é baixo (BRIGNOL, 2013).

A oferta de motores ciclo otto 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 pequena 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 fabricação nacional que são amplamente difundidos no país e possuem boa oferta de peças de reposição para servirem de base para a chamada “ottolização” (ARAPONGAS, 2009).

A relação entre a energia elétrica e o biogás é de 6,5 kWh/m<sup>3</sup>. Porém, a conversão do biogás em energia elétrica utilizando grupos geradores com motor de combustão interna ciclo Otto, possui um rendimento médio de 23% o que reduz a equivalência para 1,428kWh/m<sup>3</sup> (STEMAC, 2013).

É possível calcular através da Equação 3.1 a potência de geração de energia elétrica a partir do biogás utilizando qualquer tipo de MP, desde que conhecida a produção de biogás e o rendimento do grupo gerador (COSTA, D.F., 2006).

$$P_e = \frac{PB \cdot PCI \cdot \eta \cdot 4,1868}{86400} \quad (3.1)$$

onde:

$P_e$  = Potência de geração de energia elétrica a biogás (kW);

$PB$  = Produção diária de biogás ( $m^3$  biogás/dia);

$PCI$  = Poder calorífico do biogás  $5500 \text{ kcal}/m^3$  biogás (ICLEI, 2009; PECORA, 2008);

$\eta$  = Rendimento grupo gerador de energia elétrica;

4,1868 = Fator de conversão de kcal para kJ;

86400 = Número de segundos de um dia.

Esta equação determina a potência elétrica considerando a produção diária de biogás e 24 horas por dia de geração de energia elétrica.

A quantidade de energia elétrica possível de ser produzida de acordo com a produção de biogás pode ser calculada pela Equação 3.2.

$$EE = PB \cdot PCI \cdot \eta \cdot 1,163 \times 10^{-3} \quad (3.2)$$

onde:

$EE$  = Energia elétrica diária produzida pelo biogás (kWh);

$1,163 \times 10^{-3}$  = fator de conversão de kcal para kwh.

### 3.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS ORIUNDO DE DEJETOS DE ANIMAIS

Nesta seção são abordados os conceitos e as características da geração distribuída a biogás a partir da biodigestão de dejetos de animais e, principalmente, os fundamentos do regime operacional deste tipo de geração de energia.

#### 3.4.1 Geração Distribuída

A Geração Distribuída (GD) é a geração que não é planejada nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizada. Para o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - 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, a geração distribuída foi introduzida de forma oficial através do Decreto nº 5.163 de 30 de Julho de 2004, sendo definida da seguinte forma, (BRASIL, 2004):

[...] "Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída à 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)

A REN 414/2010 definiu que a GD deve ser 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 Agência Nacional de Energia Elétrica, comercializar os excedentes de energia, denominados de Autoprodutores de Energia - APE (ANEEL, 2010a).

O Módulo 3 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST 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 Operador Nacional do Sistema (ANEEL, 2015a).

A fim de incentivar e consolidar a instalação de geração distribuída de pequeno porte, a ANEEL publicou as Resoluções Normativas - REN 482/2012, alterada pela REN 687/2015 e a Seção 3.7 do Módulo 3 - PRODIST, introduzindo no Brasil o conceito *Net Metering*.

Estes instrumentos regulatórios simplificaram os procedimentos para a conexão das GD no sistema de distribuição, permitindo que cada unidade consumidora (UC) possa produzir sua própria energia e comercializar o excedente da energia gerada, em forma de empréstimo para a distribuidora, através do sistema de compensação de energia elétrica.

Segundo ANEEL (2015b) a participação de uma GD no sistema de compensação financeira, se dá somente para a GD que se enquadre na seguinte classificação:

[...] I - **microgeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme

regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - **minigeração distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras[...]

A implantação do sistema *Net Metering* introduziu uma nova forma de relacionamento entre distribuidora e consumidores de energia, uma vez que o consumidor pode realizar o papel de um agente gerador nos momentos em que houver excesso de geração de sua GD.

O problema é que os sistemas de distribuição foram projetados para operarem de forma radial desconsiderando a conexão de GD. Com isso, a conexão de pequenas fontes renováveis de GD podem causar impactos significativos sobre o sistema, principalmente na região onde a mesma está instalada. O impacto pode ter características positivas e extremamente benéficas ao sistema, tais como suporte de tensão, melhora dos índices de continuidade do serviço, etc. Entretanto, em se tratando de aspectos negativos, uma ou várias fontes renováveis de GD podem causar diversas perturbações nos sistemas de distribuição, tais como: problemas de regulação de tensão, fluxo reverso de energia, aumento das perdas, entre outros. Portanto, as distribuidoras precisam ter o controle e o gerenciamento absoluto dos seus sistemas de distribuição, principalmente quando há conexão de GD, pois é de sua responsabilidade manter os índices de qualidade do fornecimento de energia, dentro de limites estabelecidos pelo agente regulador. Para isto, a Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST exige que devam ser celebrados contratos de “Relacionamento Operacional” entre distribuidora e GD classificada como microgeração distribuída, ou um “Acordo Operacional” entre distribuidora e minigeração distribuída.

Tanto o Relacionamento Operacional quanto o Acordo Operativo definem as atribuições, responsabilidades e procedimentos necessários ao relacionamento técnico operacional entre distribuidora e acessante. Tais acordos exigem que as GD não prejudiquem o desempenho do sistema elétrico ou comprometam os índices de qualidade do fornecimento de energia aos consumidores, especificados no Módulo 8 – PRODIST. Caso estes índices sejam prejudicados, a distribuidora poderá efetuar a desconexão de unidades consumidoras com GD, desde que seja constatada a sua interferência de forma prejudicial ao funcionamento do sistema elétrico (ANEEL, 2010b). Estes acordos também não preveem valores de potência gerada, e conseqüentemente, de energia injetada por cada GD. Logo, as distribuidoras não possuem

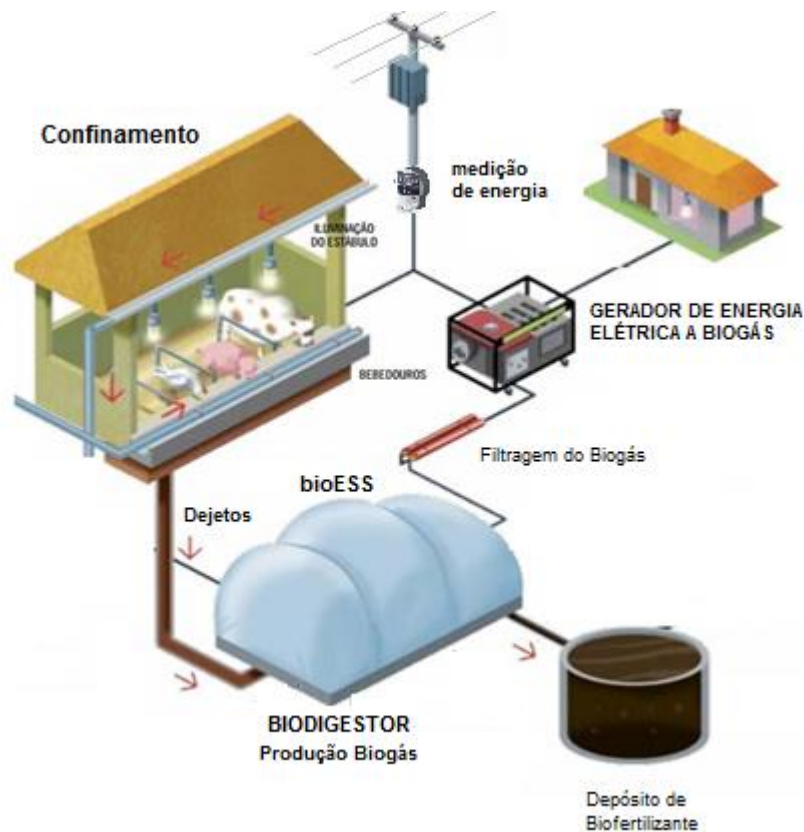
conhecimento da quantidade de energia que está sendo injetada em suas redes durante a operação das mesmas, pois não há o monitoramento das conexões das miniGD e microGD pelo centro de operação da distribuidora. A aquisição dos dados relativos aos níveis de potência e quantidade de energia injetada, só são conhecidos pela distribuidora ao final do ciclo de faturamento (30 dias), quando ocorre a leitura dos dados obtidos dos medidores bidirecionais instalados nos pontos de conexão das unidades consumidoras.

Devido às características de geração intermitente da maioria das fontes renováveis de GD, somente os acordos operativos não são suficiente para evitar os impactos negativos, uma vez que a desconexão de uma GD pela distribuidora só poderá ocorrer após comprovada a perturbação que a mesma está causando, o que não ocorre durante a operação da rede. Desta forma, os armazenadores de energia podem realizar um papel fundamental para minimizar estes impactos realizando o equilíbrio geração x carga, conforme pesquisas apresentadas no Capítulo 2. Logo os bioESS permitem que sejam estabelecidos de forma prévia regimes operacionais para GD a biogás, possibilitando que a distribuidora possa planejar o uso desta energia para que não ocorram impactos negativos no sistema de distribuição.

### **3.4.2 Fundamentos do Regime Operacional de GD a biogás**

Uma GD a biogás a partir da biodigestão de dejetos de animais deve ser composta por um biodigestor, bioESS, sistema de filtragem do biogás (dessulfurização), grupo gerador de energia elétrica e outros equipamentos, além dos animais que são os responsáveis pela produção dos dejetos. O arranjo técnico dos equipamentos básicos que compõe uma planta de GD a biogás com bioESS é apresentada na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Planta de uma GD a Biogás.



Fonte: Próprio Autor.

Os parâmetros de operação de uma GD, tais como, potência gerada, tempo de operação e a forma que está distribuído este tempo de operação (contínuo ou em intervalos) definem o regime operacional da GD.

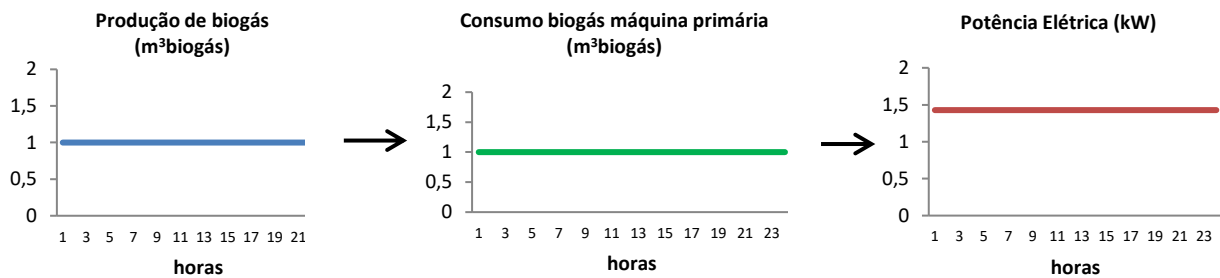
Para determinar um regime operacional de uma GD a biogás, não basta somente saber qual será a produção diária de biogás e, conseqüentemente a sua conversão em a energia elétrica. É preciso considerar outros fatores que influenciam na definição do regime, tais como:

- Potência elétrica que se quer gerar;
- Produção diária de biogás;
- Volume de biogás armazenado;
- Tempo de operação da GD;
- Intervalos de operação da GD;
- Períodos do dia em que haverá geração.

Para determinar a potência elétrica de uma GD a biogás, normalmente, utiliza-se a Equação 3.1. Porém, o valor obtido representa uma potência média de geração para um período de 24 horas/dia.

Para este método, obtém-se um regime operacional para GD de potência constante durante 24 horas. Neste caso, a produção diária de biogás é convertida em energia elétrica ao longo de 24 horas, uma vez que o perfil da curva de produção de biogás é igual ao perfil da curva de potência elétrica da GD e, conseqüentemente, ao perfil da curva de consumo de biogás da máquina primária da GD. A Figura 3.19 apresenta as curvas de produção de biogás, consumo de biogás da máquina primária e potência elétrica da GD, para o regime operacional determinado pela Equação 3.1.

Figura 3.19 – Curvas de Produção de Biogás, Consumo de Biogás da Máquina Primária e Geração de Energia Elétrica da GD a Biogás.



Fonte: Próprio Autor.

No que se refere aos casos em que se queira um regime operacional diferente, é possível modificar a Equação 3.1 para obter uma curva de geração da GD para qualquer tempo de operação, se diferenciando da curva de produção de biogás. Todavia, é necessário considerar o tempo de operação da GD na Equação 3.1., conforme apresentado na Equação 3.3

$$P_e = \frac{PB \cdot PCI \cdot \eta \cdot 4,1868}{3600 \cdot T_{op.}} \quad (3.3)$$

onde:

$P_e$  = Potência de geração de energia elétrica (kW);

$PCI$  = Poder calorífico do biogás 5500 kcal/m<sup>3</sup>biogás (ICLEI, 2009; PECORA, 2008);

$PB$  = Produção diária de biogás (m<sup>3</sup>biogás/dia);

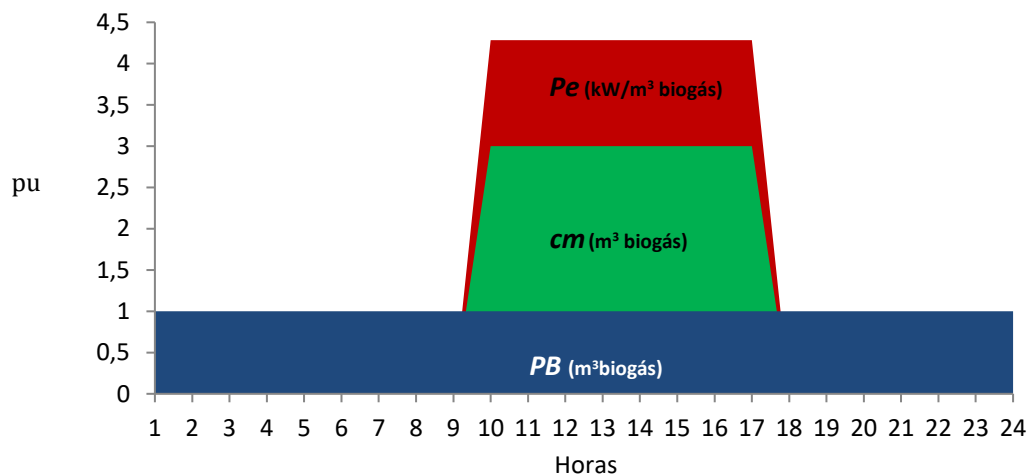
$\eta$  = Rendimento grupo gerador de energia elétrica;

$T_{op}$  = Tempo de operação da GD (horas);

4,1868 = fator de conversão de kcal para kJ.

Neste método de determinação do regime operacional, o tempo de operação da GD influencia diretamente a determinação da potência a ser gerada, uma vez que para uma mesma quantidade de energia gerada ao longo de um dia, quanto menor for o tempo de operação, maior deve ser a potência de geração e, conseqüentemente, maior será o consumo de biogás pela máquina primária ( $cm$ ). A Figura 3.20 apresenta uma produção diária de biogás, o consumo de biogás pela máquina primária e a potência gerada pela GD para um tempo de operação da GD de 8 horas.

Figura 3.20 – Geração de energia elétrica da GD a biogás com perfil diferente da curva de produção de biogás



Fonte: Próprio Autor.

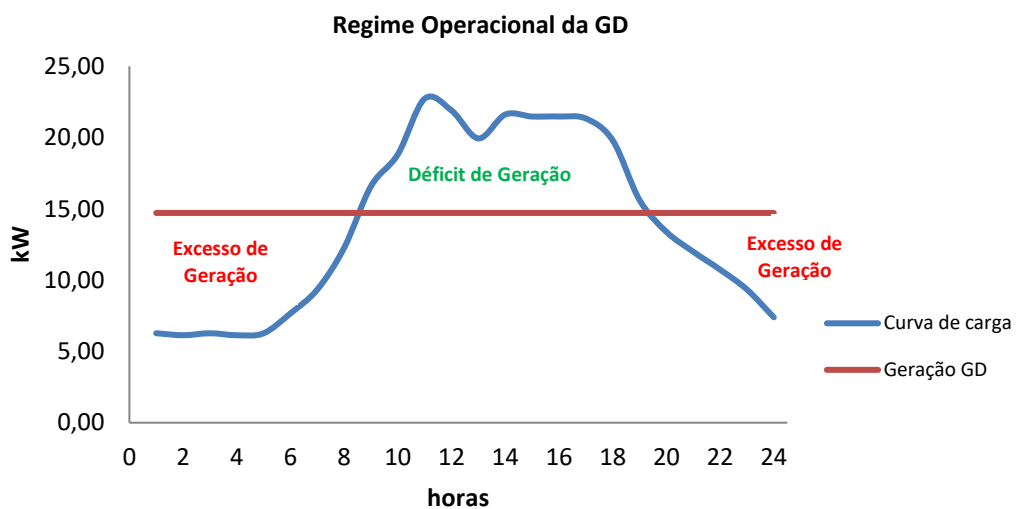
Portanto, neste caso, a produção de biogás não será suficiente para suprir diretamente o consumo da máquina primária, ou seja, haverá um déficit entre produção de biogás e consumo da máquina primária nos períodos em que a GD estiver operando. Logo, faz-se necessário o uso do bioESS para armazenar biogás nos períodos em que não houver geração de energia elétrica pela GD. Desta forma, este biogás armazenado somado com a produção de biogás nos períodos em que a GD estiver operando, será suficiente para suprir o consumo da máquina primária nos períodos de operação da GD.



### 3.4.3 Curva de Geração da GD à Biogás x Curva de Carga da Propriedade Produtora de Biogás

Pode-se verificar que os dois regimes operacionais abordados consistem em uma geração com potência contínua (*flat*), seja durante 24 horas/dia, ou durante um  $T_{op}$  determinado, sem se adequar a curva de carga da unidade consumidora onde estará instalada a GD. Isto poderá causar déficit ou excesso de energia produzida ao longo do dia para atendimento das cargas, conforme o exemplo apresentado na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Curva de Geração da GD x Curva de Carga da Propriedade



Fonte: Próprio Autor.

Esta característica de déficit ou excesso de energia produzida normalmente ocorre em unidades consumidoras com qualquer tipo de fonte renovável de GD, e que participam do sistema *net metering* no Brasil. Neste modelo ocorre fluxo bidirecional de energia elétrica no ponto de conexão da unidade consumidora na rede de distribuição, sem controle por parte da distribuidora da potência injetada.

Caso adotado um regime operacional para a GD a biogás sem controle da relação geração da GD x curva de carga da propriedade, a conexão deste tipo de fonte na rede de distribuição terá o mesmo comportamento das outras fontes alternativas, como, por exemplo, GD fotovoltaica e GD eólica, instaladas em unidades consumidoras.

Os sistemas de geração de energia elétrica que utilizam o biogás se diferenciam das demais fontes renováveis de geração de energia elétrica devido à possibilidade do armazenamento da energia em forma de biogás antes da sua conversão em energia elétrica. Isto

possibilita que seu uso pode ser gerenciado de forma a minimizar os fluxos bidirecionais de energia no ponto de conexão da GD, evitando assim os possíveis problemas causados pela falta de controle da conexão das GD nas redes de distribuição.

Esta Tese trata do desenvolvimento de uma metodologia para o projeto e operação de sistemas de armazenamento de energia a biogás com objetivo de determinar regimes operacionais multi patamares para geração distribuída, onde a GD deve priorizar o atendimento da curva de carga da propriedade produtora de animais, e uso do biogás remanescente é otimizado para se obter a máxima potência que pode ser reservada para a distribuidora e os períodos de disponibilidade. Com isso a metodologia propõe a ideia de um gerenciamento estratégico do armazenamento e despacho da energia que pode ser produzida a partir do biogás, e assim evitar que excedentes de geração sejam injetados na rede de distribuição em momentos sem consentimento da distribuidora.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma revisão sobre a participação do biogás na geração de energia elétrica mundial e no Brasil, além do potencial brasileiro de produção de biogás a partir de dejetos de animais. Foram revisadas as características do biogás, forma de produção e as características dos sistemas de armazenamento de energia a biogás - bioESS. O conceito de geração distribuída, os fundamentos dos regimes operacionais para fontes de GD a biogás e os fatores que podem influenciar neste tipo de regime, foram abordados neste capítulo. Por fim, discutiu-se a relação entre a curva de carga da propriedade produtora de animais, a curva de geração energia elétrica pelo método tradicional de determinação do regime operacional da GD, e também o potencial de gerenciamento deste tipo de fonte devido ao armazenamento do biogás.

