

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SELEÇÃO E OPERAÇÃO ÓTIMA DE TECNOLOGIA PARA O
APROVEITAMENTO DE BIOGÁS NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

JESSICA MARQUES BINOTTO

FOZ DO IGUAÇU
2017

Jessica Marques Binotto

**Seleção e Operação Ótima de Tecnologia para o Aproveitamento
de Biogás na Geração de Energia Elétrica**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Cayetano Lotero

Foz do Iguaçu
2017

Catálogo na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UNIOESTE

B614 Binotto, Jessica Marques
Seleção e operação ótima de tecnologia para o aproveitamento de
biogás na geração de energia elétrica / Jessica Marques Binotto.--
Foz do Iguaçu, 2017.
85 p. tab. : gráf.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Cayetano Lotero
Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Enge-
nharia Elétrica e Computação - Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.

1. Energia elétrica– Fontes alternativas. 2. Recursos energéticos –
Planejamento. 3. Biogás – Utilização – Avaliação. I. Título.

CDU 621.311.25
620.95

Miriam Fenner R. Lucas - CRB-9/268

Seleção e Operação Ótima de Tecnologia para o Aproveitamento de Biogás na Geração de Energia Elétrica

Jessica Marques Binotto

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 24/03/2017

Prof. Dr. **Roberto Cayetano Lotero** – (Orientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Prof. Dr. **Adriano Batista de Almeida**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Prof^a. Dr. **Suani Teixeira Coelho**
Universidade de São Paulo - USP

Resumo

A utilização de resíduos orgânicos para geração de energia elétrica de maneira distribuída é uma alternativa que precisa ser cuidadosamente avaliada, devido às várias vantagens relacionadas a esse processo. Especificamente, a pecuária intensiva é uma atividade que resulta em grande geração de resíduos com elevado poder poluidor, sendo seu tratamento obrigatório por lei, o qual, se realizado por meio do processo anaeróbico controlado, gera biogás. Devido ao seu elevado poder calorífico, o biogás pode ser utilizado como fonte primária para a geração de energia elétrica, sendo necessária a avaliação de forma conjunta dos benefícios ambientais, sociais, políticos e econômicos. O Planejamento Integrado de Recursos (PIR) surge como uma ferramenta adequada para realizar tal avaliação, considerando todos os bônus e ônus envolvidos. Nesse sentido, este trabalho analisa a utilização de biogás como fonte primária para a geração de energia elétrica em uma propriedade rural localizada na região oeste do estado do Paraná, sob a ótica do PIR. Para a avaliação econômica, um modelo matemático foi desenvolvido, considerando o VaR (*Value at Risk*) como medida do risco ao qual o investidor está sujeito, devido à incerteza da demanda e da produção de biogás. As simulações foram realizadas utilizando, como caso de estudo, uma propriedade rural hipotética, considerando o VaR com um nível de confiança de 95%. O modelo desenvolvido, aliado aos critérios de valoração propostos pelo PIR, mostrou-se como ferramenta adequada para apontar os benefícios da utilização do biogás como recurso energético.

Palavras-chave: Planejamento integrado de recursos (PIR), incertezas, biogás, VaR.

Abstract

The use of organic waste to generate electricity in a distributed way is an alternative that needs to be carefully evaluated due to the various advantages related to this process. Specifically, intensive livestock farming is an activity that results in high generation of waste with high pollutant power, whose treatment is mandatory by law and, if carried out through the controlled anaerobic process, generates biogas. Due to its high calorific value, biogas can be used as a primary source for the generation of electric energy, which requires the joint evaluation of environmental, social, political and economic benefits. The Integrated Resource Planning (IRP) appears as an adequate tool to carry out such an evaluation, considering all the bonuses and onuses involved. In this sense, this work analyzes the use of biogas as a primary source for generation of electric power in a rural property located in the western region of the state of Paraná, under the IRP perspective. For the economic evaluation, a mathematical model was developed, considering the VaR (Value at Risk) as a measure of the risk to which the investor is subject due to the uncertainty of the demand and the production of biogas. The simulations were performed using a hypothetical rural property considering a VaR with a confidence level of 95%. The developed model, together with the evaluation criteria proposed by the IRP, was an adequate tool to point out the benefits of using biogas as an energy resource.

Keywords: Integrated resources planning (IRP), uncertainties, biogas, VaR.

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, pelo exemplo de caráter, responsabilidade e dedicação que é para mim, e pelo seu amor. Serei eternamente grata e orgulhosa da sua batalha diária para propiciar o melhor para mim e para meus irmãos.

Agradeço aos meus irmãos e ao meu padrasto, por serem um apoio sólido, uma fonte de ideias, dicas, opiniões, críticas e soluções para os meus problemas. Obrigada por abraçarem as minhas ideias e por serem o meu alicerce para chegar até aqui.

Agradeço à minha avó, por tudo o que me ensina a ser e a não ser. Sou grata pelo amor que você sente por mim, e retribuirei sempre, te ajudando como for possível.

Agradeço ao meu namorado, João Paulo, por ser a pessoa que é e por me ajudar a ser melhor a cada dia. Todas as reclamações e monólogos da minha parte foram ouvidos com muita paciência e rebatidos com muito amor.

Agradeço aos amigos que me acompanham na vida – e desta vez não seria diferente: Adnan, Aline, Gisele e Mariana. Saber que posso contar com vocês faz qualquer mestrado ser fácil.

Agradeço ao meu orientador, professor Lotero, por todo o conhecimento compartilhado e por me guiar de maneira inspiradora.

Agradeço aos meus colegas de mestrado, pela companhia e pela parceria nesse processo.

Agradeço à Fundação PTI, pelo apoio financeiro nesses 24 meses, e aos demais professores do PGEEC, por todas as dúvidas sanadas.

Por fim, agradeço a Deus, por ter colocado todas essas pessoas maravilhosas na minha vida; sem isso, eu não teria sido capaz de finalizar esta etapa. Obrigada!

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Agradecimentos	ix
Sumário	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Símbolos.....	xvii
Lista de Siglas	1
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura do trabalho	5
Capítulo 2 Biogás.....	7
2.1 Perspectivas sobre o Biogás no Brasil.....	8
2.2 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.....	9
2.3 Cadeia Produtiva para Obtenção do Biogás	10
2.3.1 Resíduos	10
2.3.2 Tratamento dos Resíduos para Obtenção de Biogás	11
2.3.3 Características do biogás	16
2.3.4 Processos de Purificação do Biogás	17
2.4 Tecnologias de Conversão	19
2.5 Legislação Básica Aplicável	20
2.6 Conclusões	21

Capítulo 3	Planejamento Integrado de Recursos.....	23
3.1	Características do PIR	23
3.2	Estrutura do PIR	25
3.2.1	Ranqueamento dos Recursos Energéticos.....	27
3.2.2	Exemplo de Aplicação do PIR	33
3.3	Análise da Utilização do Biogás como Fonte de Geração.....	34
3.4	Conclusões.....	40
Capítulo 4	Modelo matemático	41
4.1	Função Objetivo	42
4.2	Balanco Energético e Operação da Unidade	46
4.3	Produção, Armazenamento e Consumo do Biogás.....	47
4.4	Incerteza e risco.....	48
4.4.1	Árvore de cenários de duas etapas	49
4.4.2	Perfil do investidor frente ao risco	50
4.4.3	Medidas de Risco	51
4.5	Modelo matemático estocástico.....	52
4.6	Incorporação da medida de risco VaR no modelo matemático	55
4.7	Conclusões.....	59
Capítulo 5	Resultados	61
5.1	Interface.....	61
5.2	Dados de Entrada.....	63
5.3	Caso base	67
5.4	Caso A	71
5.5	Caso B	73
5.6	Caso C	75
5.7	Conclusões.....	76
Capítulo 6	Conclusões.....	77
Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática de um RAFA. Fonte: (Lima & Passamani, 2012).	13
Figura 2 - Biodigestor do modelo indiano. Fonte: Adaptada pela autora (CETESB, 2006). ...	14
Figura 3 - Biodigestor do modelo chinês Fonte: Adaptado pela autora (FAO, 1986).	15
Figura 4 - Biodigestor do modelo tubular. Fonte: Adaptado pela autora (Energizar, 2016). ...	15
Figura 5 - Diagrama esquemático das etapas básicas do PIR. FONTE: Baseado em Maruyama (2013).	26
Figura 6 – Processo de valoração dos recursos energéticos em determinada região. Fonte: Adaptada de Fujii (2006).	28
Figura 7 - Diagrama esquemático da ferramenta computacional desenvolvida. Fonte: Lotero e Colombari (2015).	42
Figura 8 - Árvore de cenários de duas etapas. Fonte: Alabedin (2012).	50
Figura 9 – Valor em risco (VaR).	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Processos de dessulfurização. Fonte: FAO (2010).....	18
Tabela 2 - Atributos selecionados e separados em dimensões. Fonte: Baseado em Fujii (2006).....	29
Tabela 3 - Sugestão de escalas e notas. Fonte: Fujii (2006).....	32
Tabela 4 - Atributos, notas e pesos da dimensão ambiental.....	34
Tabela 5 - Atributos, notas e pesos da dimensão técnico-econômica.	36
Tabela 6 - Atributos, notas e pesos da dimensão social.	37
Tabela 7 - Atributos, notas e pesos da dimensão política.....	39
Tabela 8 - Dados de entrada do investidor.	64
Tabela 9 - Tarifas de energia elétrica.	64
Tabela 10 - Dados das tecnologias de geração disponíveis. Fonte: Orçamentos das empresas Leão Energia e Grupo Fockink.....	66
Tabela 11 - Cenários possíveis devido à consideração das incertezas relativas à demanda e à produção de biogás.	67
Tabela 12 – Custos dos cenários e valor esperado do caso base.	68
Tabela 13 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso A1 considerando o preço da venda de energia de R\$ 150,00 por MWh.....	71
Tabela 14 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso A2 considerando o preço da venda de energia de R\$ 120,00 por MWh.....	72
Tabela 15 - Comparação entre o caso base, caso A1 e caso A2 devido a variação do preço da venda de energia excedente.	73
Tabela 16 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso B1 considerando o custo de investimento do biodigestor como R\$ 100.000,00.....	73
Tabela 17 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso B2 considerando o custo de investimento do biodigestor como R\$ 150.000,00.....	74
Tabela 18 - Comparação entre o caso base, caso B1 e caso B2 devido à variação do custo de investimento do biodigestor.	75
Tabela 19 – Valores obtidos da simulação do Caso C.	76

Lista de Símbolos

Conjuntos e índices do modelo matemático

<i>DIA</i>	Índice com os tipos de dias (semana e final de semana)
<i>FDS</i>	Subíndice de DIA que representa os dias do final de semana
<i>H</i>	Índice com as 24 horas do dia
<i>HF</i>	Subíndice de H que representa as horas fora de ponta
<i>HP</i>	Subíndice de H que representa as horas de ponta
<i>I</i>	Índice das alternativas de investimento
<i>MES</i>	Índice dos meses do ano
<i>NA</i>	Número de alternativas de investimento
<i>NT</i>	Número de anos do horizonte no qual é realizada a análise de investimentos
<i>SEM</i>	Subíndice de DIA que representa os dias da semana

Parâmetros do modelo matemático

α	Nível de confiança
<i>BIODIGEST</i>	Custo de investimento do biodigestor
<i>BPRO</i>	Quantidade de biogás produzida por hora
<i>CAPMAX</i>	Máxima capacidade de armazenamento de biogás
C_{CH_4}	Poder calorífico do metano
$CINV_I$	Custo de investimento da unidade de geração de energia elétrica I
$CMOF_I$	Custo fixo de operação e manutenção da alternativa I
$CMOV_I$	Custo variável de operação e manutenção da alternativa I
δ_S	Vetor de variáveis binárias auxiliares
DMF_S	Demanda que seria contratada sem geração distribuída fora de ponta
DMP_S	Demanda que seria contratada sem geração distribuída no horário de ponta
i	Taxa de remuneração que representa o custo de oportunidade do investidor
K_{CO_2}	Valor pago por cada tonelada de carbono queimada
M	Constante de valor elevado
$MAXCAP_I$	Capacidade máxima da unidade I
η_I	Rendimento da unidade I
ρ_{CH_4}	Densidade do metano
P_S	Probabilidade de ocorrência de cada cenário S
$PDEM_{MES,DIA,H}$	Consumo de energia do consumidor
$QUANTD_{DIA}$	Quantidade de dias para cada índice DIA

$SVar$	Limite mínimo para o valor esperado
$TARIFA_{MES,H}$	Tarifa de energia para cada mês e hora
$TARVEND_{MES,H}$	Preço da venda de energia para cada mês e hora
$TARDF$	Tarifa da demanda fora de ponta
$TARDP$	Tarifa da demanda no horário de ponta

Variáveis do modelo matemático

$BARM_{MES,DIA,H}$	Quantidade de biogás armazenada
BIO	Variável binária que indica se o custo do biodigestor deve ser considerado
$BGER_{MES,DIA,H}$	Quantidade total de biogás utilizada para gerar energia
$BGERU_{I,MES,DIA,H}$	Quantidade de biogás utilizada para gerar energia na unidade I
$BQUE_{MES,DIA,H}$	Quantidade de biogás queimada em flare
DCF_S	Demanda contratada fora de ponta após instalação da GD
DCF_S	Demanda contratada fora de ponta após instalação da GD
DCP_S	Demanda contratada no horário de ponta após instalação da GD
$PCON_{MES,DIA,H}$	Parcela do consumo de energia elétrica do consumidor atendido pela distribuidora
$PINT_{MES,DIA,H}$	Potência total gerada em unidades de GD para atender à demanda interna
$PINTU_{I,MES,DIA,H}$	Potência com a qual é gerada energia pela unidade I para atender à demanda interna
$PVEN_{MES,DIA,H}$	Potência total das unidades de GD para venda de energia à distribuidora
$PVENU_{I,MES,DIA,H}$	Potência gerada pela unidade I para ser vendida para a distribuidora
ν	Porcentagem de metano no biogás
Var	Valor em risco
X_I	Variável binária que recebe 1 quando a unidade I de GD é instalada
Z	Valor presente líquido da alternativa sendo avaliada
$ZCAR$	Receita anual da venda de crédito de carbono
$ZDG_{S,MES,DIA,H}$	Variável binária que recebe 1 quando a parcela do consumo é atendida pela energia gerada pela tecnologia de GD
$ZDM_{S,MES,DIA,H}$	Variável binária que recebe 1 quando a parcela do consumo é atendida pela energia comprada da concessionária;
$ZECO$	Economia anual da conta devido à utilização da unidade de GD
$ZINV$	Custo total do investimento
$ZMEO$	Custo anual de operação e manutenção da unidade
$ZVEN$	Receita anual da venda de energia para a concessionária

Lista de Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodutor
CER	Certificados de Emissões Reduzidas
CVaR	Valor Condicional em Risco
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	Gases de Efeito Estufa
GMG	Grupo motor-gerador
H ₂ S	Ácido Sulfídrico
HECO	Hawaiian Electric Company
In-En	Interessados e Envolvidos
IRP-4	Integrated Resources Planning
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
PCH	Pequena Central Hidráulica
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PGEEC	Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Computação
PIE	Produtor Independente de Energia
PIR	Planejamento Integrado de Recursos
PNSB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Vinila
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RED	Recurso Energético Distribuído
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
TUSD	Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição
TUST	Tarifas de Uso dos Sistemas de Transmissão

VaR	Valor em Risco
VPL	Valor Presente Líquido

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

Todo resíduo orgânico, seja ele de origem agrícola, pecuária, industrial, residencial ou dos comércios em geral, se sujeito a um processo de digestão anaeróbia controlada, gera como produto o biogás. Composto por 50 a 75% de metano, o biogás pode ser utilizado para gerar energia, biometano, ou ser queimado para atender a uma demanda térmica (FEAM, 2015; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010; Bley Jr., 2015).

O biogás vem sendo utilizado como fonte de energia desde o século XIX, na Índia (Cervi, 2009; CETESB, 2006); trinta anos depois dessa primeira experiência, a Inglaterra testou um pequeno sistema de iluminação pública que tinha como fonte o biogás. Apesar desse movimento inicial, somente no século XX, devido às carências energéticas causadas pela Segunda Guerra Mundial, o biogás voltou a ser utilizado e a conquistar espaço (CETESB, 2006).

Atualmente, o biogás é uma das fontes renováveis de energia que poderia contribuir para diversificar a matriz energética nacional e para reduzir a necessidade de construir grandes centrais elétricas convencionais. Esses empreendimentos causam impactos sociais, devido à área ocupada por eles e à proximidade com as áreas urbanas, dentre outros fatores. Além disso, aproximadamente 13,5% da energia brasileira é perdida entre geração e consumo, e quase 70% desse total é perdido no sistema de distribuição (Curado, 2015). Ademais, o Brasil apresenta, como vantagens para a utilização do biogás como fonte energética, o clima adequado e a grande quantidade de matéria orgânica de qualidade (Furtado, 2010).

Para a produção de biogás, pode ser utilizada matéria orgânica proveniente de resíduos sólidos, esgotos domésticos e resíduos rurais, como subprodutos agroindustriais e dejetos pecuários (CETESB, 2006). Este último item, resultado da produção animal, uma das atividades de grande impacto ambiental, é considerado pelos órgãos de controle ambiental como tendo um grande potencial poluidor no que diz respeito aos recursos hídricos (Santos & Nardi Junior, 2013). No *ranking* da pecuária no Brasil, a suinocultura ocupa o primeiro lugar,

com quase 38 milhões de cabeças em 2014, sendo o estado do Paraná responsável por 16% desse total (Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento, 2016).

Os dejetos animais são resíduos altamente poluidores, que prejudicam o meio ambiente, favorecem a proliferação de moscas e exalam gases de mau cheiro quando tratados inadequadamente (Freitas, 2008; Daga et al., 2008; Konzen, 1983). Por isso, os dejetos gerados na suinocultura, por exemplo, devem sofrer, no mínimo, o tratamento preliminar. Esse tratamento consiste no armazenamento dos dejetos em composteiras e na utilização de sistemas de separação de fases como decantação, peneiramento e centrifugação (SEMA, 1998).