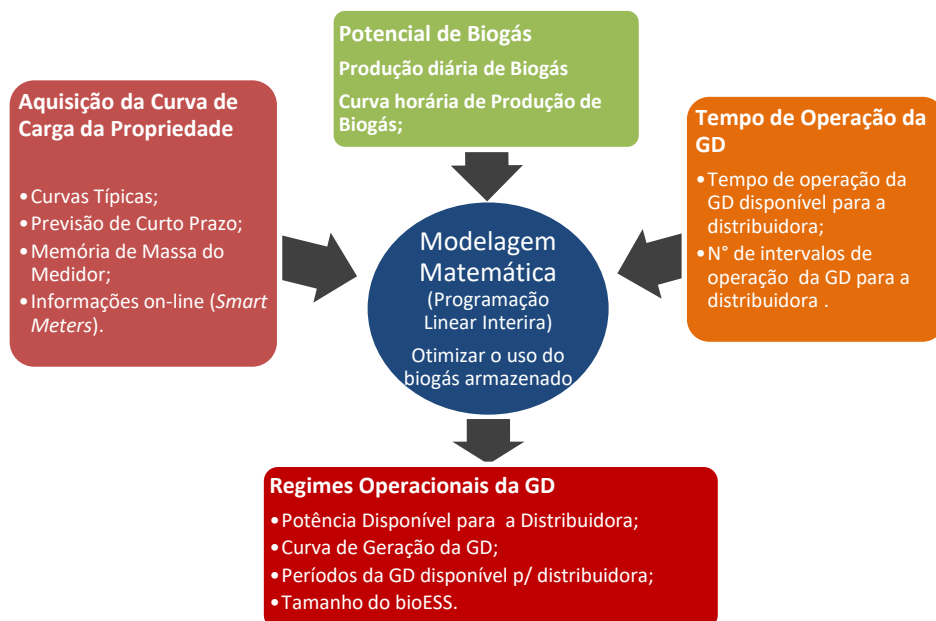
## 4 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia propõe uma forma inovadora de gerenciamento estratégico do armazenamento e despacho da energia que pode ser produzida a partir do biogás oriundo de dejetos de animais. Para isso, foram estabelecidas as bases a partir das quais um sistema de bioESS com GD pode operar e, utilizando a PLI, desenvolveu-se uma função objetivo para otimizar o uso do biogás armazenado, considerando como parâmetros a curva de produção de biogás e o atendimento total ou parcial da curva de carga da propriedade produtora dos animais.

As restrições da função objetivo foram determinadas em função das características operacionais de gerenciamento do bioESS, como: estoque mínimo, máximo e inicial de biogás e o consumo de biogás da máquina primária entre outros.

Como resultado da otimização se obtém um regime operacional multi patamar (ROM) para GD, no qual são indicadas a máxima potência que pode ser reservada e as opções de períodos em que a distribuidora de energia pode ter garantida a utilização da energia armazenada no bioESS. Além disso, o método também indica o tamanho do bioESS a ser utilizado, se adotado de forma permanente um ROM obtido pelo método. A Figura 4.1 apresenta um diagrama com a estruturação do método proposto nesta Tese.

Figura 4.1 - Estruturação do Método de Otimização para Sistemas de Armazenamento de Energia a Biogás.



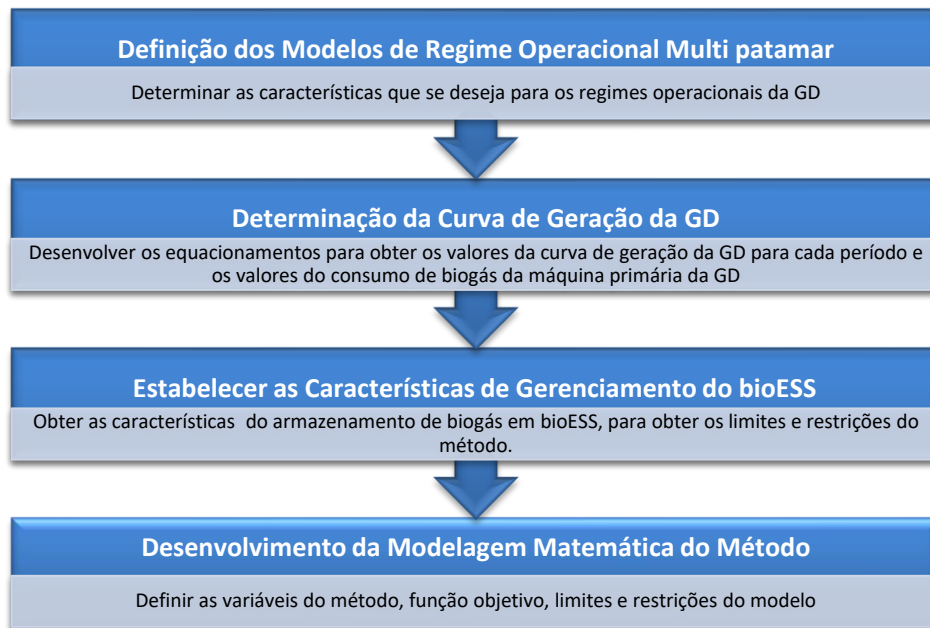
Fonte: Próprio Autor.

O método proposto por esta Tese foi concebido para estar inserido em um cenário com as seguintes premissas:

- 1º A operação da rede de distribuição deve ocorrer em um ambiente de redes elétricas inteligentes (*Smart Grid*), possibilitando o que centro de operação da distribuidora (COD) monitore e opere os equipamentos instalados na rede, assim como a conexão e despacho da GD. Desta forma a distribuidora pode utilizar, se julgar necessário, a energia armazenada como biogás e reservada pelo produtor para a distribuidora, uma vez conhecido o valor da potência elétrica e os períodos estabelecidos pela metodologia.
- 2º Considerando que a metodologia prevê que a GD atenda prioritariamente a propriedade produtora de biogás, para que o produtor possa se comprometer a disponibilizar uma parcela da potencializada GD nos períodos estabelecidos pela metodologia, o mesmo deverá respeitar os valores da curva de carga da propriedade utilizados para obtenção do ROM da GD, sob pena de não conseguir atender a distribuidora com a potência que disponibilizou. Para isto, o produtor deverá gerenciar o seu consumo, realizando corte de carga se necessário, e com isso garantir os valores da curva de carga da propriedade utilizados nesta metodologia.
- 3º A comercialização da energia elétrica deve ocorrer através de um contrato que remunere a GD pela potência disponibilizada nos períodos estabelecidos, e também pela energia efetivamente despachada, tendo em vista que a distribuidora só utilizará esta energia se julgar necessário.

Estabelecidas às premissas do cenário em que poderá estar inserido o bioESS com GD, a metodologia foi desenvolvida através das etapas apresentadas na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Etapas para o Desenvolvimento do Método.



Fonte: Próprio Autor

#### 4.1 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE REGIMES OPERACIONAIS MULTI PATAMAR PARA GD A BIOGÁS

Para realizar a modelagem matemática da metodologia proposta nesta Tese, faz-se necessário determinar as características que se deseja para os regimes operacionais da GD. Portanto foram propostos dois modelos de regimes operacionais para GD:

- **Modelo 1 de Regime Operacional Multi patamar para GD:** GD operando menos de 24h/dia, atendendo simultaneamente a propriedade e a distribuidora;
- **Modelo 2 de Regime Operacional Multi patamar para GD:** GD atendendo a propriedade durante 24h/dia e a distribuidora somente em alguns períodos.

Os modelos de ROM propostos possuem as seguintes características:

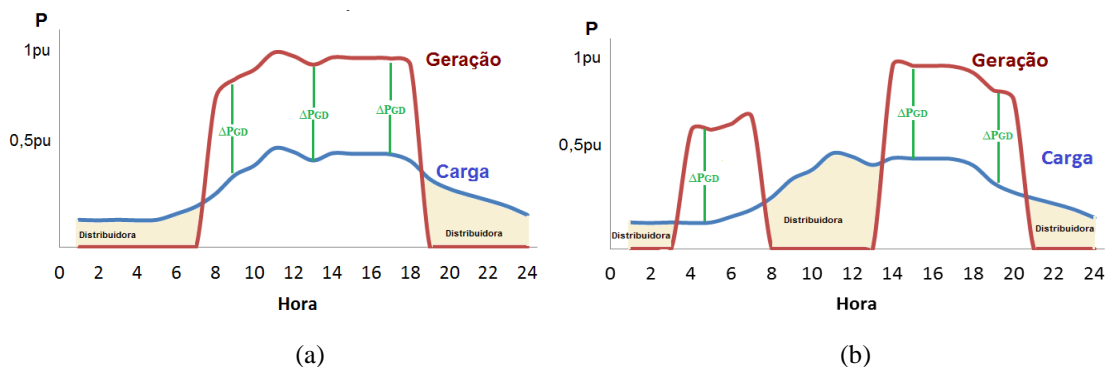
- 1° - Priorizar o atendimento de toda, ou parte, da curva de carga da propriedade produtora de biogás;
- 2°- Disponibilizar um valor de potência constante (com estoque de biogás armazenado) para que a distribuidora de energia elétrica utilize, caso seja necessário, de acordo com

o número de intervalos de operação da GD para a distribuidora e períodos do dia obtidos pelo método.

#### 4.1.1 Modelo 1 de Regime Operacional Multi patamar para GD

Este regime operacional consiste em a GD possuir um tempo de operação menor que 24h/dia, seja este dividido em 1, 2, 3 ou mais intervalos de operação. Neste modelo a GD atende a curva de carga da propriedade e, simultaneamente, possui a capacidade de despachar um valor de potência constante para a distribuidora, de acordo com o potencial de geração excedente determinado pelo biogás armazenado. A Figura 4.3 (a) e (b) apresenta o Modelo 1 de Regime Operacional Multi patamar com 1 e 2 intervalos de operação respectivamente.

Figura 4.3 - Modelo 1 de Regime Operacional Multi patamar para GD.



Fonte: Próprio Autor

Neste caso, nos períodos do dia em que a GD não estiver acionada, a energia elétrica necessária para suprir as cargas da propriedade produtora de animais será fornecida pela distribuidora de energia local.

Já nos períodos de funcionamento da GD, a potência gerada deve ser tal que atenda a curva de carga da propriedade produtora de biogás e ainda tenha capacidade de, simultaneamente, gerar um valor de potência constante que pode ser disponibilizada para a distribuidora durante o seu tempo de operação.

Conforme as curvas apresentadas na Figura 4.3, a potência total gerada será a soma da potência variável para atendimento da propriedade, com uma potência constante ( $\Delta PGD$ ) que poderá ser disponibilizada para a distribuidora.

Sendo assim, pode-se considerar para este modelo de ROM, que o tempo de operação da GD seja igual ao tempo de operação em que a GD atenderá à propriedade, e ao tempo de operação em que a GD estará disponível para a distribuidora, conforme segue:

$$T_{op} = TP_{op} = TD_{op}$$

onde:

$T_{op}$  = Tempo de operação da GD;

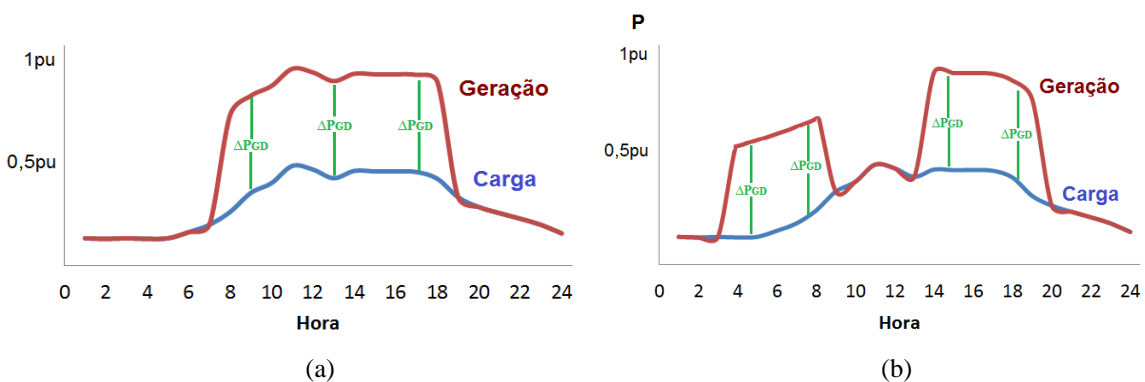
$TP_{op}$  = Tempo de operação da GD para atendimento das cargas da propriedade;

$TD_{op}$  = Tempo de operação da GD disponível para a distribuidora.

#### 4.1.2 Modelo 2 de Regime Operacional Multi patamar da GD

O Modelo 2 de regime operacional consiste em a GD ter um tempo de operação igual a 24 h/dia de forma a atender a curva de carga da propriedade durante todo este período, e ter a capacidade de disponibilizar para a distribuidora um valor de potência constante somente em determinados períodos. A Figura 4.4 (a) e (b) apresentam o Modelo 2 de ROM com 1 e 2 intervalos de operação respectivamente.

Figura 4.4 - Modelo 2 de Regime Operacional Multi patamar para GD.



Fonte: Próprio Autor

Neste caso, a produção de biogás e o biogás armazenado no bioESS será utilizado pela GD para atender prioritariamente a curva de carga da propriedade durante 24h/dia, podendo torná-la autossuficiente em abastecimento de energia elétrica, e a energia referente ao estoque de biogás resultante, poderá ser disponibilizado para a distribuidora.

Portanto, a potência gerada pela GD deve ser tal que atenda a curva de carga da propriedade e ainda tenha capacidade de, simultaneamente, gerar um valor de potência constante ( $\Delta PGD$ ) somente durante o tempo de operação da GD disponível para a distribuidora.

Conforme as curvas apresentadas na Figura 4.4, a potência de geração da GD poderá ser gerada para atender a curva de carga da propriedade, somada com o valor de potência constante ( $\Delta PGD$ ), que poderá ser reservado para a distribuidora durante  $TD_{op}$ . Sendo assim, para este modelo de regime operacional, o tempo de operação que a GD estará disponível para fornecer energia para a distribuidora será menor que tempo de operação da GD, conforme segue:

$$TD_{op} < T_{op}$$

Estabelecidas às características dos modelos de regimes operacionais multi patamar que servem de base para o desenvolvimento do método proposto, faz-se necessário determinar como obter os valores da curva de geração da GD em cada período.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE GERAÇÃO DA GD

De acordo com o Modelo 1 e Modelo 2 de ROM apresentados, a potência a ser gerada pela GD em cada período poderá ser a potência necessária para atender as cargas da propriedade produtora de biogás somada com a potência disponibilizada para a distribuidora, conforme estabelecido pela Equação 4.1.

$$PGD = PGDP + \Delta PGD \quad (4.1)$$

onde:

$PGD$  = Potência de geração da GD;

$PGDP$  = Potência da GD para atender a carga da propriedade;

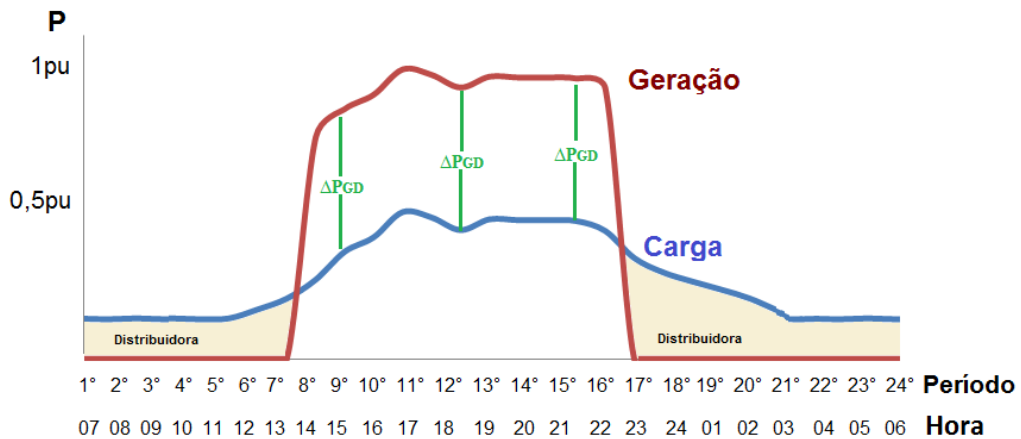
$\Delta PGD$  = Potência constante da GD disponibilizada para a distribuidora.

Por se tratar de um regime operacional multi patamar para GD a biogás, no qual se pretende obter a curva de geração diária, o ROM será estabelecido para intervalos a cada 24 horas, denominado nesta Tese de “conjunto de períodos de planejamento da GD”, dividido hora



a hora, totalizando 24 períodos. Isto não significa que os períodos coincidam exatamente com as horas do dia. O método proposto possibilita que o 1º período possa ser qualquer hora. Para isso, é necessário que os valores informados, tanto da curva de produção de biogás quanto da curva de carga da propriedade, sejam ajustados de forma que o valor do 1º período coincida com a hora em que se deseja começar a contar o intervalo de 24 horas, conforme apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Períodos x horas da Curva de Geração da GD.



Fonte: Próprio Autor

Por se tratar de um ROM diário, considerou-se que o número máximo de períodos disponíveis para o regime operacional  $NP = 24$ , para um conjunto de períodos de planejamento  $C_{pp} = \{ 1, \dots, NP \}$ .

onde:

$NP$  = Número máximo de períodos disponíveis para o regime operacional;

$C_{pp}$  = Conjunto de períodos de planejamento da GD.

Portanto, os valores de potência da curva de geração da GD em cada período podem ser obtidos através da Equação 4.2.

$$PGD_j = PGDP_j + \Delta PGD, \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.2)$$

onde:

$PGD_j$  = Potência de geração da GD por período,  $\forall j \in C_{pp}$ ;

$PGDP_j$  = Potência da GD para atender a carga da propriedade por período,  $\forall j \in Cpp$ ;

$\Delta PGD$  = Potência constante da GD disponibilizada para a distribuidora.

A produção de energia elétrica de uma GD a biogás depende do tipo de grupo gerador utilizado (síncrono ou assíncrono) e da máquina primária acoplada a este (normalmente motor ciclo Otto adaptado para biogás). A máquina primária terá um consumo de biogás diretamente proporcional a potência elétrica que se deseja produzir, ou seja:

$$cm \propto PGD$$

onde:

$cm$  = Consumo de biogás da máquina primária ( $m^3$ biogás).

O consumo de biogás da máquina primária do grupo gerador pode ser definido pela quantidade de biogás necessária para gerar energia elétrica para atendimento da curva de carga da propriedade ( $CP$ ), somado com a quantidade de biogás necessária para produzir a potência elétrica constante possível de ser disponibilizada para a distribuidora ( $cd$ ). Logo se pode dividir o consumo de biogás da máquina primária em duas parcelas, conforme a Equação 4.3.

$$cm_j = CP_j + cd, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.3)$$

onde:

$CP_j$  = Consumo de biogás da máquina primária para atendimento das cargas da propriedade por período,  $\forall j \in Cpp$  ( $m^3$ biogás);

$cm_j$  = Consumo de biogás da máquina primária por período,  $\forall j \in Cpp$  ( $m^3$ biogás);

$cd$  = Consumo de biogás da máquina primária para produzir a potência elétrica constante disponibilizada para a distribuidora ( $m^3$ biogás).

O  $CP_j$  pode ser determinado através da Equação 4.4.

$$CP_j = \frac{PP_j \cdot 3600}{PCI \cdot \eta \cdot 4,1868}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.4)$$

onde:

$PP_j$  = Potência da curva de carga da propriedade por período (kW);

$PCI$  = Poder calorífico do biogás 5500 kcal/m<sup>3</sup>biogás (ICLEI, 2009; PECORA, 2008);

$\eta$  = Rendimento grupo gerador de energia elétrica.

Definidas as parcelas que compõem o consumo de biogás da MP, faz-se necessário determinar a quantidade de biogás para atender a solicitação da máquina primária para produzir a potência elétrica que se deseja. Para tanto, as características de gerenciamento do sistema de armazenamento de energia a biogás (bioESS), tais como seus limites de armazenamento e restrições físicas devem ser observados.

#### 4.3 CARACTERÍSTICAS DE GERENCIAMENTO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A BIOGÁS

Os bioESS são os armazenadores de biogás os quais são denominados de câmaras de biogás ou gasômetros. Estes podem ter diversos formatos e podem estar juntos aos biodigestores anaeróbios ou separados. Independente do formato, se está junto ou separado dos biodigestores anaeróbios, o gasômetro infla ou desinfla como um balão conforme a produção do biogás e o consumo de biogás da máquina primária do grupo gerador de energia elétrica. Logo, sua operação se dará dentre um valores máximo e mínimo de armazenamento, ou seja, estoque máximo ( $E_{m\acute{a}x}$ ) e estoque mínimo de biogás ( $E_{m\acute{m}n}$ ).

O  $E_{m\acute{a}x}$  é o volume máximo efetivo de armazenagem do biogás que se deseja, o qual pode ser definido em função da produção de biogás, número de períodos de armazenamento, consumo de biogás pela máquina primária, e pressão de operação do bioESS (normalmente milímetros de mca). A pressão de operação é mantida através de uma válvula de regulação de pressão e uma válvula de segurança de sobrepressão e de supressão, que atua como proteção contra a pressão excessiva de biogás. O  $E_{m\acute{a}x}$  é garantido através do uso de um queimador denominado *flare*, o qual é responsável pela queima do excesso de biogás produzido e que não pode ser armazenado nos momentos em que o gasômetro já atingiu sua capacidade máxima de armazenamento para uma dada pressão de operação.

Nos modelos de ROM propostos, uma parcela de biogás armazenado ficará disponível para produção da potência elétrica destinada para o uso da distribuidora. Logo, a produção diária de biogás será totalmente consumida se a GD atender a curva de carga da propriedade e a distribuidora utilizar o biogás reservado para seu uso. Caso a distribuidora não necessite do

uso desta energia, ou haja, por exemplo, uma parada para manutenção da GD, uma vez que a produção de biogás é contínua, o estoque de biogás armazenado no bioESS aumentará podendo ocorrer um excesso de biogás a ser armazenado. Logo o *flare* entrará em operação mantendo o  $E_{máx}$  do bioESS.

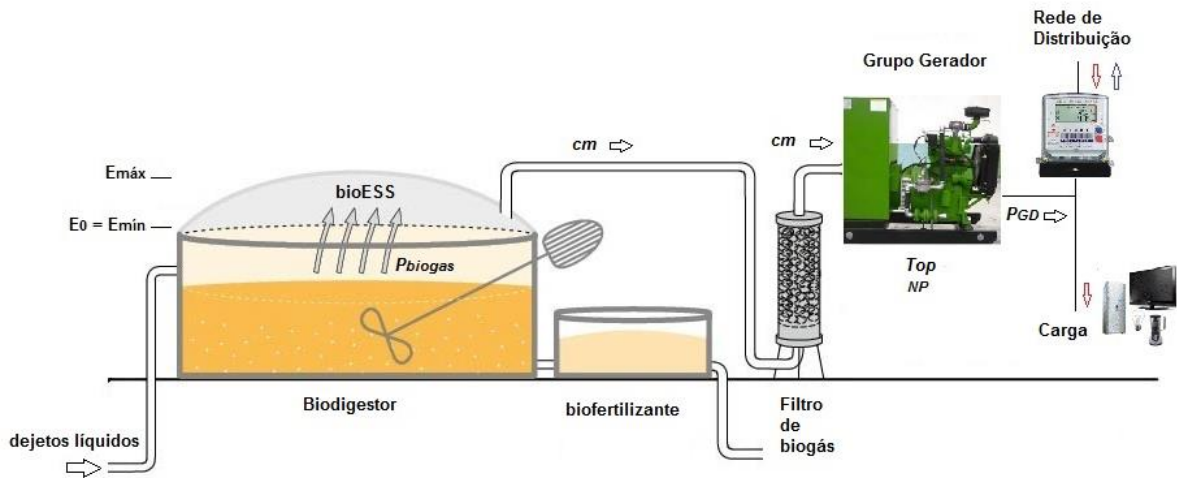
Já o estoque mínimo ( $E_{mín}$ ) é definido em função do volume mínimo de armazenamento de biogás necessário para manter a pressão de operação do bioESS, evitando assim o seu esvaziamento completo. Portanto, este volume armazenado deve ser tal que evite, por exemplo, que o acúmulo de água da chuva sobre a membrana flexível de alguns tipos de bioESS dificulte a expansão da membrana, o que causaria conseqüentemente, a redução do volume de armazenamento para uma mesma pressão de operação. Este estoque mínimo deve ser adotado como o volume mínimo de biogás armazenado que deve remanescer no bioESS ao final de cada período, considerando a produção de biogás e o consumo de biogás pela máquina primária, ou seja, o bioESS não deve ter um estoque de biogás menor que o  $E_{mín}$  durante sua operação.

O estoque inicial de biogás no bioESS ( $E_0$ ) para iniciar a geração de energia elétrica pela GD, (podendo também ser chamado de *set point* do bioESS) é definido como o estoque de biogás que deve haver no bioESS para iniciar a geração. O  $E_0$  pode ser qualquer valor entre  $E_{máx}$  e  $E_{mín}$ . Portanto, o estoque de biogás armazenado em um bioESS, em qualquer período do dia, pode ser determinado pelos seguintes fatores:

- Produção horária de biogás ( $PBh_j$ );
- Número máximo de períodos disponíveis para o regime operacional ( $NP$ );
- Estoque inicial de biogás ou *set point* do bioESS ( $E_0$ );
- Estoque máximo de biogás ( $E_{máx}$ );
- Estoque mínimo de biogás ( $E_{mín}$ );
- Consumo de biogás da máquina primária ( $cm_j$ );
- Tempo de operação da GD ( $T_{op}$ ).

A Figura 4.6 apresenta o arranjo técnico de um sistema de armazenamento de energia a biogás com GD e os fatores que influenciam na determinação do estoque de biogás.

Figura 4.6 - bioESS com GD e fatores que influenciam no seu gerenciamento.



Fonte: Próprio Autor.

Em se tratando de produção de biogás, é necessário obter-se a curva diária de produção de biogás, Sendo assim, a produção horária de biogás pode ser determinada pela produção diária de biogás vezes a taxa de produção horária, como mostra a Equação 4.5.

$$PBh_j = PB \cdot T_{prod/h(j)}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.5)$$

onde:

$PBh_j$  = Produção horária de biogás por período ( $m^3$ biogás/hora);

$PB$  = Produção diária de biogás ( $m^3$ biogá/dia);

$T_{prod/h(j)}$  = Taxa de Produção horária (%);

A curva de produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos de animais ao longo de um dia é considerada constante (KUNZ; OLIVEIRA, 2006). Logo a taxa de produção horária de biogás pode ser definida de acordo com a Equação 4.6:

$$T_{prod/h(j)} = \frac{1}{24} = 0,04166 = 4,16\%, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.6)$$

O estoque de biogás armazenado em um bioESS em um período qualquer, pode ser calculado de acordo com a Equação 4.7:

$$e_j = E_0 + \sum_{j=1}^{NP} \{PBh_j - cm_j\}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.7)$$

onde:

$e_j$  = Estoque de biogás em um determinado período (m<sup>3</sup>biogás)

$E_0$  = Estoque inicial de biogás ou *set point* do bioESS (m<sup>3</sup>biogás);

$PBh_j$  = Produção horária de biogás por período (m<sup>3</sup>biogás);

$cm_j$  = Consumo de biogás da máquina primária por período (m<sup>3</sup>biogás).

Também é possível determinar o estoque de biogás armazenado que restará no bioESS, ao final de um período qualquer, se for conhecido o estoque existente no período anterior, e se houve ou não neste período produção de biogás e consumo pela máquina primária da GD. Sendo assim, o estoque de biogás do bioESS em um período qualquer pode ser calculado pela Equação 4.8.

$$e_j = e_{j-1} + PBh_j - cm_j, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.8)$$

onde:

$e_j$  = Estoque de biogás em um determinado período (m<sup>3</sup>biogás);

$e_{j-1}$  = Estoque de biogás no período anterior (m<sup>3</sup>biogás);

$PBh_j$  = Produção horária de biogás por período (m<sup>3</sup>biogás);

$cm_j$  = Consumo de biogás da máquina primária por período (m<sup>3</sup>biogás)

Em termos de balanço de energia a Equação 4.8 pode ser descrita conforme apresentada na Equação 4.9.

$$e_{j-1} + PBh_j = e_j + cm_j, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.9)$$

De acordo com as características apresentadas do gerenciamento dos sistemas de armazenamento da energia a biogás, puderam-se obter dois limites para a Equação 4.8.

1º.  $e_j$  pode ser no máximo igual à  $E_{máx}$  em qualquer período;

2°.  $e_j$  pode ser no mínimo igual à  $E_{mín}$ , ou seja, o consumo da máquina primária no final de cada período do  $T_{op}$  pode ser tal, que somados o  $e_{j-1}$  com a  $PBh_j$ , deve restar no bioESS no pior caso o  $E_{mín}$ , logo:

$$E_{mín} \leq e_j \leq E_{máx}$$

A potência gerada pela GD a biogás é proporcional ao consumo da máquina primária do grupo gerador, e este poderá assumir (por período do  $T_{op}$ ) um valor máximo que resulte no final de cada período em um estoque de biogás maior ou igual ao estoque  $E_{mín}$  do bioESS, ou seja  $e_j \geq E_{mín}$ , conforme Equação 4.10.

$$E_{mín} \leq e_{j-1} + PBh_j - cm_j, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.10)$$

Como:

$$cm_j = CP_j + cd$$

Logo:

$$E_{min.} \leq e_{j-1} + PBh_j - (CP_j + cd), \quad \forall j \in Cpp \quad (4.11)$$

O método proposto nesta tese tem como um dos objetivos determinar um ROM diário para GD a biogás, ou seja, devem ser consideradas as características de produção e consumo de biogás pela máquina primária para um conjunto de períodos de planejamento de 24 períodos. Portanto é preciso estabelecer que as condições iniciais do regime sejam as mesmas a cada intervalo de 24 períodos. Para que isso seja possível é necessário atender a condição da Equação 4.12:

$$e_f = e_{j=24} = E_0 \quad (4.12)$$

onde:

$e_f$  = Estoque final de biogás para  $j = NP$  (m<sup>3</sup>biogás);

$E_0$  = Estoque inicial de biogás ou *set point* do bioESS (m<sup>3</sup>biogás).

Como  $e_j \geq E_{\min}$  é uma restrição de gerenciamento do bioESS, para o desenvolvimento do método proposto adotou-se a seguinte condição:

$$e_f = e_{j=24} = E_0 = E_{\min} \quad (4.13)$$

Esta restrição auxilia o método para ajustar o estoque de biogás no último período do dia atual ( $j = 24$ ), para que seja igual ao estoque inicial  $E_0$  no próximo dia. Além disso, esta restrição possibilita que o processo se inicie com o bioESS estando com o estoque mínimo.

Portanto, com base nos limites e restrições do gerenciamento do bioESS, consideram-se que sejam conhecidos:

- O valor do estoque inicial do bioESS ( $E_0$ );
- A produção horária de biogás ( $PBh_j$ );
- O consumo de biogás da máquina primária para atendimento das cargas da propriedade ( $CP_j$ ), e;
- O estoque mínimo que pode restar no bioESS no final de cada período ( $E_{\min}$ ).

Faz-se necessário determinar qual pode ser o valor máximo a ser assumido para  $cd_j$  de forma que este seja um valor constante durante o  $TD_{op}$ , e que o  $e_j$  seja maior ou igual à  $E_{\min}$ , em todos períodos do  $C_{pp}$ . Portanto, de acordo com as características apresentadas, trata-se de um problema de otimização, no qual é necessário maximizar o valor de  $cd$  para se obter  $\Delta PGD$  e os períodos de sua disponibilidade.

#### 4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO APLICADO A SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A BIOGÁS

No método apresentado nesta Tese, para obter o ROM da GD é preciso determinar qual poderá ser o valor máximo que o  $cd$  pode assumir, e conseqüentemente determinar o valor de  $\Delta PGD$ .

Para exemplificar as dificuldades encontradas para isto, considerou-se um exemplo no qual se quer determinar o valor do  $cd$  e o período que pode iniciar o ROM para uma GD com um  $TD_{op} = 9h$ , e com as seguintes condições:

- $E_{\min} = 15 \text{ m}^3 \text{ biogás}$ ;



- $E_0 = 15 \text{ m}^3$  biogás;
- $PBh_j = 21 \text{ m}^3$  biogás,  $\forall j \in Cpp$ ;
- Curva de carga genérica da propriedade produtora de biogás;
- Modelo 2 de ROM para GD com 1 intervalo de operação.

As Tabelas 4.1 (a) e (b) apresentam alguns resultados para exemplificar a necessidade da aplicação de uma metodologia para determinação tanto do valor do  $cd$ , quanto do período em que deve começar o  $TD_{op}$ .

Tabela 4.1– Resultados do estoque de biogás considerando Modelo 2 de ROM para GD com 1 intervalo de operação da GD para a distribuidora.

(a)					(b)				
Hora	$PBh_j$	$CP_j$	$cd$	$e_j$	Hora	$PBh_j$	$CP_j$	$cd$	$e_j$
<b><math>E_0 = 15</math></b>					<b><math>E_0 = 15</math></b>				
1	21,00	3,14		32,86	1	21,00	3,14		32,86
2	21,00	3,07		50,79	2	21,00	3,07		50,79
3	21,00	3,14		68,66	3	21,00	3,14		68,66
4	21,00	3,07		86,59	4	21,00	3,07		86,59
5	21,00	3,14		104,45	5	21,00	3,14		104,45
6	21,00	3,83		121,62	6	21,00	3,83		121,62
7	21,00	4,67		137,95	7	21,00	4,67		137,95
8	21,00	6,14	30,00	122,81	8	21,00	6,14		152,81
9	21,00	8,30	30,00	105,51	9	21,00	8,30		165,51
10	21,00	9,41	30,00	87,10	10	21,00	9,41		177,10
11	21,00	11,36	30,00	66,74	11	21,00	11,36		186,74
12	21,00	10,95	30,00	46,79	12	21,00	10,95		196,79
13	21,00	9,97	30,00	27,82	13	21,00	9,97		207,82
14	21,00	10,81	30,00	<b>8,01</b>	14	21,00	10,81	30,00	188,01
15	21,00	10,74	30,00	<b>-11,72</b>	15	21,00	10,74	30,00	168,28
16	21,00	10,74	30,00	<b>-31,46</b>	16	21,00	10,74	30,00	148,54
17	21,00	10,67		<b>-21,13</b>	17	21,00	10,67	30,00	128,87
18	21,00	9,90		<b>-10,03</b>	18	21,00	9,90	30,00	109,97
19	21,00	7,81		3,16	19	21,00	7,81	30,00	93,16
20	21,00	6,69		17,47	20	21,00	6,69	30,00	77,47
21	21,00	6,00		32,47	21	21,00	6,00	30,00	62,47
22	21,00	5,37		48,10	22	21,00	5,37	30,00	48,10
23	21,00	4,67		64,43	23	21,00	4,67		64,43
24	21,00	3,70		81,74	24	21,00	3,70		<b>81,74</b>

Na Tabela 4.1 (a) foi atribuído empiricamente  $cd_j = 30 \text{ m}^3\text{biogás}$  e o início do  $TD_{op}$  em  $j = 8$ . Pode-se verificar que para este valor de  $cd$  o início do  $TD_{op}$  não pode ser em  $j = 8$ , pois se assim for, no período  $j=14$  o estoque de biogás no bioESS será  $e_{j=14} = 8,01 \text{ m}^3\text{biogás}$  ultrapassando o valor estipulado de  $E_{min}$ , e ainda atingindo valores negativos de  $e_{j=15}$ ,  $e_{j=16}$ ,  $e_{j=17}$ ,  $e_{j=18}$  o que significa dizer que haveria déficit de biogás no bioESS nestes períodos.

Já na Tabela 4.1 (b) utilizando o mesmo  $cd_j = 30 \text{ m}^3\text{biogás}$ , mas alterando o início do  $TD_{op}$  para as  $j=14$ , pode-se verificar que não haverá déficit de biogás no bioESS em nenhum período, porém o estoque final do bioESS ( $e_{j=24} = 81,74 \text{ m}^3\text{biogás}$ ), ou seja, um valor maior que  $E_0$ , portanto não atendendo o critério de  $e_f = E_0$ , responsável por garantir que o ROM da GD possa se repetir diariamente. Sendo assim, pode-se concluir que na Tabela 4.1 (a) o  $cd$  deveria ter um valor menor para o  $TD_{op}$  iniciando em  $j=8$ , e na Tabela 4.1 (b) o  $cd$  pode assumir um valor maior para o  $TD_{op}$  iniciando em  $j=14$ , de forma que atingir um  $e_f = E_0$ .

As Tabelas 4.2 (a) e (b) apresentam alguns resultados considerando os mesmos dados iniciais da Tabela 4.1, porém agora considerando o Modelo 2 de ROM para GD com 2 intervalos de operação da GD para a distribuidora.

Tabela 4.2 – Resultados do estoque de biogás considerando Modelo 2 de ROM para GD com 2 intervalos de operação da GD para a distribuidora

(a)					(b)				
Hora	$PBh_j$	$CP_j$	$cd$	$e_j$	Hora	$PBh_j$	$CP_j$	$cd$	$e_j$
<b><math>E_0 = 15</math></b>					<b><math>E_0 = 15</math></b>				
1	21,00	3,14		32,86	1	21,00	3,14		32,86
2	21,00	3,07		50,79	2	21,00	3,07		50,79
3	21,00	3,14		68,66	3	21,00	3,14		68,66
4	21,00	3,07	30,00	56,59	4	21,00	3,07		86,59
5	21,00	3,14	30,00	44,45	5	21,00	3,14		104,45
6	21,00	3,83	30,00	31,62	6	21,00	3,83		121,62
7	21,00	4,67	30,00	17,95	7	21,00	4,67		137,95
8	21,00	6,14	30,00	2,81	8	21,00	6,14	30,00	122,81
9	21,00	8,30		15,51	9	21,00	8,30	30,00	105,51
10	21,00	9,41		27,10	10	21,00	9,41	30,00	87,10
11	21,00	11,36		36,74	11	21,00	11,36	30,00	66,74
12	21,00	10,95		46,79	12	21,00	10,95	30,00	46,79
13	21,00	9,97	30,00	27,82	13	21,00	9,97		57,82
14	21,00	10,81	30,00	<b>8,01</b>	14	21,00	10,81		68,01
15	21,00	10,74	30,00	<b>-11,72</b>	15	21,00	10,74		78,28

16	21,00	10,74	30,00	<b>-31,46</b>	16	21,00	10,74		88,54
17	21,00	10,67		<b>-21,13</b>	17	21,00	10,67	30,00	68,87
18	21,00	9,90		<b>-10,03</b>	18	21,00	9,90	30,00	49,97
19	21,00	7,81		3,16	19	21,00	7,81	30,00	33,16
20	21,00	6,69		17,47	20	21,00	6,69	30,00	17,47
21	21,00	6,00		32,47	21	21,00	6,00		32,47
22	21,00	5,37		48,10	22	21,00	5,37		48,10
23	21,00	4,67		64,43	23	21,00	4,67		64,43
24	21,00	3,70		81,74	24	21,00	3,70		<b>81,74</b>

Nestes casos, pode-se verificar que os problemas apresentados nas Tabelas 4.2 (a) e (b) ocorrem mesmo que se utilize o modelo 2 de ROM com 2 intervalos de operação.

As parcelas  $e_{j-1}$ ,  $PBh_j$ ,  $cd$  são valores conhecidos em todos os períodos, portanto faz-se necessário determinar o máximo valor que se pode atribuir ao  $cd$  durante todo o  $TD_{op}$ , de forma que o  $e_j$  seja maior ou igual ao  $E_{min.}$  ao final de qualquer período, e a partir de qual período ( $j$ ) pode começar o  $TD_{op}$ .

$$E_{min.} \leq e_{j-1} + PBh_j - (CF_j + cd)$$

Trata-se então de um problema de otimização do uso do biogás armazenado, no qual se necessita maximizar o valor de  $cd$  durante o  $TD_{op}$ , sejam este com um, dois ou mais intervalos de operação da GD disponíveis para a distribuidora.