Visando à obtenção de biogás, o tratamento dos dejetos suínos pode ser realizado utilizando-se biodigestores. Nesse processo, os dejetos ficam contidos dentro dos biodigestores em condições de total ausência de oxigênio, onde ocorrerão a produção e o armazenamento do biogás e, além disso, do biofertilizante gerado (Fernandes, 2012). O biodigestor mais utilizado para esse fim, na região oeste do Paraná, é o do tipo tubular (CETESB, 2006). Esse biodigestor é formado por uma lagoa de base quadrangular, com as paredes revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona, onde o biogás é armazenado. A base desse modelo, formada pela lagoa, fica abaixo do nível da terra, o que evita grandes variações de temperatura. Além disso, pelo fato de essa base ser relativamente rasa e longa em relação a outros tipos de biodigestores, pode ser garantida uma maior produtividade de gás por massa fermentada (Prati, 2010).

O biogás produzido nos biodigestores vem sendo utilizado para a geração de energia elétrica, atendendo à demanda das propriedades onde as granjas estão instaladas, como é o caso da Granja Colombari (Prati, 2010) e de uma propriedade em Forquilha/SC (Westrup et al., 2015). Para a geração de energia elétrica a partir de biogás, a tecnologia mais utilizada é o motor de combustão interna do tipo ciclo Otto (CETESB, 2006).

A Granja Colombari foi a primeira unidade de demonstração da Plataforma Itaipu de Energias Renováveis, que busca promover a eficiência energética da região por meio do emprego de fontes geradoras alternativas, como energia solar, eólica, de biomassa e hidráulica. Esse projeto foi desenvolvido em parceria com a Itaipu Binacional, o Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI) e a Cooperativa Agroindustrial Lar e teve um papel importantíssimo no incentivo ao desenvolvimento de projetos de geração de energia elétrica a partir de dejetos suínos. O biodigestor utilizado nesse projeto foi fornecido em comodato pela empresa AgCert. Por se tratar de um projeto piloto envolvendo as parcerias citadas, foi possível analisar os aspectos técnicos associados à implantação e à operação de um gerador movido a biogás obtido da biodigestão de dejetos suínos, sem grande preocupação com aspectos econômico-financeiros. Desta forma, apesar da contribuição técnica e dos conhecimentos adquiridos nessa aplicação prática, outros aspectos relevantes, como a valoração econômica, ainda precisavam ser estudados a fundo, a fim de atender a realidade de um produtor rural comum.

A utilização do biogás como fonte primária para geração de energia elétrica também colabora para a redução das emissões de gases de efeito estufa, já que o biogás gerado pela decomposição anaeróbia de matéria orgânica é composto, em sua maior parte, por metano, que contribui 21 vezes mais para o efeito estufa que o dióxido de carbono (CETESB, 2006; Bley Jr., 2015). Além de metano, o biogás tem em sua formação dióxido de carbono e por volta de 1 a 5% de gases traços, dentre eles o ácido sulfídrico (Bley Jr., 2015; Coelho et al., 2006). Assim, nota-se que a utilização do biogás como fonte primária de energia, além do potencial econômico, possui também um grande potencial de caráter ambiental, mostrando que os benefícios de seu uso devem ser analisados de uma maneira global, a fim de se considerar todos os aspectos envolvidos.

O aspecto ambiental contribui para o benefício social, já que a sociedade é beneficiada em qualidade de vida. Além disso, a geração de energia elétrica em propriedades rurais pode significar inclusão social com a garantia de acesso de qualidade ao sistema de energia elétrica.

Nesse contexto, faz-se necessária a utilização de uma metodologia de planejamento que englobe aspectos ambientais, sociais e políticos, além dos aspectos técnico-econômicos, com uma visão sistêmica mais ampla, a qual é oferecida pelo Planejamento Integrado de Recursos (PIR). O PIR sugere que sejam compreendidos e valorados os aspectos ambientais, sociais e políticos em pé de igualdade com os custos dos investimentos e operação utilizados nas avaliações técnico-econômicas tradicionais.

As dificuldades, não só as econômicas, existentes no processo de produção de energia devem ser incorporadas aos custos tradicionalmente considerados, como custos monetários. Desta forma, é possível incorporar os ônus e os bônus ambientais, sociais, políticos e econômicos de determinada fonte energética com o mesmo peso no processo de tomada de decisão. Assim, certas vantagens de um recurso energético podem fazer com que um projeto inviável economicamente seja necessário do ponto de vista social e ambiental (Fujii, 2006).

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho de pesquisa é analisar e valorar, de forma sistêmica, a produção e uso de biogás para fins energéticos em granjas de suínos do oeste do Paraná, atendendo à demanda local com a energia produzida e possibilitando eventuais compras ou vendas de excedentes de energia quando existir a necessidade, integrando oferta e demanda energética de forma a conseguir o menor custo que leve em conta as dimensões social, ambiental, política e econômica.

Para tanto, será adotado um modelo de PIR para avaliar as condições na qual ocorrem as diversas demandas energéticas e o potencial de aproveitamento de fontes primárias para atender a essa demanda, com foco no aproveitamento do biogás. No âmbito da dimensão técnico-econômica, propõe-se o desenvolvimento de um modelo matemático de otimização

que indique a tecnologia utilizada na conversão do biogás, produzido a partir de dejetos suínos, em energia elétrica e sua forma de operação ótima, levando em conta as incertezas associadas à produção de biogás e ao comportamento da demanda a ser atendida. Esse modelo considera, de forma anualizada, os custos relacionados à produção do biogás, assim como os custos de investimento, operação e manutenção da tecnologia de geração de energia elétrica a partir dele.

Portanto, pode-se considerar que a pesquisa desenvolvida atende a três fins. O primeiro, de caráter exploratório, permite ter uma visão sistêmica da cadeia produtiva do biogás, considerando: os aspectos técnico-econômicos da produção de biogás, das tecnologias de geração de energia elétrica e os custos envolvidos; os aspectos ambientais relacionados com a maneira correta de tratamento dos dejetos suínos de acordo com a legislação ambiental; os aspectos sociais que representam a posição da sociedade em relação à utilização de determinada fonte energética; e os políticos, relacionados com a posição dos órgãos que representam e governam a comunidade frente à utilização da fonte energética. Nesta fase, é possível conhecer os termos que deviam ser considerados no modelo matemático.

A segunda finalidade tem característica descritiva, na qual se busca identificar e descrever os custos e benefícios envolvidos em cada parte do processo estudado na fase exploratória, estabelecendo relações causa-efeito.

Já o terceiro objetivo, de caráter metodológico, consiste na apresentação da metodologia a ser seguida, com base no PIR, para a análise da utilização do biogás como fonte energética para a geração de energia elétrica. O aspecto econômico foi incorporado por meio da elaboração de um modelo matemático, com base em um trabalho existente, baseando-se nas informações obtidas durante a realização da pesquisa.

Com a conclusão da pesquisa, chega-se aos seguintes resultados:

- Descrição detalhada do processo de tratamento de dejetos suínos, de acordo com a legislação ambiental.
- Identificação da cadeia produtiva de obtenção do biogás a partir de dejetos suínos, descrevendo-se os processos envolvidos, os equipamentos necessários, os processos de purificação do gás e a correção necessária para que o biogás obtido possa ser utilizado no processo de geração de energia elétrica.
- Apresentação das tecnologias utilizadas na geração de energia a partir do biogás e das características do biogás, para que se possa utilizá-lo para esse fim.
- Sistematização e qualificação dos impactos sociais, políticos e ambientais inerentes à produção de dejetos suínos e sua utilização como vetor energético por meio de uma análise de custos completos.
- Sistematização do levantamento do potencial e das necessidades locais de energia com vistas ao planejamento integrado de recursos energéticos.
- Elaboração e implementação do modelo matemático que permite avaliar economicamente a integração local de oferta e demanda energética, considerando as incertezas envolvidas no processo.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, incluindo este, em que é contextualizado, definido e delimitado o problema de pesquisa.

No Capítulo 2, são apresentados todos os parâmetros que envolvem o biogás, como a cadeia produtiva para sua obtenção, as perspectivas para a utilização dele no Brasil, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, as tecnologias de conversão utilizadas para a produção de energia elétrica a partir dele e a legislação básica aplicável a esses casos.

No Capítulo 3, são apontados os conceitos e as características do PIR, assim como seus aspectos metodológicos e sua estrutura.

No Capítulo 4, é apresentado o modelo matemático, primeiramente sua função objetivo e, depois, as restrições de balanço energético e de operação da unidade, bem como de produção, armazenamento e consumo do biogás. Esse modelo é atualizado com a incorporação dos riscos inerentes ao processo, devido às incertezas das variáveis, por meio da utilização da árvore de cenário de duas etapas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com a simulação desse modelo de otimização em três casos hipotéticos distintos.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões deste trabalho e propõe temas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Biogás

O Biogás é gerado naturalmente durante o processo de digestão da matéria orgânica, quando em condições anaeróbias. Esse processo natural pode ser recriado pelo homem, armazenando-se a matéria orgânica proveniente de suas atividades em um ambiente fechado, conforme ilustra a Figura 1 (CETESB, 2006).

Considerando o potencial energético do biogás, essa alternativa mostra-se vantajosa se o processo for controlado de maneira que possibilite ao homem a utilização desse gás para atender às suas necessidades energéticas (CETESB, 2006; Bley Jr., 2015). Somando isso à necessidade da destinação dos resíduos produzidos em grande escala pelas atividades humanas, tem-se, nesse processo, uma série de vantagens, incluindo a destinação ambientalmente correta para resíduos aliada a uma fonte de alto potencial energético.



Figura 1- Ciclo do biogás: origem dos resíduos, tratamento e usos finais. Fonte: Adaptado pela autora (The EcoAmbassador, 2017).

O processo controlado de geração de biogás depende de fatores como o tipo de resíduo orgânico utilizado até a temperatura durante a biodigestão. Diversos autores indicam as vantagens para a utilização desse recurso no Brasil, devido ao clima adequado e à grande quantidade de matéria orgânica de qualidade disponível nesse país (Furtado, 2010; Bley Jr.,

2015; CETESB, 2006).

No presente capítulo, são abordados o processo de obtenção do biogás utilizando biodigestores, as características esperadas que o biogás deve ter para a utilização como fonte geradora de energia elétrica, as tecnologias de conversão utilizadas para este fim e os processos de purificação mais utilizados no biogás. Além disso, são apresentadas as perspectivas da utilização do biogás no Brasil, mostrando-se de que forma o mecanismo de desenvolvimento limpo pode incentivar esse uso e qual é a legislação básica aplicável à geração distribuída no Brasil. É necessário conhecer todo o processo de tratamento do resíduo para a produção de biogás, as tecnologias de geração de energia elétrica e os incentivos a esse processo para que seja possível a identificação dos aspectos relevantes a serem considerados na avaliação desse recurso pela metodologia do PIR.

2.1 Perspectivas sobre o Biogás no Brasil

O Brasil, por ter grande parte do seu território em região tropical, apresenta características muito favoráveis para a geração do biogás, particularmente se for comparado com países como Alemanha, Itália e Áustria, os quais têm atingido patamares tecnológicos altos com a biodigestão anaeróbia e hoje são referências nessa prática (Bley Jr., 2015).

Além da vantagem climática, o biogás pode contribuir com a solução do problema de saneamento básico no Brasil, criando oportunidades de negócios que diminuam as barreiras tradicionais desse segmento. A necessidade de atender às metas propostas no Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB), de 2013, poderia contribuir no crescimento de plantas de tratamento que produzam biogás. O PNSB prevê, em um horizonte de 20 anos, de 2014 a 2033, a universalização da coleta de resíduos sólidos na área urbana e o fim dos lixões ou vazadouros a céu aberto em todo o País. Além disso, o PNSB tem como meta servir 93% dos domicílios urbanos com rede coletora ou fossa séptica para os esgotos sanitários (SNSA, 2013). Atualmente, mais de 60% da população brasileira ainda não tem coleta de esgoto (Portal Brasil, 2013).

Entretanto, no ano 2014, a porcentagem da população com esgoto tratado subiu apenas 1,8% (Ambiental, 2014). Dados do ano de 2015 ainda não foram publicados; entretanto, seguindo este ritmo de crescimento, o PNSB não atingirá as suas metas no prazo estipulado de 20 anos, em 2033 (Souza, 2015).

Além disso, a proteção ambiental é resguardada legalmente e, por isso, os produtores dos resíduos têm a obrigação, segundo a lei nº 12.305/2010, de tratá-los de forma adequada, devido a seu potencial poluidor (CONAMA, 1993; SEMA, 1998).

As perspectivas para a geração e a utilização do biogás no Brasil podem ser melhoradas com facilitadores e mecanismos impulsionadores, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), apresentado a seguir, justamente por cumprir um papel importante na

viabilização de projetos que envolvam o biogás.

2.2 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Um incentivo importante para a utilização do biogás na geração de energia elétrica é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O MDL foi criado para colaborar com o atendimento das metas propostas pelo Protocolo de Kyoto de redução de pelo menos 25%, com relação a 1990, da emissão de carbono até o ano 2020 (ABRELPE, 2013; Portal Resíduos Sólidos, 2014). Os objetivos desse mecanismo são diminuir o custo global da redução de emissão de gases que produzem o efeito estufa e apoiar iniciativas que propiciem o crescimento sustentável em países em desenvolvimento (Costa, 2012).

Portanto, o MDL permite que países em desenvolvimento implementem projetos que ajudem a reduzir as emissões de carbono a partir da venda de crédito de carbono. Isso significa que os países em desenvolvimento podem sediar projetos que gerem Certificados de Emissões Reduzidas (CER) e vendê-los para países que necessitam reduzir as suas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Falleiro, Gastaldini e Andrade, 2016). Em 21 de outubro de 2016, um Crédito de Carbono, que representa uma tonelada métrica de CO₂, era vendido a €5,58 (Investing, 2016).

O Brasil contava, em 2016, com 4,7% dos projetos de MDL registrados no mundo. Em primeiro lugar, estava a China, com quase 47,9% dos projetos. Dos projetos brasileiros, apenas 8,1% são da categoria “Agricultura”, em que estão enquadrados os projetos de tratamento de dejetos animais (UNFCCC, 2016).

Para o desenvolvimento de um projeto de MDL, é necessária a realização de sete etapas, que passam por elaboração do documento de concepção do projeto, validação, aprovação, registro, monitoramento, verificação e certificação, até a emissão e a aprovação das CERs (Portal Resíduos Sólidos, 2014; ABRELPE, 2015).

Algumas dessas etapas são avaliadas por uma Entidade Operacional Designada (EOD) e, na maioria dos casos, para a realização das outras etapas, é contratada uma empresa de consultoria. Esses fatores agregam custos elevados à obtenção das CERs. Além disso, quando o projeto é aprovado, existe uma taxa administrativa para cada crédito de carbono vendido. Tais custos dependem do tamanho do projeto e vêm diminuindo com o tempo, devido a uma maior concorrência das empresas de consultoria e da aprendizagem obtida com os primeiros projetos de CERs (Portal Resíduos Sólidos, 2014).

O impacto dos custos de transação sobre a viabilidade econômica dos projetos varia conforme o tamanho do projeto. No caso de aproveitamento energético a partir do lixo de pequena escala, de 150 kW, o custo de transação pode representar até 46% da receita da comercialização das CERs, com um *payback* de 3,2 anos. Para projetos maiores, de 2 MW, o custo representa até 12% da receita de comercialização, com um *payback* de 1,2 anos. Já o

aproveitamento da energia em aterros sanitários de 11 MW ocasionaria um custo de transação de apenas 11% da receita da comercialização das CERs, com um *payback* de 0,8 anos (Portal Resíduos Sólidos, 2014).

2.3 Cadeia Produtiva para Obtenção do Biogás

O biogás pode ser obtido por meio da degradação anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterros sanitários, efluentes industriais, esgoto doméstico (CETESB, 2006), de abatedouros de aves, suínos, peixes e bovinos (Feroldi et al., 2014), de resíduos agrícolas (Maffioletti & Mota Neto, 2013; Souza et al., 2002; ANEEL, 2008) e dejetos de origem animal (Bley Jr., 2015; Cervi, 2009; CETESB, 2006; Panzarini et al., 2015; Santos & Nardi Junior, 2013).

Cada fonte de matéria orgânica tem suas características devido à quantidade de água e componentes químicos presentes nela. Por isso, em alguns casos, é necessária a correção de determinados parâmetros, como a acidez da matéria orgânica, antes do processo de biodigestão (Souza, 1984).

Serão descritos, nas próximas seções, os tipos de resíduos e os tratamentos da matéria orgânica para obtenção e armazenamento do biogás. Também serão apresentadas as características ideais requeridas do biogás para que este seja utilizado para geração de energia elétrica.

2.3.1 Resíduos

O resíduo sólido pode ser definido como material, substância, objeto ou bem descartado de atividades humanas desenvolvidas em sociedade, cujas características tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso o respectivo tratamento (CONAMA, 1993; ABRELPE, 2015).

Quanto aos resíduos utilizados para a geração de biogás, podem-se citar os resíduos sólidos domésticos urbanos depositados nos aterros sanitários, o esgoto doméstico e o aproveitamento de dejetos animais.

Os resíduos sólidos domésticos urbanos gerados no Brasil, em 2011, atingiram uma marca de 62 milhões de toneladas, sendo que cerca de 90% são coletados. Dos resíduos coletados, 58% são destinados a aterros sanitários (ABRELPE, 2013), constituindo os locais mais adequados, já que dispõem de técnicas corretas para a impermeabilização do solo, cobertura dos resíduos, captação do chorume, além da captação do biogás (CETESB, 2006; Pecora et al., 2009).

Do esgoto doméstico gerado no Brasil, em torno de 40% é tratado antes de ser despejado nos afluentes (SNSA, 2016). O tratamento é realizado por meio de um ou mais processos para reduzir seu teor de impurezas, de tal forma que os subprodutos finais possam ser reutilizados ou devolvidos ao meio ambiente (CETESB, 2006). Esses processos são iniciados por meio da separação da fase sólida e da fase líquida dos resíduos, originando o lodo (SNSA, 2016; Ensinas, 2003; Marques, 2014). O lodo passa por uma série de etapas até ser desidratado e ter sua destinação final. Durante esse processo, o lodo pode passar por digestores anaeróbios, gerando o biogás (Marques, 2014).

Os dejetos animais são resíduos altamente poluidores que prejudicam o meio ambiente, favorecem a proliferação de moscas e exalam gases de mau cheiro quando tratados inadequadamente (Daga et al., 2008; Freitas, 2008; Konzen, 1983). Os dejetos gerados na suinocultura devem sofrer, pelo menos, o tratamento preliminar. Esse tratamento consiste no armazenamento dos dejetos em composteiras e na utilização de sistemas de separação de fases como decantação, peneiramento e centrifugação (SEMA, 1998).