Os problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de função de uma ou mais variáveis num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições nas variáveis. Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, probabilísticos ou determinísticos.

Os métodos de otimização baseados nos algoritmos probabilísticos, tais como: Colônia de Formigas, Algoritmos Genéticos, Busca Tabu, Entropia, entre outros, usam somente a avaliação da função objetivo e introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos.

Os métodos determinísticos apresentam teoremas que lhes garantem a convergência para uma solução ótima que não é necessariamente a solução ótima global. Nesses métodos a solução encontrada é extremamente dependente do ponto de partida fornecido para que se possa

convergir para um ponto ótimo. Os métodos determinísticos podem ser classificados em duas classes, conforme as características de não linearidade ou linearidade da função objetivo e das restrições.

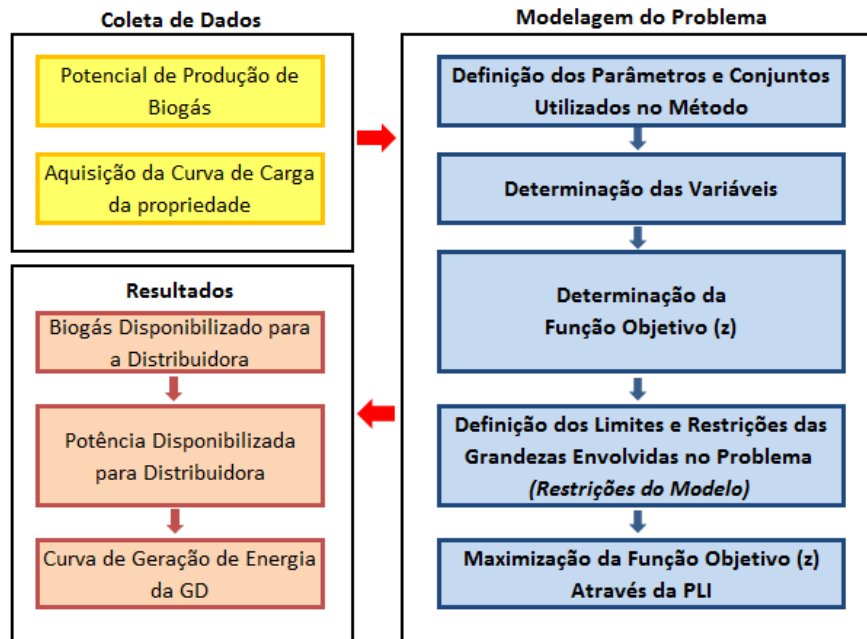
Na Programação Não-Linear a função objetivo, ou pelo menos uma das restrições, é uma função não-linear das variáveis de problema. Nesta classe, os métodos que mais se destacam são: Método de Programação Linear Sequencial, Método de Programação Quadrática Sequencial, Método das Direções Viáveis e Método do Gradiente Reduzido, Entropia Cruzada, entre outros.

Na Programação Linear a função objetivo e as restrições são funções lineares das variáveis de problema. Nesta classe, a Programação Linear Inteira (PLI) é uma das técnicas de otimização mais utilizadas em se tratando de problemas de otimização. Os problemas de programação linear inteira buscam a distribuição eficiente de recursos limitados para atender um determinado objetivo, em geral, maximizar ou minimizar resultados (MITCHEL, J. 1999). Em se tratando de PLI, esse objetivo é expresso através de uma função linear, denominada de "Função Objetivo". É necessário também que se definam quais as atividades que consomem recursos e em que proporções os mesmos são consumidos. Essas informações são apresentadas na forma de equações ou inequações lineares, uma para cada recurso. Ao conjunto dessas equações e/ou inequações, denomina-se "Restrições do Modelo" (LUENBERGER; YE, 2015).

Normalmente se tem inúmeras maneiras de distribuir os recursos escassos entre as diversas atividades em estudo, bastando que essas distribuições estejam coerentes com as restrições do modelo. No entanto, o que se busca, num problema PLI é a função objetivo, isto é, a maximização ou a minimização de resultados, e a essa solução dá-se o nome de solução ótima. Assim, a PLI se incumbe de achar a solução ótima de um problema, uma vez definido o modelo linear, ou seja, a função objetivo e as restrições lineares (LUENBERGER; YE, 2015). Sendo assim, a PLI reúne as características necessárias para a modelagem matemática do método apresentado nesta Tese, uma vez que se trata de um problema de otimização no qual se quer maximizar o valor do  $cd$ , e os limites e restrições das características físicas do gerenciamento de um sistema de armazenamento de energia a biogás podem ser modelados através de equação lineares.

Portanto, para desenvolver a modelagem matemática do método proposto, faz-se necessário realizar as etapas apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Diagrama de Desenvolvimento da Modelagem Matemática.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4.1 Determinação dos Parâmetros e Conjuntos

Para o desenvolvimento da modelagem matemática do método proposto faz-se necessário determinar os parâmetros e conjuntos a serem utilizados na PLI.

Os parâmetros são os dados iniciais a serem utilizados no método, os quais devem ter seus valores definidos e informados previamente, a fim de se obter a melhor solução para estas condições iniciais. Os parâmetros utilizados no método são:

- $NP$  Número de períodos disponíveis para o regime operacional da GD;
- $C_{pp}$  Conjunto de períodos de planejamento:  $C_{pp} = \{1..NP\}$ ;
- $C_{pp0}$  Conjunto de períodos de planejamento mais o período inicial:  $C_{pp0} = \{0..NP\}$ ;
- $E_0$  Estoque inicial de biogás ou *set point* do bioESS;
- $E_{mín}$  Estoque mínimo de biogás no bioESS;
- $PB$  Produção diária de biogás;
- $PBh_j$  Produção horária de biogás por período;

$TD_{op_{m\acute{a}x}}$  Tempo máximo que cada intervalo de operação da GD para a distribuidora pode assumir;

$TD_{op_{m\acute{i}n}}$  Tempo mínimo que cada intervalo de operação da GD para a distribuidora pode assumir;

Tanto o  $TD_{op_{m\acute{a}x}}$  quanto o  $TD_{op_{m\acute{i}n}}$  permitem o método ajustar o número de períodos máximos e mínimos que cada intervalo de operação pode assumir, de forma a encontrar o melhor resultado.

$N_{io}$  Número de intervalos de operação que se quer dividir o tempo de operação da GD disponível para a distribuidora.

$CP_j$  Consumo de biogás da máquina primária para atendimento das cargas da propriedade por período, possibilitando que o método avalie o balanço entre  $PBh_j$ ,  $e_j$  e  $cm_j$ .

$M$  Constante de ajuste das restrições do modelo, calculada através da Equação 4.14.

$$M = 10 \times \{E_{min} + (NP \cdot PB)\} \quad (4.14)$$

#### 4.4.2 Determinação das Variáveis

As variáveis da Função Objetivo (FO) e das Restrições do Modelo foram determinadas de acordo com a necessidade de se obter o valor do  $cd$ , e os períodos em que haverá disponibilidade da GD para a distribuidora, respeitando as características de gerenciamento do bioESS. Portanto, as variáveis utilizadas são:

$$e_j, \quad \forall_j \in Cppo, \quad e_j \in \mathbb{R}$$

$$cd \in \mathbb{R}$$

$$tc_j, \quad \forall_j \in Cppo, \quad tc_j \in \{0,1\}$$

$$io_j, \quad \forall_j \in Cppo, \quad io_j \in \{0,1\}$$

$$e_f = e_{j=24}, \quad e_f \in \mathbb{R}$$

- $e_j$  Variável que indica o valor de estoque de biogás no final de cada período pertencente ao  $C_{pp0}$ .
- $cd$  Variável utilizada para determinar o valor de consumo de biogás que a máquina primária pode assumir para produzir a potência disponibilizada para a distribuidora.
- $e_f$  Variável que representa o estoque de biogás que restará no período  $j = 24$ . Esta variável tem como objetivo ajustar o estoque de biogás no último período do conjunto de períodos analisados, de forma a obter um valor mais próximo possível ao estoque mínimo. Com isso, uma vez que “ $e_f$ ” seja igual “ $E_{\min}$ ” garante-se um ROM para GD cíclico para intervalos de 24 períodos.
- $tc_j$  Variável binária utilizada para sinalizar se efetivamente há consumo da MP para produzir energia elétrica para a distribuidora em cada período. Esta variável, denominada de “Tem consumo de biogás para atender a distribuidora”, também auxilia no balanço de entrada e saída de biogás do bioESS, uma vez que haverá um tipo de restrição quando tem consumo de biogás pela máquina primária para produzir a potência disponibilizada para a distribuidora e outro tipo de restrição quando não tem consumo
- $io_j$  Variável binária utilizada para indicar o período onde se pode começar a geração de energia elétrica para a distribuidora, denominada de “Início dos intervalos de operação da GD para a distribuidora”. Para o Modelo 1 de ROM, esta variável representa o acionamento da GD. Já para o Modelo 2 de ROM, essa variável representa o período em que inicia a disponibilidade da GD para a distribuidora.

#### 4.4.3 Determinação da Função Objetivo (FO)

A FO é uma soma ponderada de parcelas a serem utilizadas pelo método para determinar a melhor solução para as variáveis que compõe a função, sob condições pré-estabelecidas. A FO desenvolvida é composta por 04 parcelas.

A primeira parcela é composta pela variável "cd" que se quer maximizar para obter a melhor solução, conforme os parâmetros iniciais e restrições do modelo.

Na segunda parcela, que se refere ao estoque total do Cpp, obtido por meio da soma das parciais  $e_j$ , busca-se minimizar o valor acumulado de estoque de biogás através do acréscimo desta parcela com sinal negativo na função objetivo.

A terceira parcela visa minimizar o estoque final  $e_f$ , que está relacionado com a variável  $e_j$  do último período, ou seja,  $e_{(NP)}$ .

A quarta parcela, que envolve a variável  $io_j$ , representa na função objetivo a tentativa de minimizar as transições entre um período sem geração e um período de geração subsequente.

Com a definição destas parcelas, os respectivos fatores de ponderação ( $P_1, P_2, P_3$  e  $P_4$ ) forma utilizados com intuito de flexibilizar o ajuste do comportamento da FO, de modo a ser mais influenciado por uma determinada parcela. Portanto a função objetivo desenvolvida é definida pela Equação (4.15).

$$\text{máx } z = \{P_1 \cdot cd\} - \left\{P_2 \cdot \sum_{j=1}^{NP} e_j\right\} - \{P_3 \cdot e_f\} - \left\{P_4 \cdot \sum_{j=1}^{NP} io_j\right\} \quad (4.15)$$

onde:

$z$  = Função Objetivo

$cd$  = Consumo de biogás da máquina primária para produzir a potência elétrica disponível para a distribuidora;

$e_j$  = Estoque de biogás no final em determinado período;

$e_f$  = Estoque final de biogás no bioESS, para  $j = NP$ ;

$io_j$  = Início dos intervalos de operação da GD para a distribuidora;

$P_1$  = Fator de ponderação de representatividade do  $cd$ ;

$P_2$  = Fator de ponderação de representatividade do estoque total:  $\sum_{j \in Cpp} e_j$

$P_3$  = Fator de ponderação de representatividade do estoque final:  $e_{NP}$ ;



$P_4$  = Fator de ponderação de representatividade do número de intervalos de operação da GD para a distribuidora;

Os fatores de ponderação da função objetivo devem ser arbitrados para cada parcela de Z. Estes fatores de ponderação servem para determinar a representatividade de cada parcela para o objetivo, ou seja, determinam quais as parcelas serão mais representativas para a função objetivo, de forma que o modelo responda a um determinado compromisso. Por se tratar de um método que define regimes operacionais que devem se repetir a cada 24 períodos, a parcela mais representativa na Função Objetivo deve ser o Estoque final, uma vez que é necessário que o estoque de biogás no período  $j = 24$  seja um valor mais próximo possível do estoque inicial, o qual deve ter seu valor igual ao estoque mínimo, conforme definido na equação 4.13.

#### 4.4.4 Definição dos Limites e Restrições das Grandezas Envolvidas no Problema - “Restrições do Modelo”

Para modelagem matemática determinou-se as seguintes restrições para o Modelo 1 de ROM:

$$e_{j=0} = E_0 \quad (4.16)$$

$$tc_{j=0} = 0 \quad (4.17)$$

$$i_{Oj=0} = 0 \quad (4.18)$$

$$\sum_{j=1}^{NP} i_{Oj} = N_{io} \quad (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^{NP} tc_j \geq TD_{opmin} \quad (4.20)$$

$$\sum_{j=1}^{NP} tc_j \leq TD_{opmax} \quad (4.21)$$

$$e_j \geq E_{min}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.22)$$

$$i_{Oj} \geq \{tc_j - tc_{j-1}\}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.23)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \geq e_j + cd + (CP_j \cdot tc_j) - M(1 - tc_j), \quad \forall j \in Cpp \quad (4.24)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \leq e_j + cd + (CP_j \cdot tc_j) + M(1 - tc_j), \quad \forall j \in Cpp \quad (4.25)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \leq e_j + \{M \cdot tc_j\}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.26)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \geq e_j + \{M \cdot tc_j\}, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.27)$$

$$cm_j \geq cd + (CP_j \cdot tc_j) - M(1 - tc_j), \quad \forall j \in Cpp \quad (4.28)$$

$$cm_j \geq (CP_j \cdot tc_j) - M \cdot tc_j, \quad \forall j \in Cpp \quad (4.29)$$

As restrições (4.16), (4.17) e (4.18) têm o objetivo de vincular estas variáveis ao valor zero no instante inicial, o que significa que a GD está desligada e não há consumo de biogás pela MP.

A restrição (4.19) restringe o número de transições “sem consumo/com consumo”, ou seja, a soma de inícios de intervalos de operação da GD para a distribuidora deve ser igual ao  $N_{io}$ .

As (4.20) e (4.21) são utilizadas para que o método ajuste cada intervalo de operação da GD para a distribuidora de forma que estes possuam um número de períodos entre  $TD_{op_{min}}$  e  $TD_{op_{max}}$  pré-estabelecidos.

A restrição (4.22) serve para garantir que o estoque de biogás resultante no bioESS no final de cada período seja maior ou igual ao estoque mínimo pré-estabelecido. A (4.23) auxilia o método a definir os períodos em que irão ocorrer os inícios dos intervalos de operação da GD para a distribuidora. Isto é realizado através da análise da diferença entre as variáveis  $tc_j$  (período atual) e  $tc_{j-1}$  (período anterior).

As restrições (4.24) e (4.25) provêm da equação de conservação de energia do bioESS (4.9), a qual considera que o estoque existente no bioESS somado com a produção horária de biogás deve ser igual ao consumo da máquina primária ( $cm_j$ ) e ao estoque que resta em cada período de planejamento. A construção de duas inequações se justifica para evitar instabilidade numérica. A vinculação da (4.24) e (4.25) com o Modelo 1 ROM se dá pela utilização das parcelas  $(CP_j \cdot tc_j)$  e  $M(1 - tc_j)$  sempre que o modelo definir que haverá consumo da MP ( $tc_j = 1$ ). Neste caso, o consumo da MP referente ao atendimento da carga da propriedade será considerado na equação juntamente com o valor de  $cd$  e o valor de  $M$  será eliminado, de modo a tornar esta restrição ativa.

No caso em que o Modelo 1 ROM defina que não tenha consumo de biogás pela MP no período correspondente,  $tc_j = 0$ , as restrições (4.24) e (4.25) são tornadas inativas em função

da presença do valor de  $M$ , e passam a valer as restrições (4.26) e (4.27) para realizar a conservação de energia em cada período. Estas duas também são construídas na forma de inequações novamente para evitar instabilidade numérica e definem que o estoque de biogás de um determinado período sem consumo da máquina primária seja igual ao estoque do período anterior somado à produção de biogás do período atual.

A restrição (4.28) ajusta o valor do  $cm_j$  em cada período. Neste caso esta inequação é válida para períodos em que  $tc_j = 1$ , atribuindo ao  $cm_j$  o valor da soma de  $CP_j$  e  $cd$ . Nos períodos em que  $tc_j = 0$ , a constante  $M$  torna a segunda parcela da inequação um número negativo de forma que basta o  $cm_j = 0$  para atender a condição imposta. Já a (4.29) será válida para os períodos em que não haverá geração para a distribuidora, atribuindo ao  $cm_j$  o valor do  $CP_j$ .

Portanto, para que método resulte em um ROM com as características do Modelo 1 estabeleceu-se 10 parâmetros, 04 variáveis que compõe a FO e 14 equações de Restrições do Modelo. Destas equações de restrição, 08 devem ser aplicadas para todos os períodos  $j$  pertencentes a  $C_{pp}$ , resultando em 198 equações de restrição do modelo.

Para obter um ROM com as características do Modelo 2, utilizou-se as mesmas restrições (4.16) à (4.23) do Modelo 1 juntamente com as seguintes restrições.

$$e_{j-1} + PBh_j \geq e_j + cd + CP_j - M(1 - tc_j), \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.30)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \leq e_j + cd + CP_j + M(1 - tc_j), \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.31)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \leq e_j + CP_j + M \cdot tc_j, \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.32)$$

$$e_{j-1} + PBh_j \geq e_j + CP_j - M \cdot tc_j, \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.33)$$

$$cm_j \geq cd + CP_j - M(1 - tc_j), \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.34)$$

$$cm_j \geq CP_j - M \cdot tc_j, \quad \forall j \in C_{pp} \quad (4.35)$$

As restrições (4.30) e (4.31) possuem as mesmas funções para o método quando comparada com as restrições (4.24) e (4.25) do Modelo 1. Porém, para atender as características do Modelo 2, a variável  $tc_j$  não é multiplicada pelo  $CP_j$ , uma vez que no Modelo 2, a curva de carga da propriedade é atendida pela GD durante todo  $C_{pp}$ .

A (4.32) e a (4.33) visam ajustar o valor do estoque de biogás nos períodos em que não há geração pela GD para a distribuidora. Na (4.32) e (4.33) foi necessário considerar  $CP_j$  na segunda parcela das inequações, uma vez que haverá consumo de biogás para atender a propriedade durante os 24 períodos. As restrições (4.34) e (4.35) auxiliam o método a determinar o valor do  $cm_j$  em todos os períodos. A restrição (4.34) será válida nos períodos em que o método determinar que pode haver a geração para a distribuidora. Já a (4.35) será válida para os períodos em que não haverá geração para a distribuidora.

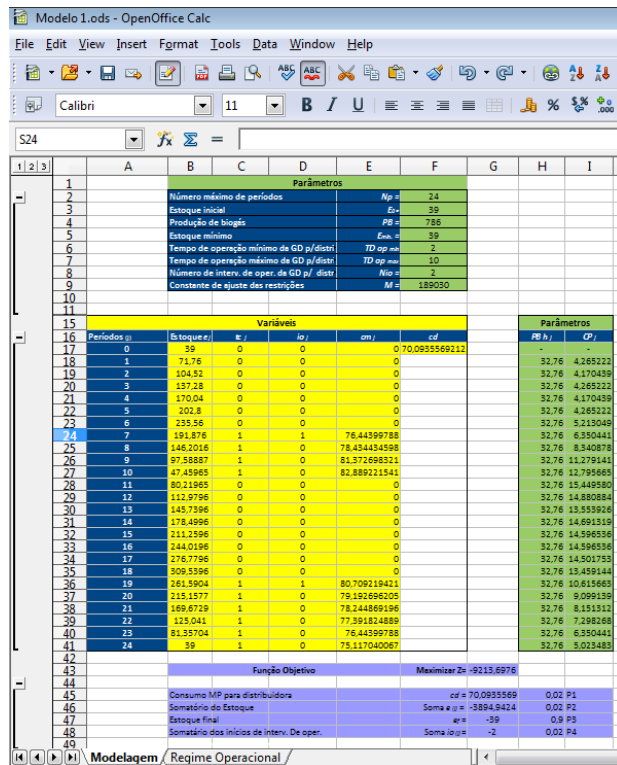
Portanto, para obter um ROM com características do Modelo 2, utilizou-se os mesmas 10 parâmetros e as 04 variáveis que compõe a FO do Modelo 1. E assim como no modelo 1, em se tratando das “Restrições do Modelo” tem-se 15 equações, destas, 08 devem ser aplicadas para todos os períodos  $j$  pertencentes a  $NP$ , obtendo-se 198 equações de “Restrição do Modelo”.

#### 4.5 SOLUÇÃO DO MÉTODO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Definidos os parâmetros, conjuntos, variáveis, função objetivo e as restrições do modelo, para obter a solução e apresentar os resultados do método apresentado, utilizou-se o *software MS OpenOffice Calc*, que possibilita modelagem matemática e solução de problemas de otimização através função “*Solver*”, a qual possui a programação linear embutida em suas funcionalidades.

Na planilha do *MS OpenOffice Calc* denominada “Modelagem” encontram-se os **Parâmetros** (que devem ser informados pelo usuário), **Variáveis**, **Função Objetivo**, e as **Restrições do Modelo**, como se pode observar na Figura 4.8.

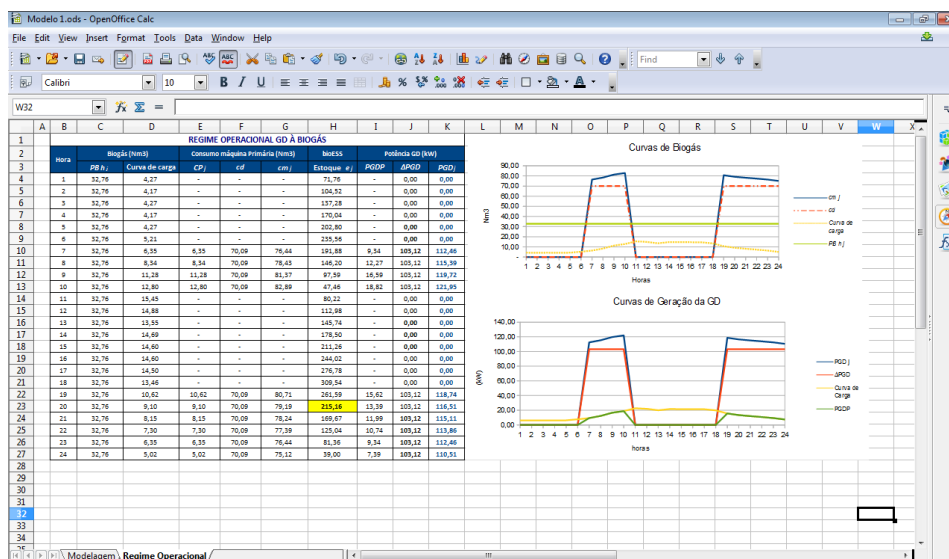
Figura 4.8 - Planilha “Modelagem”



Fonte: Próprio Autor.

Na planilha “Regime Operacional” estão os resultados obtidos com a aplicação da metodologia, os quais são apresentados através de uma tabela com os valores de Produção de Biogás, Consumo da Máquina Primária, Estoque do bioESS e Potência da GD. Além da tabela, os resultados são apresentados também em forma de gráficos, conforme na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Planilha “Regime Operacional”



Fonte: Próprio Autor.

Na tabela de resultados do Regime Operacional da GD a biogás os valores obtidos são apresentados conforme Figura 4.10

Figura 4.10 - Apresentação dos Resultados Obtidos pelo Método Proposto.

Hora	Biogás (Nm3)		Consumo máquina Primária (Nm3)			bioESS	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$	Estoque $e_j$	$PGDP_j$	$\Delta PGD$	$PCD$
1	32,76	4,27	-	-	-	71,76	-	0,00	0,00
2	32,76	4,17	-	-	-	104,52	-	0,00	0,00
3	32,76	4,27	-	-	-	137,28	-	0,00	0,00
4	32,76	4,17	-	-	-	170,04	-	0,00	0,00
5	32,76	4,27	4,27	70,07	74,34	128,46	6,27	103,09	109,37
6	32,76	5,21	5,21	70,07	75,29	85,93	7,67	103,09	110,76
7	32,76	6,35	6,35	70,07	76,43	42,27	9,34	103,09	112,44
8	32,76	8,34	-	-	-	75,03	-	0,00	0,00
9	32,76	11,28	-	-	-	107,79	-	0,00	0,00
10	32,76	12,80	-	-	-	140,55	-	0,00	0,00
11	32,76	15,45	-	-	-	173,31	-	0,00	0,00
12	32,76	14,88	-	-	-	206,07	-	0,00	0,00
13	32,76	13,55	13,55	70,07	83,63	155,20	19,94	103,09	123,03
14	32,76	14,69	14,69	70,07	84,77	103,19	21,61	103,09	124,71
15	32,76	14,60	14,60	70,07	84,67	51,28	21,47	103,09	124,57
16	32,76	14,60	-	-	-	84,04	-	0,00	0,00
17	32,76	14,50	-	-	-	116,80	-	0,00	0,00
18	32,76	13,46	-	-	-	149,56	-	0,00	0,00
19	32,76	10,62	-	-	-	182,32	-	0,00	0,00
20	32,76	9,10	-	-	-	215,08	-	0,00	0,00
21	32,76	8,15	8,15	70,07	78,23	183,02	11,99	103,09	115,09
22	32,76	7,30	7,30	70,07	77,37	125,00	10,74	103,09	113,83
23	32,76	6,35	6,35	70,07	76,43	81,34	9,34	103,09	112,44
24	32,76	5,02	5,02	70,07	75,10	39,00	7,35	103,09	110,44

Fonte: Próprio Autor.

Períodos para a distribuidora

Tamanho do bioESS

Potência p/ distribuidora

Potência GD

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta uma abordagem geral da metodologia proposta nesta Tese, incluindo uma descrição dos modelos de ROM propostos para o desenvolvimento da metodologia. Também foram descritos as características de gerenciamento do bioESS que servem como base para determinação das restrições do modelo. Foi apresentado o desenvolvimento da modelagem matemática do método proposto através do desenvolvimento da FO e das equações de restrição do modelo. Por fim, foram expostas a solução do método e a forma de apresentação dos resultados.

## 5 ESTUDO DE CASO

Para realizar testes no método desenvolvido nesta Tese utilizou-se os dados de uma propriedade rural de suinocultura, localizada no município de Itapiranga-SC. Esta propriedade participa do projeto de pesquisa e desenvolvimento, chamada pública ANEEL 014/2012, firmado com o Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência da Universidade Federal de Santa Maria (CEESP/UFSC), juntamente com o Centro de Referência de Tecnologias Inovadoras (CERTI), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Instituto Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI), Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

### 5.1 DADOS PARA O ESTUDO DE CASO

A propriedade rural do estudo possui as seguintes características:

- 2100 matrizes de suínos;
- $PB = 786,24 \text{ m}^3\text{biogás}$
- Consumo de energia elétrica de 9254kWh em janeiro de 2015.

Além das características da propriedade, considerou-se:

- Número de períodos disponíveis para o Regime Operacional,  $NP = 24$ ;
- Curva de carga da propriedade = **Dia útil de janeiro de 2015**;
- Estoque mínimo de 5% da produção diária de biogás,  $E_{\min.} = 39 \text{ m}^3\text{biogás}$ ;
- Produção diária de biogás constante,  $PBh_j = \text{cte}$ ;
- Início do processo: **01:00h**.

### 5.2 DETERMINAÇÃO DA $PBh_j$ e $CP_j$

Para aplicação da metodologia é necessário determinar a produção horária de biogás e o consumo de biogás da máquina primária para atendimento das cargas da propriedade  $CP_j$ . A produção horária de biogás é dada pela Equação 4.5.

$$PBh_j = PB \cdot T_{\text{prod}/h_j} \quad (4.5)$$

Como se considerou a produção diária de biogás constante, a taxa de produção horária é:

$$T_{prod/h} = \frac{1}{24} = 0,04166 = 4,16\%$$

Logo:

$$PBh_j = 786,24 \times 4,16\% = 32,76Nm^3$$

A propriedade produtora de suínos é atendida pela rede de distribuição das Centrais Elétricas de Santa Catarina - CELESC S.A, e está classificada como unidade consumidora grupo B, trifásica, classe rural, cadastrada como UC 26177421. A curva de carga utilizada refere-se aos dados de um dia útil de janeiro de 2015, obtidos da memória de massa do medidor de energia elétrica ELO 2123 existente no sistema de medição desta unidade consumidora. Neste mês, a propriedade teve um consumo de 9254kWh de energia elétrica.

A partir dos dados da curva de carga da propriedade obteve-se os valores do  $CP_j$  para cada hora, através das Equações 4.4.

$$CP_j = \frac{PP_j \cdot 3600}{PCI \cdot \eta \cdot 4,1868} \quad (4.4)$$

A Tabela 5.1 apresenta os valores da curva de carga da propriedade ( $PP_j$ ) e do consumo de biogás da máquina primária para atendimento das cargas da propriedade ( $CP_j$ ).

Tabela 5.1 – Valores do  $CP_j$  para atendimento da curva de carga da propriedade

Consumo de biogás da MP para atender a curva de carga da propriedade				
Hora	$PP_j$ Curva de carga (kW)	$PCI$ (kcal/m <sup>3</sup> )	$\eta$	$CP_j$ (m <sup>3</sup> )
1	6,27	5500	0,23	<b>4,27</b>
2	6,14	5500	0,23	<b>4,17</b>
3	6,27	5500	0,23	<b>4,27</b>
4	6,14	5500	0,23	<b>4,17</b>
5	6,27	5500	0,23	<b>4,27</b>
6	7,67	5500	0,23	<b>5,21</b>
7	9,34	5500	0,23	<b>6,35</b>
8	12,27	5500	0,23	<b>8,34</b>
9	16,59	5500	0,23	<b>11,28</b>
10	18,82	5500	0,23	<b>12,80</b>
11	22,73	5500	0,23	<b>15,45</b>
12	21,89	5500	0,23	<b>14,88</b>
13	19,94	5500	0,23	<b>13,55</b>



14	21,61	5500	0,23	<b>14,69</b>
15	21,47	5500	0,23	<b>14,60</b>
16	21,47	5500	0,23	<b>14,60</b>
17	21,33	5500	0,23	<b>14,50</b>
18	19,80	5500	0,23	<b>13,46</b>
19	15,62	5500	0,23	<b>10,62</b>
20	13,39	5500	0,23	<b>9,10</b>
21	11,99	5500	0,23	<b>8,15</b>
22	10,74	5500	0,23	<b>7,30</b>
23	9,34	5500	0,23	<b>6,35</b>
24	7,39	5500	0,23	<b>5,02</b>

### 5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA A BIOGÁS

De posse dos valores de  $CP_j$  e das demais características apresentadas nos dados iniciais, foi aplicada a metodologia desenvolvida nos seguintes casos:

- a) **Caso 1:** Modelo 1 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 01 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;
- b) **Caso 2:** Modelo 1 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 02 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;
- c) **Caso 3:** Modelo 1 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 03 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;
- d) **Caso 4:** Modelo 2 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 01 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;
- e) **Caso 5:** Modelo 2 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 02 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;
- f) **Caso 6:** Modelo 2 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 03 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;
- g) **Caso 7:** Modelo 1 de ROM;  $TD_{op} = 10h$ ; 02 *Nio* e  $E_0 > E_{mín}$ ;

### 5.4 RESULTADOS

- a) **CASO 1:** Modelo 1;  $TD_{op} = 10h$ ; 01 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$

Tabela 5.2 - Regime Operacional Multi patamar para GD (01 intervalo de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$	Estoque $e_j$	$PGDP_j$	$\Delta PGD$	$PGD_j$
						$E(0) = 39,00$			
1	32,76	4,27	-	-	-	71,76	-	0,00	0,00
2	32,76	4,17	-	-	-	104,52	-	0,00	0,00
3	32,76	4,27	-	-	-	137,28	-	0,00	0,00
4	32,76	4,17	-	-	-	170,04	-	0,00	0,00
5	32,76	4,27	-	-	-	202,80	-	0,00	0,00
6	32,76	5,21	-	-	-	235,56	-	0,00	0,00
7	32,76	6,35	-	-	-	268,32	-	0,00	0,00
8	32,76	8,34	-	-	-	301,08	-	0,00	0,00
9	32,76	11,28	-	-	-	333,84	-	0,00	0,00
10	32,76	12,80	-	-	-	366,60	-	0,00	0,00
11	32,76	15,45	-	-	-	399,36	-	0,00	0,00
12	32,76	14,88	-	-	-	432,12	-	0,00	0,00
13	32,76	13,55	-	-	-	464,88	-	0,00	0,00
14	32,76	14,69	-	-	-	<b>497,64</b>	-	0,00	0,00
15	32,76	14,60	14,60	68,25	82,85	447,55	21,47	100,42	121,89
16	32,76	14,60	14,60	68,25	82,85	397,46	21,47	100,42	121,89
17	32,76	14,50	14,50	68,25	82,76	347,46	21,33	100,42	121,75
18	32,76	13,46	13,46	68,25	81,71	298,51	19,80	100,42	120,22
19	32,76	10,62	10,62	68,25	78,87	252,40	15,62	100,42	116,03
20	32,76	9,10	9,10	68,25	77,35	207,80	13,39	100,42	113,80
21	32,76	8,15	8,15	68,25	76,41	164,16	11,99	100,42	112,41
22	32,76	7,30	7,30	68,25	75,55	121,36	10,74	100,42	111,15
23	32,76	6,35	6,35	68,25	74,61	79,52	9,34	100,42	109,76
24	32,76	5,02	5,02	68,25	73,28	39,00	7,39	100,42	107,81

Figura 5.1 - Caso 1: Curvas de Biogás

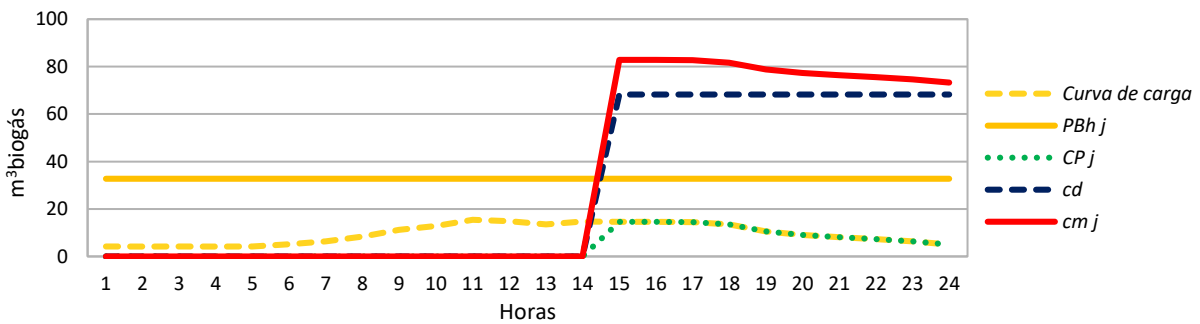
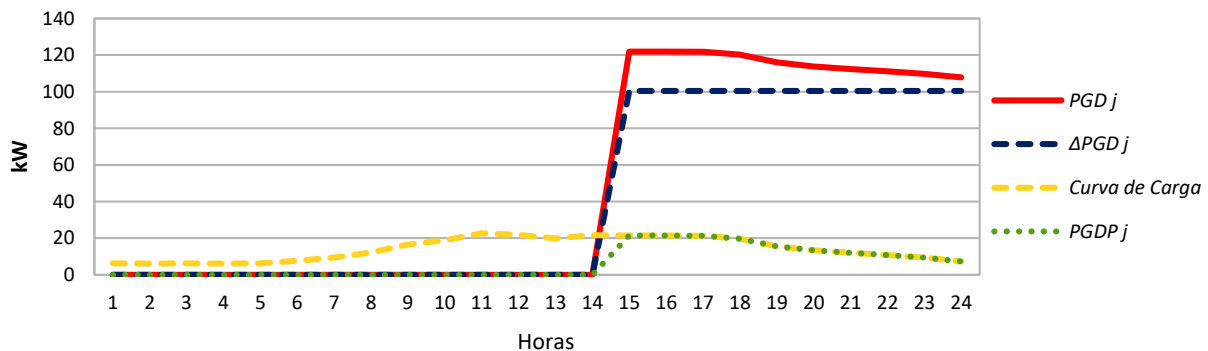


Figura 5.2 - Caso 1: Regime Operacional Multi patamar para GD



b) **CASO 2:** Modelo 1;  $TD_{op} = 10h$ ;  $02 Nio$  e  $E_0 = E_{mín}$ ;

Tabela 5.3 - Regime Operacional Multi patamar para GD (02 intervalos de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS Estoque $e_j$	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$		$PGDP_j$	$\Delta PGD_j$	$PGD_j$
						$E(0) = 39,00$			
1	32,76	4,27	-	-	-	71,76	-	0,00	0,00
2	32,76	4,17	-	-	-	104,52	-	0,00	0,00
3	32,76	4,27	-	-	-	137,28	-	0,00	0,00
4	32,76	4,17	-	-	-	170,04	-	0,00	0,00
5	32,76	4,27	-	-	-	202,80	-	0,00	0,00
6	32,76	5,21	-	-	-	235,56	-	0,00	0,00
7	32,76	6,35	6,35	70,09	76,44	191,88	9,34	103,12	112,46
8	32,76	8,34	8,34	70,09	78,43	146,20	12,27	103,12	115,39
9	32,76	11,28	11,28	70,09	81,37	97,59	16,59	103,12	119,72
10	32,76	12,80	12,80	70,09	82,89	47,46	18,82	103,12	121,95
11	32,76	15,45	-	-	-	80,22	-	0,00	0,00
12	32,76	14,88	-	-	-	112,98	-	0,00	0,00
13	32,76	13,55	-	-	-	145,74	-	0,00	0,00
14	32,76	14,69	-	-	-	178,50	-	0,00	0,00
15	32,76	14,60	-	-	-	211,26	-	0,00	0,00
16	32,76	14,60	-	-	-	244,02	-	0,00	0,00
17	32,76	14,50	-	-	-	276,78	-	0,00	0,00
18	32,76	13,46	-	-	-	309,54	-	0,00	0,00
19	32,76	10,62	10,62	70,09	80,71	261,59	15,62	103,12	118,74
20	32,76	9,10	9,10	70,09	79,19	215,16	13,39	103,12	116,51
21	32,76	8,15	8,15	70,09	78,24	169,67	11,99	103,12	115,11
22	32,76	7,30	7,30	70,09	77,39	125,04	10,74	103,12	113,86
23	32,76	6,35	6,35	70,09	76,44	81,36	9,34	103,12	112,46
24	32,76	5,02	5,02	70,09	75,12	39,00	7,39	103,12	110,51

Figura 5.3 - Caso 2: Curvas de Biogás

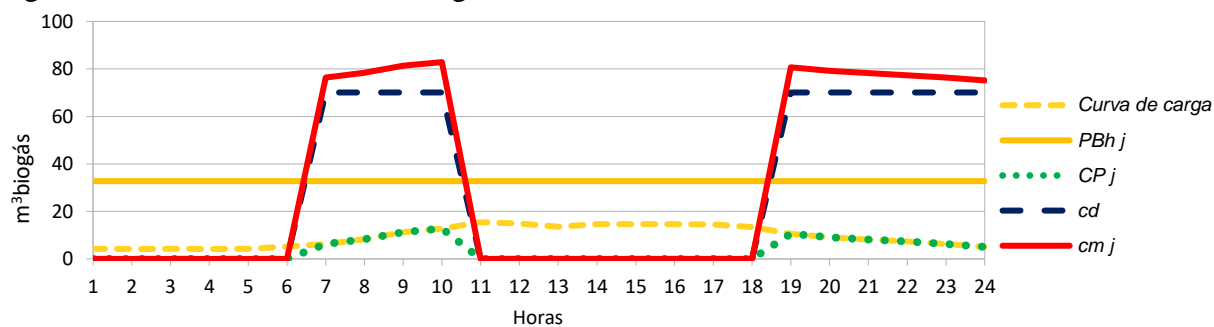
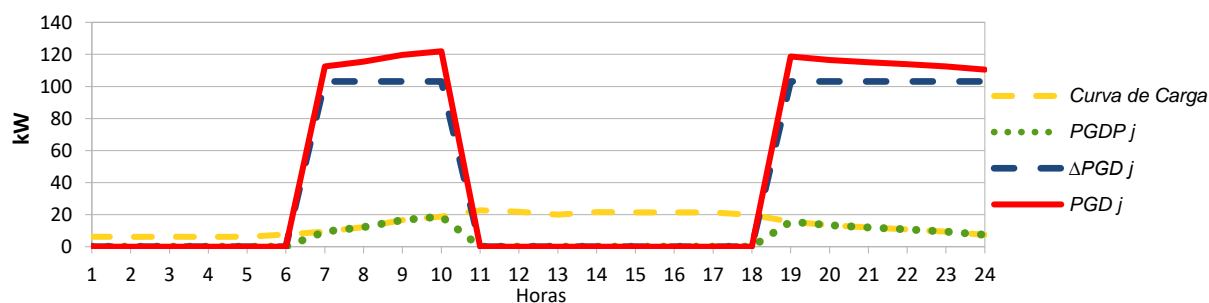