Qualquer dejetos animal, assim como o do homem, pode ser utilizado para a geração do biogás por meio do processo de biodigestão. Entretanto, devido à grande produção da suinocultura no Brasil, e em particular no oeste do Paraná, será tratada em detalhes neste trabalho a utilização desse tipo de dejetos (Cervi, 2009). Além disso, o dejetos suíno possui alta capacidade de produção de biogás se comparado com a mesma quantidade de dejetos bovinos, equinos, ovinos e de aves (Santos & Nardi Junior, 2013).

2.3.2 Tratamento dos Resíduos para Obtenção de Biogás

Para a obtenção do biogás, os resíduos devem passar por um processo de biodigestão anaeróbia, isto é, sem a presença de oxigênio. No caso dos aterros sanitários, essa ausência de oxigênio ocorre devido às camadas de terra que cobrem os resíduos que são depositados nos aterros diariamente. Já no caso dos dejetos animais, é necessária a utilização de um biodigestor para esse fim. Portanto, nesta seção, serão apontados os processos de tratamentos pelos quais cada tipo de matéria orgânica deve passar para se obter como produto o biogás (CETESB, 2006; Bley Jr., 2015).

O biogás obtido a partir de resíduos sólidos domésticos é produzido nos aterros sanitários adequadamente construídos. Um aterro sanitário deve seguir normas técnicas de construção e deve apresentar drenagem de chorume, de biogás e de águas superficiais, impermeabilização da base do terreno e camada de cobertura final (Ensinas, 2003).

O resíduo depositado no aterro fica exposto ao ar atmosférico, quando se inicia a decomposição, nesse caso, em condições aeróbias. Com as camadas de terra colocadas sobre os resíduos, inicia-se o processo de decomposição anaeróbia, primeiramente em sua fase acidogênica, seguida pela metanogênica e, finalmente, pela fase de maturação (Ensinas, 2003).

A fase acidogênica é realizada pelas bactérias de mesmo nome e é responsável pela quebra da matéria orgânica presente nos resíduos, resultando em ácidos. Esses ácidos são convertidos, da mesma forma, pelas bactérias metanogênicas em metano (Alves, 2000). Nessa fase, chamada metanogênica, ocorre a maior parte da produção do biogás (Alves, 2000; Campos et al., 2015; CETESB, 2006).

O final do processo ocorre na fase de maturação. Nesse momento, grande parte da matéria orgânica já foi biodegradada e convertida em metano e gás carbônico, que ocorreu na fase metanogênica. Entretanto, como a umidade continua a migrar pela massa de resíduos, porções de material biodegradável que ainda não foram convertidos acabam reagindo. A taxa de geração de biogás diminui significativamente nesta fase, pois a maioria dos nutrientes disponíveis já foi consumida nas fases anteriores (Ensinas, 2003).

Diversos fatores influenciam na taxa de produção de gás em um aterro, como a composição dos resíduos depositados nele, a umidade proveniente da infiltração de água da superfície até as camadas de resíduo, a idade, a temperatura e o pH do aterro (Ensinas, 2003; CETESB, 2006).

Para o aproveitamento do biogás gerado em um aterro sanitário, faz-se necessária a instalação de componentes básicos como: queimador, para queima do gás excedente; gasômetro, para armazenamento e regularização da vazão de gás; compressor, para coleta e bombeamento do gás pela tubulação de coleta; tubulação, para coleta e transporte do biogás do aterro à usina; e, drenos, para coleta do gás (Santos, 2015). Como a recomendação é que os gases gerados em aterros sejam ao menos queimados em *flare* e não liberados diretamente na atmosfera (Bley Jr., 2015), os custos devido ao queimador ocorrem independentemente da utilização ou não do biogás para geração de energia elétrica.

O tratamento de esgoto tem, na maioria dos casos, seu processo de digestão anaeróbia por meio do Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) (Rodrigues et al., 2011; Coelho et al., 2006). Este biodigestor consiste em um tanque, baseado no princípio de separação das fases sólida, líquida e gasosa, através do separador trifásico. O afluente a ser tratado é inserido na parte inferior do tanque, que, por meio do sistema de distribuição e da recirculação, provoca um fluxo ascendente, conforme ilustra a Figura 2. A deposição do resíduo provoca a formação de grânulos e partículas de lodo, que ficam suspensos na manta de lodo, servindo de base para aglutinação de diversas bactérias. A biodigestão do resíduo gera bolhas de gases que sobem e são coletadas pela parte superior do tanque (Coelho et al., 2006; Lima & Passamani, 2012; Versiani, 2005).

Esse reator tem como vantagens a simplicidade e o baixo custo de implantação e operação. Além disso, produz pouco efluente que necessita passar apenas pelo processo de secagem antes da disposição final (Lima & Passamani, 2012).

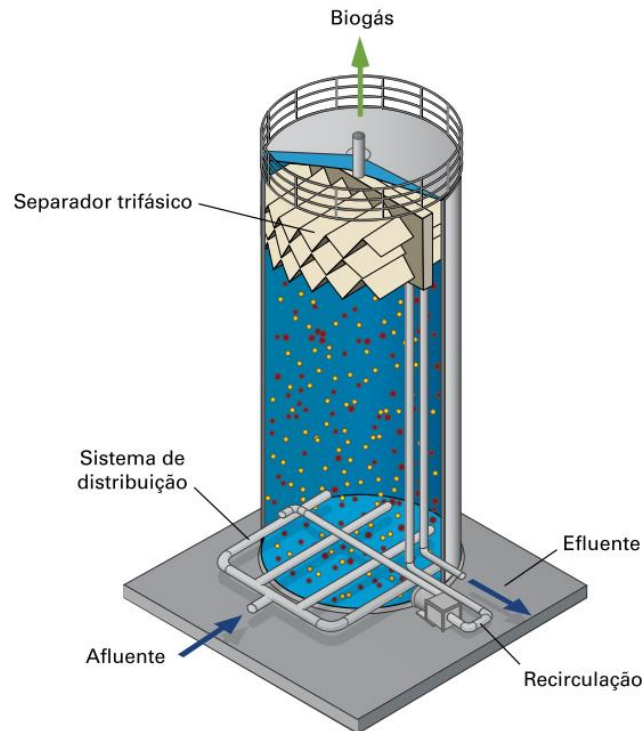


Figura 2 - Representação esquemática de um RAFA. Fonte: (FEAM, 2015).

Para a utilização do biogás obtido do tratamento de esgoto para geração de energia elétrica, é necessária a utilização de um gasômetro. Essa etapa possibilita que o gás tenha a pressão necessária para que o grupo motor-gerador funcione adequadamente (Coelho et al., 2006).

Os dejetos suínos de granjas confinadas não podem ser despejados diretamente no solo ou lançados diretamente nos rios. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), por meio de suas circulares técnicas, indica a necessidade de tratar os dejetos suínos, recomendando que isto seja feito a partir de manejo sólido ou líquido. O mais utilizado é o manejo líquido, que consiste na limpeza da granja com a água desperdiçada pelos bebedouros, direcionando os dejetos às calhas. Essas calhas levam os dejetos até as esterqueiras, que são basicamente lagoas com a devida impermeabilização para que os dejetos não atinjam os lençóis freáticos, responsáveis por armazenar os dejetos por um tempo de retenção (Konzen, 1983).

O tratamento dos dejetos com a finalidade de geração de biogás é realizado com a utilização de dois tipos de biodigestores rurais comuns: o de batelada e o contínuo. O biodigestor de batelada é carregado uma só vez e mantido fechado por um determinado período, suficiente para que a matéria orgânica fermente. Posteriormente, essa matéria orgânica fermentada é descarregada, e o biogás gerado neste processo pode ser utilizado. Este é considerado um sistema simples, formado por um tanque anaeróbico, e seu tamanho depende da quantidade de dejetos (CETESB, 2006).

Já os biodigestores contínuos, os mais utilizados para esse fim, dividem-se em três modelos: os modelos clássicos indianos e chineses (CETESB, 2006; Seixas et al., 1981;

Panzarini et al., 2015) e tubulares (Cervi, 2009) ou canadense (Fernandes, 2012; Prati, 2010). Os modelos tubulares ou canadenses passaram a ser utilizados na década de 1980, na região oeste dos estados do Paraná e Santa Catarina, onde se concentra grande parte do plantel suinícola do País (Cervi, 2009).

O biodigestor modelo indiano caracteriza-se por dispor de uma cúpula móvel de ferro ou de fibra de vidro, que funciona como gasômetro, conforme ilustrado na Figura 3. O gás, na medida em que é produzido, armazena-se sob a cúpula. Desta forma, a pressão de saída do gás pode ser controlada e mantida constante (CETESB, 2006; Prati, 2010; Seixas et al., 1981; Panzarini et al., 2015). Uma parede central divide o tanque de fermentação em duas câmaras, possibilitando a separação da biomassa já fermentada daquela que acabou de entrar no biodigestor (CETESB, 2006; Prati, 2010; Seixas et al., 1981; Panzarini et al., 2015).

A diferença entre o nível da caixa de entrada e de saída possibilita que o material digerido saia do biodigestor. Portanto, o volume que se acrescenta no biodigestor já em funcionamento é o volume que se descarrega e sai pelo tubo de descarga (Seixas et al., 1981). Nesse tipo de biodigestor, é conveniente utilizar materiais homogêneos ou, então, deve-se garantir que o resíduo será triturado antes de ser acrescentado no biodigestor para que não cause o entupimento dos tubos de entrada e saída (Seixas et al., 1981).

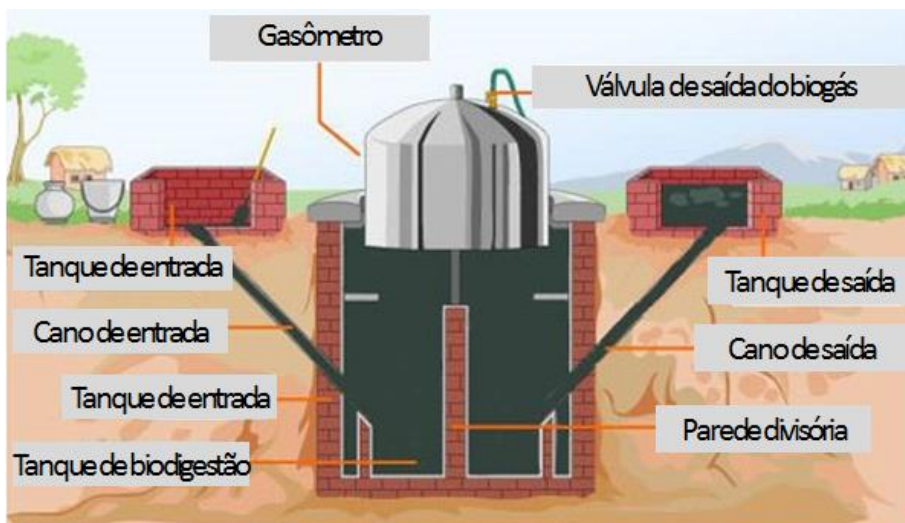


Figura 3 - Biodigestor modelo indiano. Fonte: Adaptada pela autora (Tutor Vista, 2017).

Já o biodigestor modelo Chinês é formado por uma cúpula cilíndrica com teto abobadado totalmente construído em alvenaria, conforme ilustra a Figura 4. O teto abobadado deve ser impermeável e se destina ao armazenamento do biogás. A biomassa é retirada do biodigestor com base no princípio de prensa hidráulica: com o aumento da pressão do gás no interior do biodigestor, ela é deslocada da câmara de fermentação para a caixa de saída (CETESB, 2006; Prati, 2010; Seixas et al., 1981; Panzarini et al., 2015).

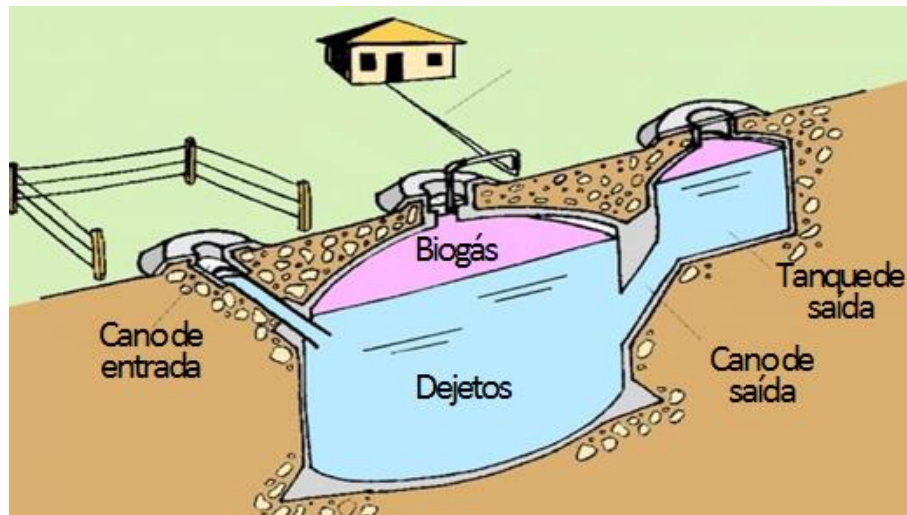


Figura 4 - Biodigestor modelo chinês Fonte: Adaptado pela autora (Practical Action, 2017).

O modelo tubular ou canadense apresenta uma base quadrangular, com paredes revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona também impermeável, conforme ilustra a Figura 5. É um modelo mais raso e longo, o que lhe garante uma maior produtividade de gás por massa fermentada. Por ter uma profundidade pequena, esse modelo necessita de uma grande área superficial para que consiga armazenar uma grande quantidade de resíduos (Fernandes, 2012; Prati, 2010).

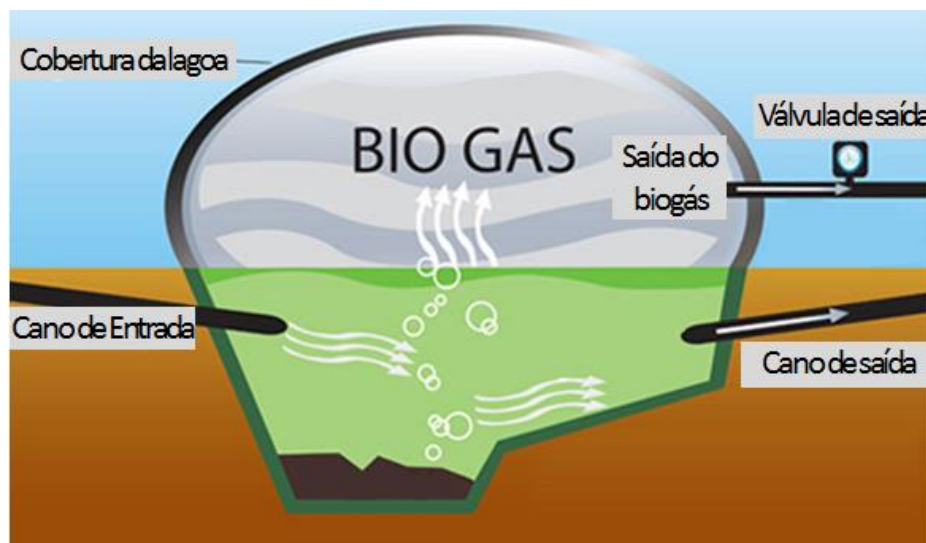


Figura 5 - Biodigestor modelo tubular. Fonte: Adaptado pela autora (Rogers Family Company, 2012).

Esse modelo é amplamente utilizado em propriedades rurais por ser versátil e capaz de armazenar grande quantidade de resíduos, produzindo assim uma grande quantidade de biogás e estabilizando os dejetos que podem ser utilizados como biofertilizante. Além disso, a manta plástica de Policloreto de Vinila (PVC) ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD) armazena o biogás produzido, evitando a necessidade da utilização de um gasômetro (Fernandes, 2012; Prati, 2010).

A construção da lagoa abaixo do nível do solo garante que a temperatura não varie de maneira brusca, além de aproveitar o calor da terra e o calor absorvido pela manta exposta ao sol (Prati, 2010).

2.3.3 Características do biogás

O biogás tem na sua composição entre 50 e 75% de metano. Quanto maior a porcentagem de metano no biogás, maior é o seu poder calorífico e, conseqüentemente, maior será a sua eficiência no processo de geração de energia elétrica (ABRELPE, 2013; Alves, 2000; Bley Jr., 2015).

Além do metano, o biogás também é composto por substâncias não combustíveis, como água e dióxido de carbono, o que prejudica o processo de queima do gás, tornando-o menos eficiente. Portanto, o poder calorífico do biogás torna-se menor na medida em que se eleva a concentração das impurezas (Alves, 2000).

As características do biogás gerado variam de acordo com a composição do resíduo, a umidade, o pH do solo no caso de aterros sanitários, a temperatura e sua variação, a disponibilidade de nutrientes, a diluição da matéria orgânica a ser digerida e a velocidade do processo de digestão (Souza, 1984; CETESB, 2006; Bley Jr., 2015). Por ser um processo com tantas variáveis, a real composição do biogás só pode ser conhecida com certeza por meio de análises laboratoriais.

Em uma estação de tratamento de esgoto (ETE), com geração de biogás a partir da biodigestão do lodo do esgoto produzido no Conjunto Residencial da USP e pelo principal restaurante do Campus, foram realizadas tais análises quantitativas. O biogás, nesse caso obtido em um biodigestor do tipo RAFA, era composto por 75,8% de metano, 2,62% de água e 649 ppm de ácido sulfídrico (H_2S). Portanto, foi desenvolvido um sistema de purificação do biogás, realizado em dois compartimentos. O primeiro compartimento era composto por dois tipos de peneira molecular, para remover a água e ácido sulfídrico. O segundo continha cavaco de ferro, visando a assegurar a retirada de ácido sulfídrico que pudesse não ter sido removido no primeiro compartimento (Coelho et al., 2006).

Quanto à composição do biogás gerado a partir da biodigestão de dejetos suínos, tem-se uma variação grande devido, principalmente, à temperatura do local de produção e ao tempo de retenção hídrica (Souza et al., 2008; Silva & Minini, 2013).