Figura 5.4 - Caso 2: Regime Operacional Multi patamar para GD.



c) **CASO 3:** Modelo 1;  $TD_{op}=10h$ ; 03 *Nio* e  $E_0 = E_{mín}$ ;

Tabela 5.4 - Regime Operacional Multi patamar para GD (03 intervalos de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$	Estoque $e_j$	$PGDP_j$	$\Delta PGD_j$	$PGD_j$
						$E(0) = 39,00$			
1	32,76	4,27	-	-	-	71,76	-	0,00	0,00
2	32,76	4,17	-	-	-	104,52	-	0,00	0,00
3	32,76	4,27	-	-	-	137,28	-	0,00	0,00
4	32,76	4,17	-	-	-	170,04	-	0,00	0,00
5	32,76	4,27	4,27	70,07	74,34	128,46	6,27	103,09	109,37
6	32,76	5,21	5,21	70,07	75,29	85,93	7,67	103,09	110,76
7	32,76	6,35	6,35	70,07	76,43	42,27	9,34	103,09	112,44
8	32,76	8,34	-	-	-	75,03	-	0,00	0,00
9	32,76	11,28	-	-	-	107,79	-	0,00	0,00
10	32,76	12,80	-	-	-	140,55	-	0,00	0,00
11	32,76	15,45	-	-	-	173,31	-	0,00	0,00
12	32,76	14,88	-	-	-	206,07	-	0,00	0,00
13	32,76	13,55	13,55	70,07	83,63	155,20	19,94	103,09	123,03
14	32,76	14,69	14,69	70,07	84,77	103,19	21,61	103,09	124,71
15	32,76	14,60	14,60	70,07	84,67	51,28	21,47	103,09	124,57
16	32,76	14,60	-	-	-	84,04	-	0,00	0,00
17	32,76	14,50	-	-	-	116,80	-	0,00	0,00
18	32,76	13,46	-	-	-	149,56	-	0,00	0,00
19	32,76	10,62	-	-	-	182,32	-	0,00	0,00
20	32,76	9,10	-	-	-	215,08	-	0,00	0,00
21	32,76	8,15	8,15	70,07	78,23	169,62	11,99	103,09	115,09
22	32,76	7,30	7,30	70,07	77,37	125,00	10,74	103,09	113,83
23	32,76	6,35	6,35	70,07	76,43	81,34	9,34	103,09	112,44
24	32,76	5,02	5,02	70,07	75,10	39,00	7,39	103,09	110,48

Figura 5.5 - Caso 3: Curvas de Biogás

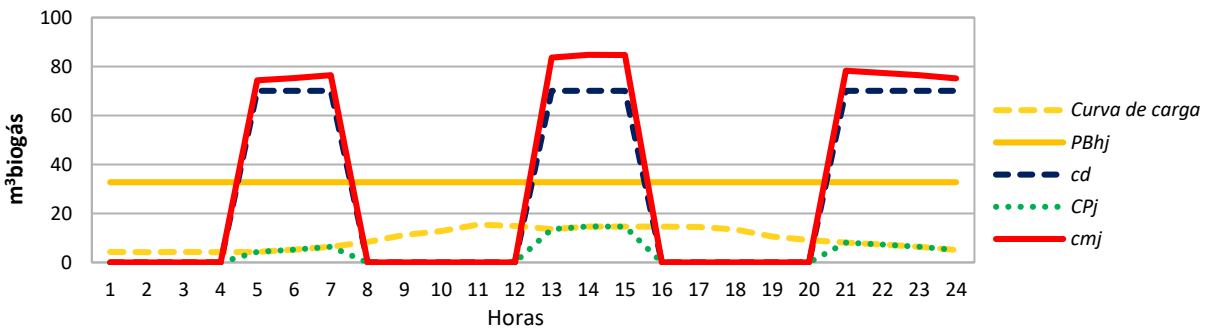
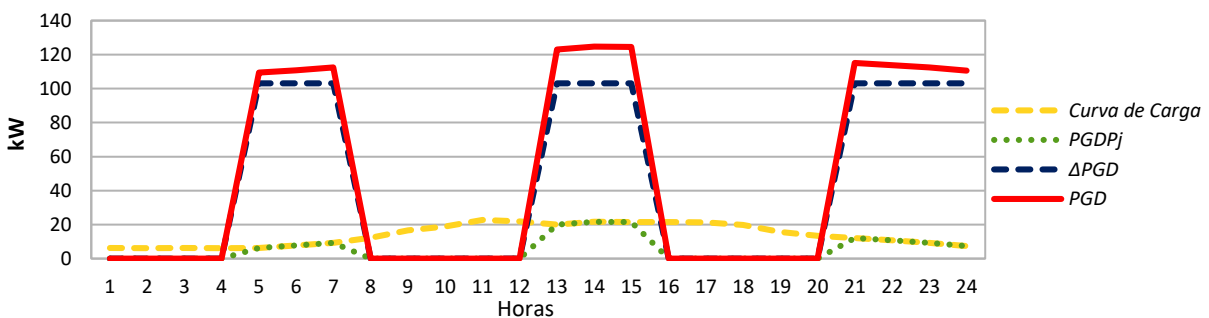


Figura 5.6 - Caso 3: Regime Operacional Multi patamar para GD



d) **CASO 4:** Modelo 2;  $TD_{op} = 10h$ ; 01  $Nio$  e  $E_0 = E_{mín}$ ;

Tabela 5.5 - Regime Operacional Multi patamar para GD (01 intervalo de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS Estoque $e_j$ $E(0) = 39,00$	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$		$PGDP_j$	$\Delta PGD_j$	$PGD_j$
1	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	67,49	6,27	0,00	6,27
2	32,76	4,17	4,17	0,00	4,17	96,08	6,14	0,00	6,14
3	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	124,58	6,27	0,00	6,27
4	32,76	4,17	4,17	0,00	4,17	153,17	6,14	0,00	6,14
5	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	181,66	6,27	0,00	6,27
6	32,76	5,21	5,21	0,00	5,21	209,21	7,67	0,00	7,67
7	32,76	6,35	6,35	0,00	6,35	235,62	9,34	0,00	9,34
8	32,76	8,34	8,34	0,00	8,34	260,04	12,27	0,00	12,27
9	32,76	11,28	11,28	0,00	11,28	281,52	16,59	0,00	16,59
10	32,76	12,80	12,80	0,00	12,80	301,48	18,82	0,00	18,82
11	32,76	15,45	15,45	0,00	15,45	318,79	22,73	0,00	22,73
12	32,76	14,88	14,88	0,00	14,88	336,67	21,89	0,00	21,89
13	32,76	13,55	13,55	0,00	13,55	355,88	19,94	0,00	19,94
14	32,76	14,69	14,69	0,00	14,69	373,95	21,61	0,00	21,61
15	32,76	14,60	14,60	55,89	70,48	336,23	21,47	82,22	103,69
16	32,76	14,60	14,60	55,89	70,48	298,50	21,47	82,22	103,69
17	32,76	14,50	14,50	55,89	70,39	260,88	21,33	82,22	103,55
18	32,76	13,46	13,46	55,89	69,34	224,29	19,80	82,22	102,02
19	32,76	10,62	10,62	55,89	66,50	190,55	15,62	82,22	97,84
20	32,76	9,10	9,10	55,89	64,98	158,33	13,39	82,22	95,61
21	32,76	8,15	8,15	55,89	64,04	127,05	11,99	82,22	94,21
22	32,76	7,30	7,30	55,89	63,18	96,63	10,74	82,22	92,96
23	32,76	6,35	6,35	55,89	62,24	67,15	9,34	82,22	91,56
24	32,76	5,02	5,02	55,89	60,91	39,00	7,39	82,22	89,61

Figura 5.7 - Caso 4: Curvas de Biogás

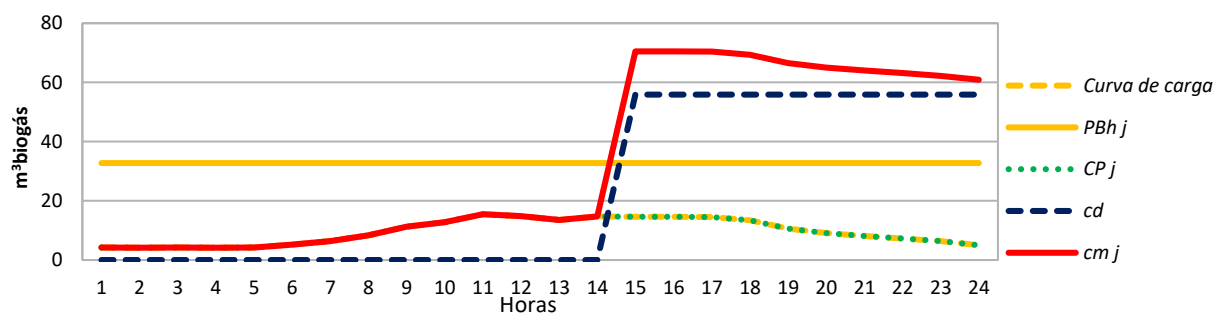
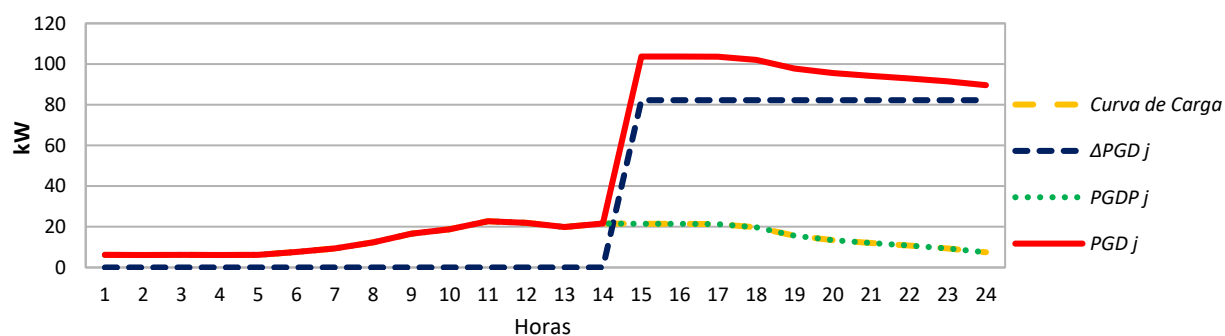


Figura 5.8 - Caso 4: Regime Operacional Multi patamar para GD



e) CASO 5: Modelo 2;  $TD_{op}=10h$ ;  $02 Nio$  e  $E_0 = E_{mín}$ ;

Tabela 5.6 - Regime Operacional Multi patamar para GD (02 intervalos de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS Estoque $e_j$	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$		$PGDP_j$	$\Delta PGD_j$	$PGD_j$
						$E(0) = 39,00$			
1	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	67,49	6,27	0,00	6,27
2	32,76	4,17	4,17	0,00	4,17	96,08	6,14	0,00	6,14
3	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	124,58	6,27	0,00	6,27
4	32,76	4,17	4,17	0,00	4,17	153,17	6,14	0,00	6,14
5	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	181,66	6,27	0,00	6,27
6	32,76	5,21	5,21	0,00	5,21	209,21	7,67	0,00	7,67
7	32,76	6,35	6,35	55,89	62,24	179,73	9,34	82,22	91,56
8	32,76	8,34	8,34	55,89	64,23	148,27	12,27	82,22	94,49
9	32,76	11,28	11,28	55,89	67,16	113,86	16,59	82,22	98,81
10	32,76	12,80	12,80	55,89	68,68	77,94	18,82	82,22	101,04
11	32,76	15,45	15,45	55,89	71,34	39,37	22,73	82,22	104,95
12	32,76	14,88	14,88	0,00	14,88	57,25	21,89	0,00	21,89
13	32,76	13,55	13,55	0,00	13,55	76,45	19,94	0,00	19,94
14	32,76	14,69	14,69	0,00	14,69	94,52	21,61	0,00	21,61
15	32,76	14,60	14,60	0,00	14,60	112,68	21,47	0,00	21,47
16	32,76	14,60	14,60	0,00	14,60	130,85	21,47	0,00	21,47
17	32,76	14,50	14,50	0,00	14,50	149,11	21,33	0,00	21,33
18	32,76	13,46	13,46	0,00	13,46	168,41	19,80	0,00	19,80
19	32,76	10,62	10,62	0,00	10,62	190,55	15,62	0,00	15,62
20	32,76	9,10	9,10	55,89	64,98	158,33	13,39	82,22	95,61
21	32,76	8,15	8,15	55,89	64,04	127,05	11,99	82,22	94,21
22	32,76	7,30	7,30	55,89	63,18	96,63	10,74	82,22	92,96
23	32,76	6,35	6,35	55,89	62,24	67,15	9,34	82,22	91,56
24	32,76	5,02	5,02	55,89	60,91	39,00	7,39	82,22	89,61

Figura 5.9 - Caso 5: Curvas de Biogás

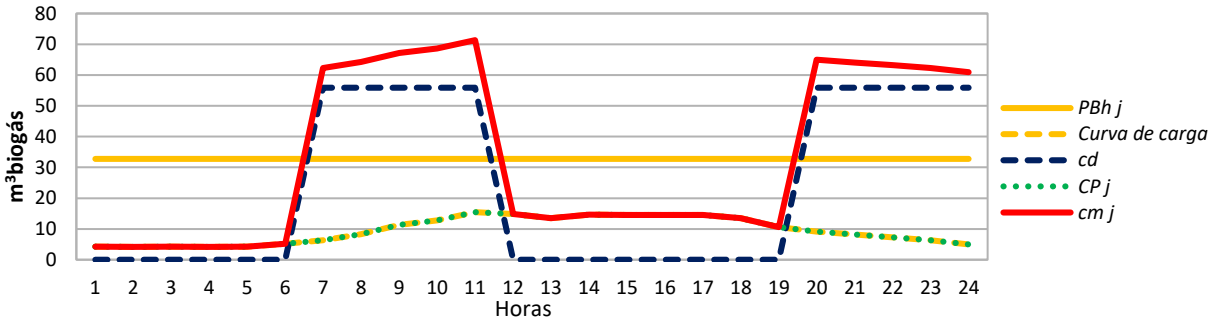
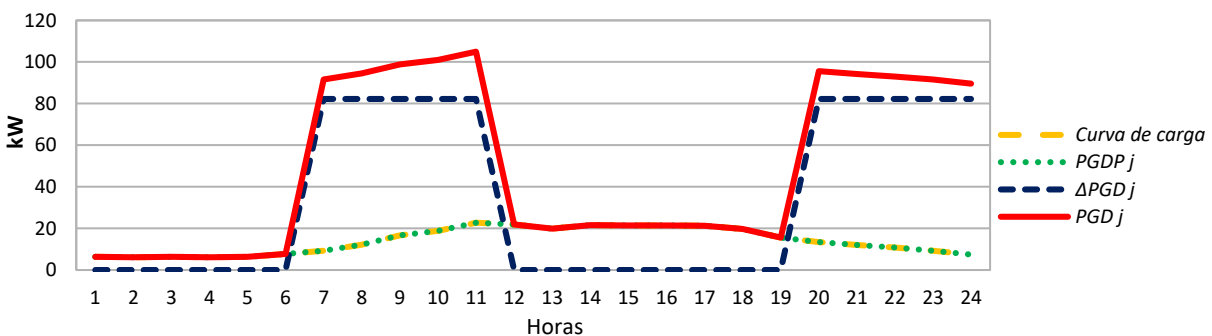


Figura 5.10 - Caso 5: Regime Operacional Multi patamar para GD



f) **CASO 6:** Modelo 2;  $TD_{op}=10h$ ; 03 Nio e  $E_0 = E_{mín}$ ;

Tabela 5.7 - Regime Operacional Multi patamar para GD (03 intervalos de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS Estoque $e_j$ $E(0) = 39,00$	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$		$PGDP_j$	$\Delta PGD_j$	$PGD_j$
1	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	67,49	6,27	0,00	6,27
2	32,76	4,17	4,17	0,00	4,17	96,08	6,14	0,00	6,14
3	32,76	4,27	4,27	0,00	4,27	124,58	6,27	0,00	6,27
4	32,76	4,17	4,17	55,82	60,00	97,34	6,14	82,13	88,26
5	32,76	4,27	4,27	55,82	60,09	70,01	6,27	82,13	88,40
6	32,76	5,21	5,21	55,82	61,04	41,74	7,67	82,13	89,80
7	32,76	6,35	6,35	0,00	6,35	68,15	9,34	0,00	9,34
8	32,76	8,34	8,34	0,00	8,34	92,56	12,27	0,00	12,27
9	32,76	11,28	11,28	0,00	11,28	114,05	16,59	0,00	16,59
10	32,76	12,80	12,80	0,00	12,80	134,01	18,82	0,00	18,82
11	32,76	15,45	15,45	0,00	15,45	151,32	22,73	0,00	22,73
12	32,76	14,88	14,88	55,82	70,71	113,37	21,89	82,13	104,02
13	32,76	13,55	13,55	55,82	69,38	76,76	19,94	82,13	102,07
14	32,76	14,69	14,69	55,82	70,52	39,00	21,61	82,13	103,74
15	32,76	14,60	14,60	0,00	14,60	57,16	21,47	0,00	21,47
16	32,76	14,60	14,60	0,00	14,60	75,33	21,47	0,00	21,47
17	32,76	14,50	14,50	0,00	14,50	93,59	21,33	0,00	21,33
18	32,76	13,46	13,46	0,00	13,46	112,89	19,80	0,00	19,80
19	32,76	10,62	10,62	0,00	10,62	135,03	15,62	0,00	15,62
20	32,76	9,10	9,10	0,00	9,10	158,69	13,39	0,00	13,39
21	32,76	8,15	8,15	55,82	63,98	127,48	11,99	82,13	94,12
22	32,76	7,30	7,30	55,82	63,12	97,11	10,74	82,13	92,87
23	32,76	6,35	6,35	55,82	62,18	67,70	9,34	82,13	91,47
24	32,76	5,02	5,02	55,82	60,85	39,61	7,39	82,13	89,52

Figura 5.11 - Caso 6: Curvas de Biogás

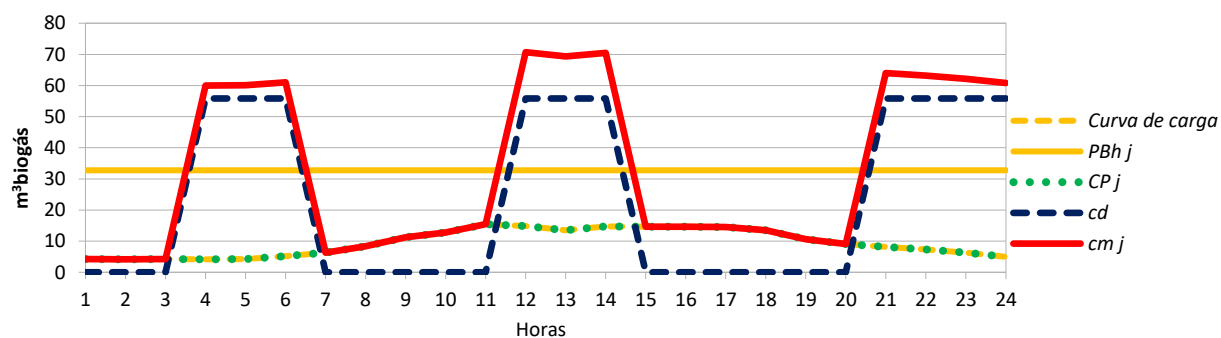
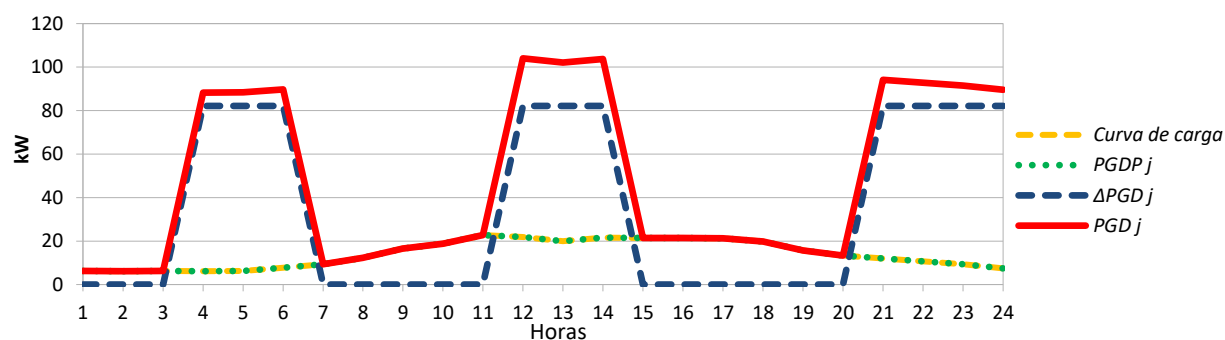


Figura 5.12 - Caso 6: Regime Operacional Multi patamar para GD



g) **CASO 7:** Modelo 1;  $TD_{op}=10h$ ; 02 Nio e  $E_0 > E_{mín}$ ;

Tabela 5.8 - Regime Operacional Multi patamar para GD (02 intervalos de operação da GD para a distribuidora).

Hora	Biogás (m³)		Consumo Máquina Primária (m³)			bioESS	Potência GD (kW)		
	$PBh_j$	Curva de carga	$CP_j$	$cd$	$cm_j$	Estoque $e_j$	$PGDP_j$	$\Delta PGD_j$	$PGD_j$
						$E(0) = 80$			
1	32,76	4,27	-	-	-	112,76	-	0,00	0,00
2	32,76	4,17	-	-	-	145,52	-	0,00	0,00
3	32,76	4,27	-	-	-	178,28	-	0,00	0,00
4	32,76	4,17	-	-	-	211,04	-	0,00	0,00
5	32,76	4,27	-	-	-	243,80	-	0,00	0,00
6	32,76	5,21	-	-	-	276,56	-	0,00	0,00
7	32,76	6,35	-	-	-	<b>309,32</b>	-	0,00	0,00
8	32,76	8,34	8,34	72,86	81,20	260,88	<b>12,27</b>	<b>107,19</b>	<b>119,46</b>
9	32,76	11,28	11,28	72,86	84,14	209,51	<b>16,59</b>	<b>107,19</b>	<b>123,78</b>
10	32,76	12,80	12,80	72,86	85,65	156,61	<b>18,82</b>	<b>107,19</b>	<b>126,01</b>
11	32,76	15,45	15,45	72,86	88,31	101,07	<b>22,73</b>	<b>107,19</b>	<b>129,92</b>
12	32,76	14,88	14,88	72,86	87,74	46,09	<b>21,89</b>	<b>107,19</b>	<b>129,08</b>
13	32,76	13,55	-	-	-	78,85	-	0,00	0,00
14	32,76	14,69	-	-	-	111,61	-	0,00	0,00
15	32,76	14,60	-	-	-	144,37	-	0,00	0,00
16	32,76	14,60	-	-	-	177,13	-	0,00	0,00
17	32,76	14,50	-	-	-	209,89	-	0,00	0,00
18	32,76	13,46	-	-	-	242,65	-	0,00	0,00
19	32,76	10,62	-	-	-	275,41	-	0,00	0,00
20	32,76	9,10	9,10	72,86	81,96	226,21	<b>13,39</b>	<b>107,19</b>	<b>120,57</b>
21	32,76	8,15	8,15	72,86	81,01	177,96	<b>11,99</b>	<b>107,19</b>	<b>119,18</b>
22	32,76	7,30	7,30	72,86	80,16	130,57	<b>10,74</b>	<b>107,19</b>	<b>117,92</b>
23	32,76	6,35	6,35	72,86	79,21	84,12	<b>9,34</b>	<b>107,19</b>	<b>116,53</b>
24	32,76	5,02	5,02	72,86	77,88	39,00	<b>7,39</b>	<b>107,19</b>	<b>114,58</b>

Figura 5.13 - Caso 7: Curvas de Biogás

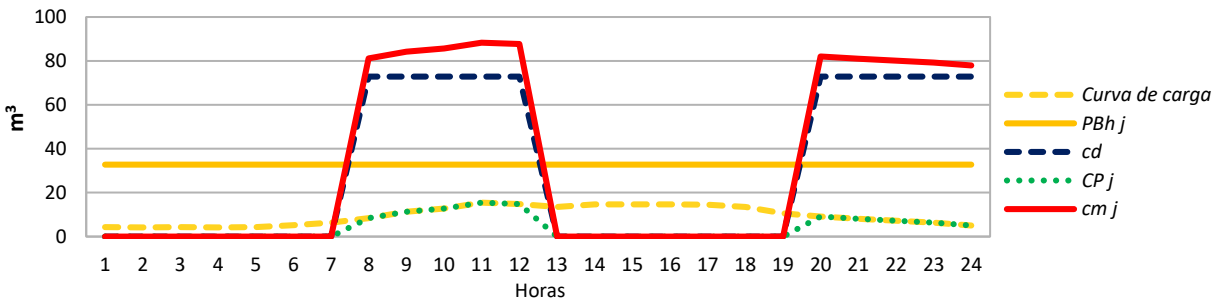
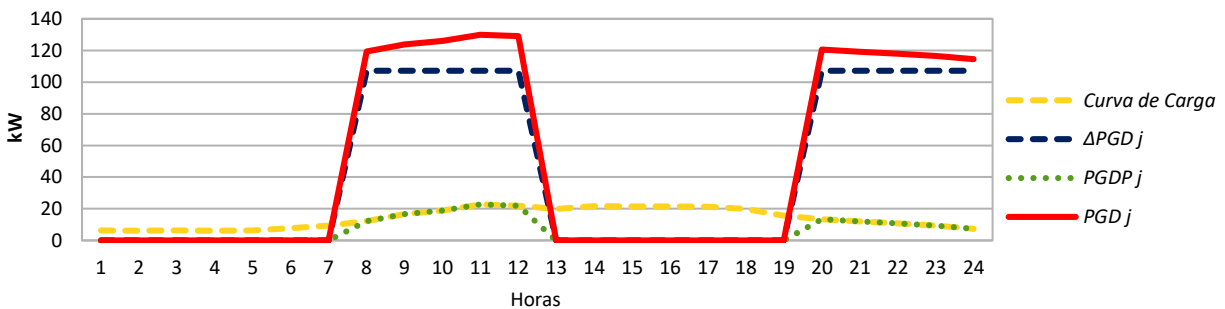


Figura 5.14 - Caso 7: Regime Operacional Multi patamar para GD





## 5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No estudo de caso realizado, aplicou-se o método de otimização para sistemas de armazenamento de energia a biogás de forma a obter sete possibilidades de ROM para GD. Destes, o Caso 1, Caso 2 e Caso 3 são baseados no Modelo 1 de ROM, e o Caso 4, Caso 5 e Caso 6 são baseados no Modelo 2 de ROM. O Caso 7 baseia-se no Modelo 1, porém com uma condição inicial diferente dos demais. A Tabela 5.9 apresentam alguns resultados obtidos para cada caso proposto.

Tabela 5.9 – Resultados dos Casos Estudados

ROM	$Cd$	$\Delta PGD$	Tamanho do bioESS	Períodos
Caso 1	68,25 m <sup>3</sup>	100,42 kW	497,64m <sup>3</sup>	15°-24°
Caso 2	70,09 m <sup>3</sup>	103,12 kW	309,54 m <sup>3</sup>	7°-10° 19°-24°
Caso 3	70,07 m <sup>3</sup>	103,09 kW	215,08 m <sup>3</sup>	5°-7° 13°-15° 21°-24°
Caso 4	55,89 m <sup>3</sup>	82,22 kW	373 m <sup>3</sup>	15°-24°
Caso 5	55,89 m <sup>3</sup>	82,22 kW	209,21 m <sup>3</sup>	7°-11° 20°-24°
Caso 6	55,82 m <sup>3</sup>	82,13 kW	158,69 m <sup>3</sup>	4°-6° 12°-14° 21°-24°
Case 7	72,68 m <sup>3</sup>	107,19 kW	309,32 m <sup>3</sup>	8°-12° 20°-24°

Analisando os resultados dos Casos 1, 2 e 3, pode-se verificar que os valores de  $cd$  e  $\Delta PGD$  tiveram uma pequena variação para um mesmo  $TD_{op}$ . Isto ocorre devido a variação da carga da propriedade nos períodos obtidos pelo método.

O Caso 3 possibilita uma distribuição do  $TD_{op}$  ao longo do dia, devido aos 03 intervalos de operação. Neste caso, a distribuidora obtém uma maior flexibilidade para o uso da GD, uma vez que os períodos em que a GD estará disponível para a distribuidora podem, por exemplo, auxiliar na complementação do uso de outros tipos de fontes de GD de geração intermitente. Além disso, se este método for utilizado para o planejamento do projeto da instalação da GD, adotando o ROM obtido pelo método de forma permanente, o caso 3 foi o que possibilitou o

uso de um bioESS de menor capacidade de armazenamento para uma mesma produção de energia elétrica quando comparado com as casos 1 e 2.

Os casos 4,5 e 6 resultaram em um  $\Delta PGD$  menor que nos casos 1,2 e 3. Isto se deve ao fato que nestes casos, a propriedade tornou-se autossuficiente em energia elétrica, acarretando uma destinação maior de biogás para atendimento da propriedade. Além da diferença no valor de  $\Delta PGD$  os períodos de disponibilidade da GD para a distribuidora também tiveram alteração.

O caso 7 foi realizado para demonstrar que se o  $E_0$  por algum motivo tornar-se maior do que o  $E_{mín}$ , como por exemplo, quando a GD parar para manutenção ou a distribuidora não utilizar a energia disponível para ela, o método permite ajustar um novo valor para  $\Delta PGD$ , para os próximos 24 períodos, de forma que  $e_f$  volte a ser igual ao  $E_{mín}$ , retornando assim as condições iniciais. Ou seja, é possível neste caso, estabelecer um valor maior de  $\Delta PGD$  em condições de excepcionalidade retornando para o próximo dia as condições iniciais estabelecidas de  $e_f = E_{mín}$ .

Portanto, de acordo com os resultados obtidos nos casos avaliados pode-se destacar que a metodologia proposta nesta Tese possui as seguintes características:

- Ajusta-se a qualquer tipo de curva de carga da propriedade e a qualquer tipo de curva de produção de biogás;
- Permite que a GD atenda toda ou parte da carga da propriedade;
- Possibilita determinar novos valores de potência reservada para a distribuidora, nos casos em que ocorrer um estoque inicial diferente do definido para o funcionamento em regime, garantindo o retorno às condições iniciais pré-estabelecidas para o próximo  $C_{pp}$ ;
- Determinar de forma prévia os horários em que a distribuidora poderá contar com esta energia, independente de variações das condições climáticas;
- Permite que a energia disponibilizada para a distribuidora possa ser distribuída durante o dia, de acordo o número de intervalos de operação estabelecidos, o que flexibiliza o seu uso para que a distribuidora possa planejar o aproveitamento desta energia na complementação de fontes de GD intermitentes;
- Possibilita a determinação do tamanho de bioESS quando se optar por utilizar um ROM permanentemente, e também a redução do bioESS nos casos em que se utilizar mais de um intervalo de operação da GD para a distribuidora;

- Permite que os horários de disponibilidade sejam alterados, uma vez que o método utiliza períodos, e para isso é possível que haja um deslocamento dos horários em relação aos períodos.



## 6 CONCLUSÕES

Esta Tese propôs o desenvolvimento de um método de otimização aplicável a sistemas de armazenamento de energia a biogás para determinar regimes operacionais para GDs que utilizam biogás como combustível.

A metodologia consiste em a GD utilizar o biogás armazenado para atender prioritariamente as cargas da propriedade produtora de biogás, e a partir da otimização do uso do estoque de biogás, obter o valor máximo de potência da GD possível de ser reservada para a distribuidora e os períodos em que poderá ser utilizada esta energia.

Para realizar a otimização do estoque de biogás utilizou-se a Programação Linear Inteira para o desenvolvimento da modelagem matemática do método proposto. Para tanto, foram consideradas as características de dois modelos de regimes operacionais, que serviram como base para obtenção dos resultados. Além destas, utilizou-se como parâmetros, fatores tais como: curva de carga da propriedade, produção de biogás, tempo de operação da GD e números de intervalos de operação. As características dos sistemas de armazenamento de energia a biogás foram utilizadas como subsídios para obter as restrições do modelo.

A metodologia proposta oferece funcionalidades para que possam ser realizados diversas simulações e estudos de regimes de operação para GD, tendo em vista que possui flexibilidade para utilização de qualquer tipo de curva de carga, curva de produção de biogás e vários tempos de operação para GD. Com isso, o método desenvolvido nesta Tese pode ser utilizado como uma ferramenta para auxiliar as distribuidoras de energia elétrica e os produtores de biogás tanto no planejamento quanto na operação deste tipo de GD,

Para o planejamento das distribuidoras, o método pode contribuir para que a distribuidora possa prever o quanto de energia está reservada para seu uso, e quais os períodos que esta energia está disponível, podendo aplicá-la na complementação de fontes renováveis de GD intermitentes e/ou não despacháveis, atendimento de microrredes, cargas sazonais conectadas no sistema de distribuição, etc. Já para o planejamento dos produtores de biogás, a metodologia proposta oferece funcionalidades para aquisição de dados de dimensionamento da GD e tamanho do bioESS, além de oferecer subsídios para que o produtor de biogás possa realizar o gerenciamento das cargas da propriedade, uma vez que este deve respeitar os valores da curva de carga informados no método para determinar o ROM da GD.

O método desenvolvido pode auxiliar na operação da GD nos casos em que houver, durante sua operação, alteração da curva de carga da propriedade e/ou estoque inicial de biogás para valores diferentes do previsto, pois permite calcular novos valores de potência disponível

para a distribuidora, ajustando-os para que ocorra o retorno às condições iniciais pré-estabelecidas no próximo dia. Também alterar os horários estabelecidos pelo método desde que haja um deslocamento de “horários versus períodos” dos valores da curva de carga e produção de biogás informados.

A metodologia proposta foi desenvolvida com intuito de contribuir para minimização de possíveis impactos negativos causados pelas fontes renováveis de GD nos sistemas de distribuição. Isto é possível devido as GDs com sistema de armazenamento de energia a biogás se diferenciarem das demais fontes renováveis, principalmente pelo fato do insumo para geração ser armazenado, e sua conversão em energia elétrica ocorrer somente quando necessário, podendo ser considerada uma fonte “firme”, uma vez que a produção e armazenagem de biogás independem de variações das condições climáticas.

Portanto, o conteúdo desta Tese pode incentivar a disseminação do uso de GDs com sistemas de armazenamento de energia a biogás, uma vez que o Brasil possui um grande potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo de dejetos de animais. Este tipo de fonte renovável de energia vem ao encontro da evolução dos sistemas de distribuição, no que se refere ao armazenamento de energia e às fontes de geração distribuída de energia elétrica.

## 6.1 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS DA TESE

Pode-se destacar como contribuições inovadoras desse trabalho, em relação aos sistemas de armazenamento e geração de energia elétrica a biogás:

- Método de otimização aplicável a sistemas de armazenamento de energia a biogás para determinar regimes operacionais para GDs que utilizam biogás como combustível;
- Incentivo ao uso dos sistemas de geração a biogás não apenas para geração de energia elétrica, mas como sistema armazenador de energia, visando contribuir na operação das redes de distribuição que possuam participação de gerações intermitentes.
- Metodologia para obtenção de regimes operacionais para fontes renováveis de geração distribuída a biogás, ajustável a qualquer tipo de curva de carga da propriedade produtora de biogás e curva de produção de biogás;

- Aplicação de sistemas de armazenamento de energia a biogás para o uso integrado entre propriedade produtora de biogás e distribuidora de energia elétrica, através da reserva de parte do potencial de geração da GD para a distribuidora em períodos pré-estabelecidos, independente de variações das condições climáticas.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta Tese identificou os seguintes trabalhos para serem empreendidos no futuro:

- Expansão das restrições do modelo considerando custos de implementação, operação e manutenção assim como tarifas de energia elétrica para obter novos períodos de disponibilidade de energia reservada para a distribuidora;
- Aplicação da metodologia como uma funcionalidade em sistemas de supervisão de geração distribuída a biogás;
- Ampliação da metodologia desenvolvida para qualquer tipo de fonte renovável de GD com sistemas de armazenamento de energia.

## 6.3 PUBLICAÇÕES

Publicações em Congressos Internacionais:

1. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L.N.; ABAIDE, A.; MARTINS, L. F.; DE CARLI, M. **Fuzzy based expert system for renewable energy management**. CIRED Workshop on Challenges of implementing active distribution system management. 2014, Rome, Italy.
2. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L.N.; ABAIDE, A.; DE CARLI, M.; SANTOS, A.C. **Analysis of the distributed generation for ancillary services support in distribution networks**. Power Engineering Conference (UPEC) - 49th International Universities, pp: 1 - 5, DOI: 10.1109 / UPEC.2014.6934594 September 02th to 05th, 2014. Cluj-Napoca, Romênia.
3. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L. N.; FARIAS, C.; COSTA, D.; AZEVEDO, R.; DE CARLI, M. **Impactos da Conexão de Fontes Renováveis Descentralizadas em Sistemas de**

**Distribuição.** 11<sup>th</sup> IEEE/IAS INDUSCON - International Conference on Industry Applications, December 07th to 10th, 2014, Juiz de Fora, Brasil.

4. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L. N.; COSTA, D.; AZEVEDO, R. **Modelo dinâmico do sistema de geração de microturbina para conexão com a rede e conexão isolada no PSCAD®.** 11<sup>th</sup> IEEE/IAS INDUSCON - International Conference on Industry Applications, December 07th to 10th, 2014. Juiz de Fora, Brasil.

5. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L. N.; DE CARLI, M.; **Application of M-Macbeth for defining an efficient operating regime of distributed generation sources connected to distribution network.** 50<sup>st</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp: 1- 5, DOI: 10.1109 / UPEC.2015.7339801, September 01th to 04th, 2015 Stoke on Trent, UK.

6. BRIGNOL, W.;CANHA, L. N.; AZEVEDO, R. ; BARIN, A. ; MAGUERROSKI, D. **Diversification of Brazilian energy matrix by connecting distributed generation sources fuelled by biogas from swine manure.** 51<sup>st</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, Coimbra - Portugal.

7. BRIGNOL, W.;CANHA, L. N.; AZEVEDO, R.; MAGUERROSKI, D. **Commercial Arrangement Model for a Distributed Generation Connection Considering Several Agents.** 51<sup>st</sup> International Universities Power Engineering Conference - UPEC 2016, Coimbra - Portugal.

8. BRIGNOL, W.;CANHA, L. N.; AZEVEDO, R. ; MAGUERROSKI, D. **Operational Impact of the Complementarity Between Photovoltaic Solar and Biogas Generation Sources on Distribution Network Systems.** 51<sup>st</sup> International Universities Power Engineering Conference - UPEC 2016, 2016, Coimbra - Portugal.

#### Publicações em Congressos Nacionais

1. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L. N.; DE CARLI, M.; SANTOS, A.C. **Diversificação da matriz energética a partir da conexão de fontes de geração distribuída abastecidas com biogás de dejetos suínos.** IX CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 25 a 27 de Agosto, 2014. Florianópolis, Brasil.

2. BRIGNOL, W.; CANHA, L. N.; COSTA, D.; AZEVEDO, R. **Análise computacional dos impactos causados pela inserção da microturbina na rede elétrica de distribuição como geração distribuída.** IX CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 25 a 27 de Agosto, 2014. Florianópolis, Brasil.

3. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L. N.; DE CARLI, M.; SANTOS, A.C. **Definição de regimes operacionais de fontes de geração distribuída através da aplicação do método multicritério de tomada de decisão MacBeth.** 8<sup>o</sup> Seminário de Eletrônica de Potência e



Controle (SEPOC) e 2º Seminário de Energia e Sistemas de Potência (SESP) - Redes Elétricas Inteligentes: Integrando Eletrônica de Potência e Sistemas de Potência. 24 a 27 de Agosto, 2014. Santa Maria, Brasil.