Testes realizados em escala laboratorial apresentaram uma produção volumétrica de metano média geral de 76,8%. Nesse experimento, foram analisadas as porcentagens de metano produzidas por meio da biodigestão de uma solução composta por 6% de dejetos suínos com temperaturas de 25, 35 e 40°C, com e sem agitação do substrato e com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30, 25, 15 e 10 dias. De todos os parâmetros analisados, o aumento da temperatura de 25 para 40°C foi o que causou maior impacto na produção volumétrica de metano, representando um aumento de, em média, 155% (Souza et al., 2008).

Outro teste, realizado também em escala laboratorial, com uma solução composta por 33% de dejetos suínos, produziu 62,2% de metano em 55 dias de tempo de retenção hidráulica (TRH). Nesse caso, a pesquisa foi desenvolvida para analisar a influência da utilização de glicerina residual, proveniente da produção de biodiesel com dejetos suínos, na produção do biogás. Verificou-se que a adição de 2% de glicerina na solução de dejetos tornou o processo mais eficiente, reduzindo o TRH a 20 dias e obtendo-se um biogás com as mesmas características do primeiro experimento, sem a adição de glicerina (Silva & Minini, 2013).

A qualidade do biogás em casos reais foi descrita por Fernandes (2012) após um acompanhamento da Granja Colombari, onde o percentual de metano encontrado foi de, em média, 60%, e a concentração de sulfeto de hidrogênio foi de 2.712 ppm.

Como o biogás obtido tem características variáveis de acordo com a temperatura e o tipo de dejetos utilizados para a sua produção, existem diversas maneiras de tratá-lo a fim de torná-lo mais atrativo do ponto de vista energético. Entretanto, devem ser analisados os custos dos processos envolvidos, a fim de determinar se tais correções são viáveis.

2.3.4 Processos de Purificação do Biogás

O biogás tem, em sua composição, gases traços, e, em alguns casos, esses gases podem ser tóxicos e ainda prejudiciais aos equipamentos utilizados no processo de geração de energia elétrica. O principal deles é o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que é a associação do enxofre com o hidrogênio. Quando em solução aquosa, esse composto é chamado de ácido sulfídrico, sendo esta a nomenclatura mais utilizada na bibliografia referente a biogás (Haas, 2013).

O sulfeto de hidrogênio é um gás incolor que, além de ter um poder corrosivo em equipamentos, é potencialmente perigoso para a saúde humana. Concentrações superiores a 50 ppm representam risco considerável, e exposições a 700-1500 ppm levam à morte em alguns minutos. O odor fétido do gás só existe quando em baixas concentrações, o que aumenta seu risco, já que não tem cheiro quando em concentrações mais altas (Haas, 2013).

Devido a esses fatores, torna-se necessária a remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás. Essa remoção pode ser realizada por meio de processos biológicos, químicos ou físicos. A Tabela 1 apresenta uma comparação dos processos analisados segundo Fachagentur Nachwachsende Roshtoffe (2010).

Dentre os processos apresentados na Tabela 1, os mais utilizados para remoção do H_2S em plantas agrícolas são o Lavador biológico de gás e o carvão ativado.

Tabela 1 - Processos de dessulfurização. Fonte: FAO (2010).

Processo	Consumo energético	Insumos indiretos		Injeção de ar	Pureza em ppm	Problemas
		Consumo	Eliminação			
Biodessulfurização no digestor	++	++	++	Sim	50-2.000	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização externa	-	+	+	Sim	50-100	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	-	-	+	Não	50-100	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	o	--	o	Não	50-500	Processo lento
Dessulfurização química interna	o	--	--	Sim	1-100	Efeito purificador reduzido drasticamente
Carvão ativado	o	--	-	Sim	< 5	Grandes quantidades de carvão eliminadas

O lavador biológico é um sistema multiestágios composto inicialmente por uma coluna de lavagem recheada, em que o H_2S é absorvido por meio de uma solução de soda cáustica; por um biodigestor, responsável pela regeneração da solução de lavagem com oxigênio do ar; e por um separador de enxofre, que, finalmente, remove o enxofre elementar. Esse processo é indicado para casos em que existe um alto fluxo de gás e em que se permite a purificação de cerca de 95% do H_2S , sendo esses os motivos da sua popularidade. Como desvantagens, o lavador biológico apresenta o custo associado aos componentes extras necessários, além da utilização de produtos químicos, assim como água fresca para dissolvê-los e ainda a manutenção extra relacionada a ele (Fachagentur Nachwachsende Roshtoffe, 2010).

Já o processo de dessulfurização via carvão ativado é utilizado para filtragem fina, muitas vezes a jusante de outros processos de dessulfurização grossa. Proporciona um bom grau de pureza ao gás tratado, chegando a valores inferiores a 4 ppm. Baseado na oxidação catalítica do sulfeto de hidrogênio na estrutura porosa do carvão, o H_2S é convertido em enxofre e adsorvido nos microporos do carvão. Devido a suas ótimas taxas de dessulfurização, aos custos de investimento moderados e ao fato de ser aplicável a todos os sistemas de geração de biogás, este é um método bastante utilizado (Fachagentur Nachwachsende Roshtoffe, 2010).

Além dos gases traços, a água e o vapor d'água presentes no biogás devem ser removidos para proteger os componentes de processamento do gás contra desgastes e corrosão. A retirada de água do biogás se dá pela secagem por condensação, secagem por absorção e secagem por adsorção. Devido à simplicidade do processo e à possibilidade de

utilização em qualquer fluxo volumétrico de gás, a secagem por condensação é a mais encontrada nas plantas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010) e será brevemente explicada a seguir.

O processo de secagem por resfriamento é realizado na tubulação de gás, que se instalada de forma inclinada, possibilita que o vapor seja recolhido em um purgador, localizado no ponto mais baixo da tubulação. Para que o biogás possa ser resfriado, a tubulação de gás deve ser suficientemente longa. Esse processo pode ser mais eficiente quando as tubulações são enterradas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

2.4 Tecnologias de Conversão

Como citado anteriormente, o biogás tem grande potencial energético, devido à grande quantidade de metano presente em sua composição (Bley Jr., 2015; CETESB, 2006). Assim sendo, o biogás gerado por aterros sanitários, lodo resultante do tratamento de esgoto e tratamento de dejetos suínos, pode ser utilizado para gerar energia e essa energia pode, por sua vez, ser utilizada para atender à demanda dos seus produtores.

Isso significa que uma granja de suínos pode, por meio dos dejetos da sua criação de suínos, gerar biogás – e, a partir da queima dele, gerar energia, diminuindo-se, desta forma, as emissões de metano no País –, lucrar por meio das CERs e ainda diminuir suas despesas com energia elétrica, por meio do sistema de compensação de energia elétrica ou da venda da energia excedente.

A conversão energética do biogás ocorre por meio de um processo de transformação da energia química contida em suas moléculas em energia mecânica por um processo de combustão controlada. A energia mecânica aciona um gerador que a converte em energia elétrica (Machado, 2011; Pecora et al., 2009; Coelho et al., 2006).

As tecnologias disponíveis para a conversão em energia elétrica são as microturbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo ciclo Otto. As microturbinas a biogás ainda são pouco utilizadas e possuem elevado custo de implantação. Por outro lado, os motores do tipo ciclo Otto são equipamentos aos quais os produtores já são mais familiarizados, devido a sua semelhança aos motores à combustão utilizados em automóveis. Pelo mesmo motivo, o acesso a uma equipe de manutenção é facilitado. Além disso, os motores do tipo ciclo Otto apresentam menores custos de investimento inicial em relação às microturbinas, sendo a tecnologia mais utilizada no Brasil para este fim atualmente (FEAM, 2015).

As microturbinas a gás têm potência de até 200 kW e são constituídas, assim como as turbinas de grande porte, por compressor, câmara de combustão e turbina de expansão (FEAM, 2015). O ar comprimido é injetado na câmara de combustão e, nessa câmara, o combustível é injetado e se mistura com o ar. A mistura é então inflamada por meio de queimadores. Os gases aquecidos e em alta pressão são expandidos por meio das pás da

turbina, fazendo com que esta gire em alta velocidade. Essa turbina de expansão, montada no mesmo eixo do compressor e do gerador elétrico, fornece a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico (Machado, 2011).

Depois da expansão na turbina, os gases ainda contêm grande quantidade de energia térmica; portanto, essa energia pode ser utilizada em trocadores de calor para, dependendo da necessidade do sistema, produzir vapor. Assim, é caracterizado um processo de cogeração (Machado, 2011).

O motor ciclo Otto utiliza a mistura de ar com o combustível no cilindro, onde ocorre a explosão devido a ignição e compressão da mistura. A força da explosão é transferida ao pistão, que, por sua vez, desce e sobe em um movimento periódico. Esse movimento é transformado em movimento rotativo e ligado ao eixo do gerador (Machado, 2014).

Esse sistema, assim como as microturbinas, permite o aproveitamento do calor gerado pela combustão da mistura de ar e combustível para a utilização em sistemas de aquecimento, operando como um sistema de cogeração (Machado, 2014; Machado, 2011).

2.5 Legislação Básica Aplicável

Não existe, no Brasil, uma legislação que trate especificamente de geração e comercialização de energia elétrica a partir de biogás, porém pode-se considerar que a legislação sobre geração distribuída contemple esse tipo de tecnologia.