4. BRIGNOL, W.; CANHA, L. N.; AZEVEDO, R. ; CARLI, M. . **Modelo de arranjo comercial para conexão da micro e minigeração distribuída a biogás de suínos no cenário nacional.** XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE 2015, Foz do Iguaçu, Brasil.

5. BRIGNOL, W.; AZEVEDO, R. ;CANHA, L. N.; MAGUERROSKI, D. **Impactos operacionais da complementariedade de fontes de geração solar fotovoltaica e a biogás em sistemas de distribuição.** X CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2016, Gramado, Brasil.

#### Publicações em Revistas

1. BRIGNOL, W.; BARIN, A.; CANHA, L. N.; DE CARLI, M.; SANTOS, A.C. **Diversificação da matriz energética a partir da conexão de fontes de geração distribuída abastecidas com biogás de dejetos suínos.** Revista Brasileira de Energia, volume 21, nº01 - 2015;

2. BRIGNOL, W.; AZEVEDO, R.; CANHA, L. N.; MAGUERROSKI, D. **Impactos operacionais da complementariedade de fontes de geração solar fotovoltaica e a biogás em sistemas de distribuição.** Revista Brasileira de Energia – RBE Vol. 23, nº 2, 2º Trim. 2017;

#### 6.4 PREMIAÇÕES

1. **Prêmio de Melhores Artigos Apresentados no IX CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, 2014 com o Artigo Intitulado: Diversificação da matriz energética a partir da conexão de fontes de geração distribuída abastecidas com biogás de dejetos suínos;
2. **Certificado de Reconhecimento do Mérito** – Emitido pela a Universidade Federal de Santa Maria, Junho de 2015;
3. **Prêmio de Melhores Artigos Apresentados no X CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, 2016 com o Artigo Intitulado: Impactos operacionais da complementariedade de fontes de geração solar fotovoltaica e a biogás em sistemas de distribuição.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEMANHA - **Renewable Energy Sources Act – EEG**. Outubro de 2009. Disponível em: [http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/eeg\\_2009\\_en\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/eeg_2009_en_bf.pdf).

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. Dissertação Mestrado. Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

ALVES, R. et al. Geração de energia elétrica com biogás: um caso prático na suínocultura. **1º SAEP – Semana Acadêmica Engenharia de Produção**. Faculdade Horizontina, 2010.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**, Revisão 6, 2015a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> Acesso em: nov. 2016.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição**, Revisão 1, 2010b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> Acesso em: nov. 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> Acesso em: nov. 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 414 - Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada**, 2010a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> Acesso em: dez. 2014.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482 - Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica**, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> Acesso em: jul. 2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687 - Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST**, 2015b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> Acesso em: dez. 2015.

ARAPONGAS. **Tecnologia mecânica**, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em <http://www.gasbrasil.com.br/noticia/arquivos/ARAPONGAS%20MOTORES%20ESTACION%20C3%81RIOS%20A%20G%20C3%81S.pdf>. Acesso em: Outubro, 2014.

ASADINEJAD, A. et al. **Economic analysis of wind and CAES hybrid system using biomass based energy storage** - IEEE North American Power Symposium (NAPS), 2016 - Conference: 18-20 Sept. 2016.

ATB - LEIBNIZ-INSTITUTE FOR AGRICULTURAL ENGINEERING POTSDAM-BORNIM. **Country Report, Germany** - IEA Bioenergy Task 37, Berlin, Germany October 29-30, 2015. Disponível em: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html?file=files/datenredaktion/download/publications/germany2015>. Acesso em: mai 2017.

BAKER, K.; HUG, G.; XIN LI. **Energy storage sizing taking into account forecast uncertainties and receding horizon operation**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 8, n. 1, p. 331-340, jan. 2017. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2599074

BARIN, A. **Seleção de sistemas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem com a lógica difusa** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2012.

BARRERA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. p 106, 2º ed. São Paulo, 2003.

BRASIL, **Decreto nº 5.163**: regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, 2004. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-006/2004/decreto/d5163.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-006/2004/decreto/d5163.HTM)> Acesso em: outubro, 2014

BRIGNOL, W. et. al. **Diversification of Brazilian energy matrix by connecting distributed generation sources fuelled by biogas from swine manure**. 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, Coimbra - Portugal.

BRIGNOL, W. et. al. **Impactos operacionais da complementariedade de fontes de geração solar fotovoltaica e a biogás em sistemas de distribuição**. Revista Brasileira de Energia – RBE Vol. 23, nº 2, 2º Trim. 2017.

BRIGNOL, W. **Contribuições à identificação de regimes operacionais de centrais geradoras a biogás de aterros sanitários conectadas à rede**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2013.

BRITES, O; GAFEIRA, T. **Biogás Planejamento e Produção de Electricidade**. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Universidade de Coimbra, 2007. Disponível em: <https://woc.uc.pt/deec/getFile.do?tipo=2&id=5681>, Acesso em: abr. 2013.

BWMI - FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY. **Renewable Energy Sources in Figures National and International Development, 2015**. Public Relations 11019 Berlin, 2015 p.9. Disponível em: [http://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=13](http://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/renewable-energy-sources-in-figures.pdf?__blob=publicationFile&v=13). Acesso em: mai 2017.

CENBIO - CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA: **Conceituando biomassa**. São Paulo, 2012. Disponível em <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/conceituando.htm>>. Acesso em: Dez. 2013.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel – PR, 2004.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás: Independência energética do pantanal Mato-grossense.** EMBRAPA, circular técnica n. 9, Corumbá-MS, Out. 1981.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2006.

DE BONA, F. S.; FILHO, E. R. **As Microturbinas e a Geração Distribuída,** Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%2053.pdf>. Acesso em: out. 2013

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogás from waste and renewable resources: an introduction.** Weinhein-Germany: Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

DEVLIN, J. et al. **System flexibility provision using short term grid scale storage.** IET Generation, Transmission & Distribution, v. 10, n. 3, p. 697 – 703, mar. 2016. DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.0460

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Anuário Estatístico – Suinocultura e Avicultura.** Central de Inteligência da Embrapa Suínos e Aves. Embrapa Suínos e Aves Concórdia, SC, 2014 Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/cias/dados/mapa.php> Acesso em: dez. 2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA: **Anuário estatístico de energia elétrica 2016.** Disponível em: <http://www.epe.gov.br> Acesso em: fev. 2017.

ESSACKJEE I. A.; AH KING R. T. F. **The impact of increasing Penetration Level of Small Scale Distributed Generations on voltage in a secondary distribution network -** IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech), pp. 245-250, Balaclava, 2016.

FERRAZ, J.M.G; MARIEL, I.E. **Biogás, uma fonte alternativa de energia.** Brasil. 1980, p.27

GERMAN RENEWABLE ENERGIES AGENCY. **Information Platform.** Renewables 2012 Global Status Report . Paris, 2012. Disponível em: <http://www.unendlich-viel-energie.de/en/homepage.html>. Acesso em: jun. 2014

GREENWOOD D. et al. **A Probabilistic Method Combining Electrical Energy Storage and Real-Time Thermal Ratings to Defer Network Reinforcement.** IEEE Transactions on Sustainable Energy v. 8 , Issue: 1, p. 374 – 384, jan. 2017. DOI:10.1109/TSTE.2016.2600320.

HADI, K. et al. **Transmission Congestion Relief Using Privately Owned Large-Scale Energy Storage Systems in a Competitive Electricity Market.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 31, n. 2, p. 1449 -1458, mar. 2016. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2414937.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Pesquisa Agropecuária Municipal**, 2015, disponível <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939#resultado>. Acesso em: mai. 2017.

ICLEI. **Governos Locais pela Sustentabilidade - Manual para aproveitamento do biogás**: v. 1, Aterros Sanitários - São Paulo, SP, 2009.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: **Topics Bioenergy**, 2013 Disponível em: <http://www.iea.org/topics/bioenergy/> Acesso em: fev. 2015.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P.A.; **Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás**. Revista de Política Agrícola. v.15, n° 3, 2006.

LAI, C. S.; MCCULLOCH, M. D. **Sizing of Stand-Alone Solar PV and Storage System with Anaerobic Digestion Biogas Power Plants** - IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 64, Issue: 99 p. 2112 – 2121, nov. 2016.DOI 10.1109/TIE.2016.2625781

LUCAS JÚNIOR, J.; SOUZA, C. F. **Construção e operação de biodigestores**. Viçosa-MG, CTP, 2009.

LUENBERGER, D.G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming (International Series in Operations Research & Management Science)**, Springer, 4th edition, jun. 2015.

LUKERHURST, C. T. **UK Country Report**. IEA Bioenergy Task 37, 2015. Disponível em: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html?file=files/datenredaktion/download/publications>. Acesso em: fev. 2017

MALFA, E., **ABB on Sustainable Energy Markets**, Università di Brescia, 2002

MANABE, T.; HARA, R. **Cooperative control of energy storage systems and biogas generator for multiple renewable energy power plants** – IEEE Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014, p.18-22 Aug. 2014.

MARTINS V. F.; BORGES C. L. T. **Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties**. IEEE Transactions on Power System., v. 26, n. 4, p. 2164–2172, nov. 2011. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2122347

MOSEY F.E. **Mathematical modelling of the anaerobic digestion process: regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose**. Water ScienceTechnology V.15, p. 209-232, 1983.

METCALF; EDDY. INC. **Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse**. 4. ed. New York, McGraw., 2003. - Hill Book, 1815p.

MITCHEL, J. **Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization Problems**. Mathematical Sciences Rensselaer Polytechnic Institute Troy, NY, USA April , 1999.

NAN LI, et al. **Flexible Operation of Batteries in Power System Scheduling With Renewable Energy**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 7, Issue: 2, p. 685 – 696, april. 2016, DOI: 10.1109/TSTE.2015.2497470

NAZARO, M. S. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para processamento de resíduos sólidos orgânicos**. 2016. 28p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016. Disponível: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166781/TCC%20-%20Mariane%20Scheffer%20Nazaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

NNFCC - National Non Food Crops Centre. **Anaerobic Digestion Deployment in the UK**, York: April 2017. Disponível em: <http://www.nnfcc.co.uk/report-anaerobic-digestion-deployment-in-the-uk>. Acesso em: mai, 2017.

NOGUEIRA. L.A.H. **Biodigestão: A alternativa energética**. São Paulo, Nobel , 1986

PAVITHRA H.; MUNTHERR D. **Optimal Management and Sizing of Energy Storage Under Dynamic Pricing for the Efficient Integration of Renewable Energy**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 30 , n. 3, pp. 1164 – 1181, may 2015. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2344859

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

PROBIOGÁS - **Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás** - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), ed. 5, Gülzow, 2010.

RAHBARI-ASR, N.; ZHANG, Y.; CHOW, M. **Consensus-based distributed scheduling for cooperative operation of distributed energy resources and storage devices in smart grids**. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 10, Issue: 5, p. 1268 – 1277, April 2016. DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.0159

REN21 – Renewable Global Status Report. **Biomass Energy**, 2017. Disponível em: [http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter\\_02/chapter\\_02/#bioenergy-markets](http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_02/chapter_02/#bioenergy-markets). Acesso em: mai, 2017.

SALEHIN, S. et al. **Optimized Model of a Solar PV-Biogas-Diesel Hybrid Energy System for Adorsho Char Island, Bangladesh** - Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2014 3rd IEEE International Conference, 29-31 May 2014.

SANTOS, P. **Guia técnico de biogás**. CCEE- Centro para a conservação de energia, Portugal, 2000.

SANTOS S. F. et al. **Impacts of Operational Variability and Uncertainty on Distributed Generation Investment Planning: A Comprehensive Sensitivity Analysis** IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. PP, n.99, p.1-1. nov. 2016. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2624506

SATTLER; CENO-TEC. **Gasómetro para biogás – Manual de características técnicas de Gasómetros**, Germany, 2016. disponível em: <http://www.sustpro.com/upload/1734/documents/355/catalogo%20gasometros%20Sattler.pdf>

SGANZERIA, E. **Biodigestor; uma solução**. Agropecuária, Porto Alegre, 1983.

SGF - SUPERINTENDÊNCIA DE FISCALIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DE GERAÇÃO DA AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Banco de Informações da Geração, 2017**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: mai. 2017.

SHIH M. Y et al. **Mitigating the impact of distributed generation on directional overcurrent relay coordination by adaptive protection scheme**. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1-6, Florence, 2016.

SOUZA, C. F. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: obtenção de dados e aplicação no desenvolvimento de um modelo dinâmico de simulação da produção de biogás**. 2001. 140p. Tese (Doutorado em Zootecnia - Produção Animal) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, 2001.

SOUZA, J. **Contribuição para um Método de Dimensionamento de Plantas de Biogás**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre , RS, 2015.

STEMAC - Grupos Geradores: **Catálogo Grupo Geradores à Gás e biogás, 2013**. Disponível em: <http://www.stemac.com.br/pt/produtos/documents/lamina%20comercial%20-%20g%C3%A1s%20e%20biog%C3%A1s.pdf>. Acesso em: nov. 2015.

SVENSSON, M. **Country Report Suécia**. IEA Bioenergy Task 37, 2015. Disponível em: [http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/countryreports/2015/Sweden\\_Country\\_Report\\_Berlin\\_10-2015.pdf](http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/countryreports/2015/Sweden_Country_Report_Berlin_10-2015.pdf). Acesso: fev. 2017.

THAPA S., KARKI R. **Reliability benefit of energy storage in wind integrated power system operation**. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 10, Issue: 3, p. 807 – 814, mar 2016. DOI: 10.1049/iet-gtd.2015.0162

TOORIAN, H.; NOURIAN, S. **Analysis and modeling of the distributed generation impact on electricity market prices**. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1-6.

WANG, L.; LIN, P. **Analysis of a Commercial Biogas Generation System Using a Gas Engine–Induction Generator Set**. IEEE IEEE Transactions on Energy Conversion , v.24, p. 230 – 239, Issue: 1, mar de 2009. DOI: 10.1109/TEC.2008.2006554

WANG, S.; HAN, L.; WU, L. **Uncertainty Tracing of Distributed Generations via Complex Affine Arithmetic Based Unbalanced Three-Phase Power Flow**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 30, n. 6, p. 3053-3062, nov. 2015. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2377042.



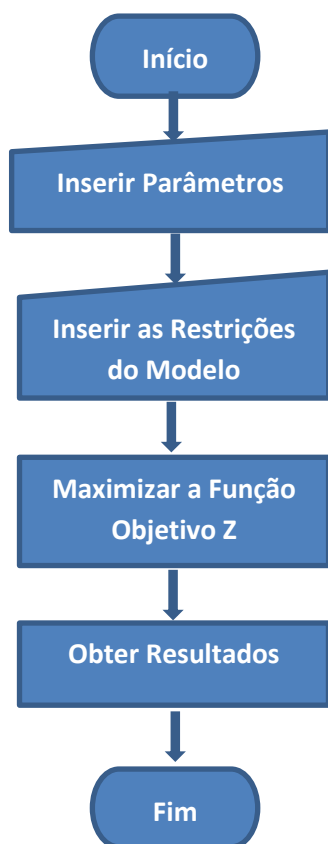
## **APÊNDICES**



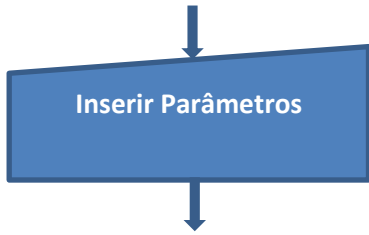
## APÊNDICE A – PASSO À PASSO PARA MODELAGEM DO ROM COM O USO DO *Ms OpenOffice Calc*.

Para se obter os resultados através do método de otimização proposto nesta Tese, faz-se necessário seguir os passos para utilização da ferramenta computacional desenvolvida, conforme apresentado no fluxograma a seguir:

Figura 1 – Fluxograma do Passo à Passo para o Uso da Ferramenta Computacional



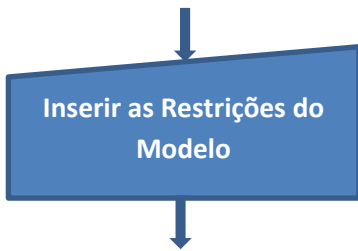
**Inserir Parâmetros**



Parâmetros		
Número máximo de períodos	<i>Np</i> =	24
Estoque inicial	<i>Ei</i> =	39
Produção de biogás	<i>PB</i> =	786
Estoque mínimo	<i>Emi</i> =	39
Tempo de operação mínimo de GD p/distr	<i>TD op. min</i>	2
Tempo de operação máximo de GD p/distr	<i>TD op. max</i>	10
Número de interv. de oper. da GD p/ distr	<i>Nio</i> =	2
Constante de ajuste das restrições	<i>M</i> =	189036

Parâmetros	
Biogás/h	Cprop. c
-	-
32,76	4,26522
32,76	4,170435
32,76	4,265222
32,76	4,170439
32,76	4,265222
32,76	5,213049
32,76	6,350441
32,76	8,340878
32,76	11,279141
32,76	12,795665
32,76	15,449580
32,76	14,880884
32,76	13,553926
32,76	14,691319
32,76	14,596536
32,76	14,501753
32,76	13,459144
32,76	10,615663
32,76	9,099139
32,76	8,151317
32,76	7,298268
32,76	6,350441
32,76	5,021483

**Inserir Restrições do Modelo**

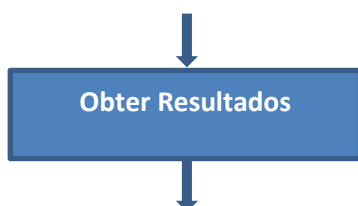


**Maximizar a Função Objetivo Z**



Função Objetivo	Maximizar Z= -9213,6976		
Consumo MP para distribuidora	$cd = 70,0935569$	0,02	P1
Somatório do Estoque	$Soma e_{(j)} = -3894,9424$	0,02	P2
Estoque final	$e_f = -39$	0,9	P3
Somatório dos inícios de interv. De oper.	$Soma i_{(j)} = -2$	0,02	P4

## Obter Resultados



REGIME OPERACIONAL GD À BIOGÁS									
Hora	Biogás (Nm3)		Consumo máquina Primária (Nm3)			Gasômetro	Potência GD (kW)		
	Pbiogás/h	Curva de carga	$C_{prop.}$	$C_{distr.}$	$C_{mp}$	Estoque E(j)	$P_{GD prop.}$	$P_{GD distr.}$	$P_{GD}$
1	32,76	4,27	-	-	-	71,76	-	0,00	0,00
2	32,76	4,17	-	-	-	104,52	-	0,00	0,00
3	32,76	4,27	-	-	-	137,28	-	0,00	0,00
4	32,76	4,17	-	-	-	170,04	-	0,00	0,00
5	32,76	4,27	4,27	70,07	74,34	128,46	6,27	103,09	109,37
6	32,76	5,21	5,21	70,07	75,29	85,93	7,67	103,09	110,76
7	32,76	6,35	6,35	70,07	76,43	42,27	9,34	103,09	112,44
8	32,76	8,34	-	-	-	75,03	-	0,00	0,00
9	32,76	11,28	-	-	-	107,79	-	0,00	0,00
10	32,76	12,80	-	-	-	140,55	-	0,00	0,00
11	32,76	15,45	-	-	-	173,31	-	0,00	0,00
12	32,76	14,88	-	-	-	206,07	-	0,00	0,00
13	32,76	13,55	13,55	70,07	83,63	155,20	19,94	103,09	123,03
14	32,76	14,69	14,69	70,07	84,77	103,19	21,61	103,09	124,71
15	32,76	14,60	14,60	70,07	84,67	51,28	21,47	103,09	124,57
16	32,76	14,60	-	-	-	84,04	-	0,00	0,00
17	32,76	14,50	-	-	-	116,80	-	0,00	0,00
18	32,76	13,46	-	-	-	149,56	-	0,00	0,00
19	32,76	10,62	-	-	-	182,32	-	0,00	0,00
20	32,76	9,10	-	-	-	215,08	-	0,00	0,00
21	32,76	8,15	8,15	70,07	78,23	169,62	11,98	103,09	115,09
22	32,76	7,30	7,30	70,07	77,37	125,00	10,74	103,09	113,83
23	32,76	6,35	6,35	70,07	76,43	81,34	9,34	103,09	112,44
24	32,76	5,02	5,02	70,07	75,10	39,00	7,39	103,09	110,48

Períodos para a distribuidora

Tamanho do bioESS

Potência p/ Distribuidora

Potência GD