A Resolução Normativa nº 482, da ANEEL, atualizada pela Resolução Normativa nº 687, estabelece que a micro ou minigeração distribuída é aquela unidade geradora de energia elétrica que utiliza fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, de biomassa ou de cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. A diferença entre essas formas de geração está na potência instalada das unidades, no primeiro caso, de até 75 kW e, no segundo, entre 75 kW e 5 MW (ANEEL, 2015; ANEEL, 2012).

O produtor que passa a gerar energia elétrica pode ser definido como autoprodutor (APE) ou produtor independente de energia (PIE). O APE produz energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, e o PIE produz energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte dela, por sua conta e risco. Em ambos os casos, deve ser recebida a concessão ou autorização do poder concedente para esse fim (Brito, Andrade, Sakiyama & Dias, 2015).

Para o APE que gera energia elétrica que excede o seu consumo, criou-se o sistema de compensação. Esse sistema funciona como um empréstimo da energia excedente gerada pelo consumidor à concessionária, que deve ser compensado pelo consumidor em até 60 meses (ANEEL, 2012).

Em muitos casos, a geração de energia é muito maior que o consumo mensal da unidade, de forma que o sistema de compensação não se mostra suficiente. Na tentativa de atender a esses casos, foi criada a possibilidade de geração compartilhada, segundo consta na resolução nº 687, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados (ANEEL, 2015).

Quanto à comercialização de energia elétrica proveniente de geração distribuída que utilize fontes primárias incentivadas, deve ser atendida a resolução nº 247 da ANEEL. Segundo essa resolução, o consumidor especial, ou seja, o consumidor pertencente ao Grupo “A”, cuja carga seja maior ou igual a 500 kW, pode comercializar energia elétrica gerada por meio de aproveitamento hidráulico entre 1 MW e 30 MW, ou que utilize, como fonte primária de geração, biomassa, energia eólica ou solar, de potência menor ou igual a 30 MW, ou, ainda, empreendimentos com potência instalada menores que 1 MW (ANEEL, 2009).

Além disso, a resolução nº 77 da ANEEL estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão (TUST) e de distribuição (TUSD), para empreendimentos hidroelétricos com potência de até 1 MW e para aqueles com base em fonte solar, eólica, de biomassa ou cogeração qualificada, com potência injetada menor que 30 MW.

Essa resolução assegura o direito a 100% de redução nas TUSTs e TUSDs aos empreendimentos que utilizem, como fonte geradora, no mínimo, 50% de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos ou 50% de biogás gerado a partir de aterro sanitário, de resíduos vegetais ou animais ou de lodos de estações de tratamento de esgoto (ANEEL, 2007).

2.6 Conclusões

O biogás como fonte primária de geração de energia elétrica se mostra como uma excelente alternativa, principalmente no Brasil, devido ao clima propício. Além disso, os aterros sanitários, as estações de tratamento de esgotos e o tratamento dos dejetos animais, que geram ou podem gerar biogás de acordo com o planejamento do empreendimento, podem usar esse recurso para a geração de energia elétrica.

Granjas de suínos têm um potencial energético tão grande associado, que podem gerar energia para atender às necessidades energéticas do produtor rural e, ainda, gerar excedentes que podem ser negociados por meio do sistema de compensação ou de geração compartilhada.

Além do benefício econômico, a utilização dessa fonte energética representa um benefício social por meio da descentralização da geração de energia, fazendo com que a matriz energética seja diversificada e próxima ao consumidor. A proximidade do consumidor evita a necessidade da utilização do sistema de transmissão que, portanto, não precisaria ser expandido com o aumento da demanda energética.

Ademais, a utilização de biodigestores resolve um problema do produtor, que é o tratamento obrigatório dos dejetos animais, agregando valor à solução.

Por fim, salienta-se o benefício ambiental do tratamento dos dejetos suínos por meio de biodigestores. A partir desse tipo de tratamento, o metano gerado é armazenado e utilizado como vetor energético e, portanto, deixa de ser mais um gás causador do efeito estufa emitido na atmosfera.

Diante disso, conclui-se que o biogás representa uma interessante fonte energética, por atender a necessidade da sociedade de maneira limpa, eficaz e sustentável.

Capítulo 3

Planejamento Integrado de Recursos

A necessidade de uma visão sistêmica do problema de produção, transmissão, distribuição e uso da energia elétrica, que pondere adequadamente os diversos aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos envolvidos, requer modificações na forma tradicional de pensar e planejar tais estratégias. Portanto, o Planejamento Integrado de Recursos (PIR) busca aperfeiçoar as técnicas tradicionais de planejamento do setor elétrico, para que os aspectos citados sejam adequadamente incorporados, enfatizando alternativas não convencionais e permitindo a participação de outros protagonistas envolvidos nesse processo (Udaeta, 1997).

Questões como minimização de perdas, programas de conservação de energia, uso eficiente da eletricidade, melhoria da eficiência dos equipamentos e uso de fontes alternativas devem ser realçadas no planejamento e assumidas como recursos disponíveis, em um processo metodológico mais abrangente. Assim como aspectos relacionados com a preservação do meio ambiente, os custos sociais também devem ser incorporados a esse cenário amplificado de planejamento (Udaeta, 1997).

No presente capítulo, são apresentados os conceitos e as características que definem o PIR, assim como os aspectos metodológicos que devem ser seguidos para a sua utilização em um processo de planejamento energético de geração distribuída.

3.1 Características do PIR

O PIR é uma forma de pensar o planejamento energético baseada no envolvimento e na participação de todos os afetados, chamados de interessados-envolvidos (In-En), buscando o conceito de “todos ganham”. Assim sendo, são colocadas no mesmo patamar as condições e as expectativas, as opções do lado do suprimento e do lado da demanda. Nesse contexto, pode-se dizer que o PIR é uma abordagem holística, completa e abrangente (Gimenes et al., 2004; Udaeta, 1997).

Os recursos energéticos, segundo a ótica do PIR, podem ser do lado da demanda ou da oferta. Podem ser citados, como recursos energéticos de oferta, sistemas fotovoltaicos e

eólicos, sistemas térmicos de cogeração, aproveitamento de biogás, células de combustível, dispositivos de armazenamento de energia elétrica ou tecnologias de pequeno porte, normalmente conectadas em redes de distribuição (Alvez, 2015).

Enquanto isso, a avaliação de recursos energéticos do lado da demanda trata da mensuração dos diferentes custos e impactos envolvidos com o uso racional e eficiente de energia em sistemas e equipamentos, associada à adoção de medidas de gerenciamento da energia pelo lado da demanda (Baitelo, 2011).

O PIR é um planejamento voltado para estabelecer a melhor alocação de recursos energéticos, procurando o uso racional dos serviços de energia, e, portanto, considerando a gestão de energia como recurso energético. Levando em conta os custos e benefícios envolvidos na sua implementação, promove o planejamento com maior eficiência energética, considera a adequação ambiental e propõe a realização da análise de incertezas associadas com os diferentes fatores externos e as opções de recursos.

Portanto, são planejadas, implementadas, e avaliadas, conjuntamente, alternativas do lado da oferta e do lado da demanda, para provisão dos serviços energéticos com custos que equilibrem o interesse dos grupos que são afetados nesse processo (Udaeta, 1997). É justamente essa consideração do interesse dos In-En que distancia o PIR do planejamento tradicional. Os In-En compreendem todos aqueles que se interessem, sejam beneficiários ou afetados pelos desdobramentos do processo de planejamento energético (Gimenes et al., 2004; Udaeta, 1997).

O PIR pode ser caracterizado pela qualidade e competência técnica com a qual é desenvolvido; pela harmonia global do planejamento, em que o plano de ação de curto prazo é consistente com o de longo prazo; e pela profundidade com que a participação dos In-En é considerada (Udaeta, 1997). Devido a sua visão sistêmica, o PIR considera como recursos todas as formas factíveis de responder às necessidades energéticas ao menor custo possível para o consumidor e supridor. Com a participação da sociedade e de todos os In-En, mostra-se uma ferramenta condizente com a realidade apresentada neste trabalho.

As bases metodológicas do PIR são exatamente aqueles aspectos que o diferenciam do processo de planejamento tradicional, tais como: a utilização da eficiência energética e do gerenciamento pelo lado da demanda como recursos energéticos, a evolução tecnológica e a preocupação ambiental, a aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável, a busca pelo balanço mais adequado dos objetivos traçados e as atuais tendências de mudança nas estruturas da indústria de eletricidade. Considerando que, até então, o planejamento é desenvolvido buscando-se apenas o suprimento de energia, no processo do PIR, ressalta-se a importância da previsão da demanda, utilizando-se cenários que permitam a análise não só do custo efetivo, mas também dos custos social, ambiental e político (Udaeta, 1997).

No PIR, deve-se considerar constantemente a utilização de técnicas metodológicas de análise de sensibilidade, de cenários, de carteiras, de probabilidades e do pior caso. De maneira geral, o PIR é um processo sistêmico, dinâmico, com reavaliações e realimentações,

em que são determinadas variáveis fundamentais ao setor elétrico para a construção das carteiras de recursos energéticos (Udaeta, 1997).

Além disso, segundo Udaeta (1997), os princípios que fundamentam o PIR podem ser divididos entre metas, previsões, fontes, métodos e definições. As metas são a prestação de serviço ao consumidor, o retorno aos investidores, a manutenção dos baixos níveis de preços, os menores impactos ao meio ambiente e a flexibilidade para enfrentar os riscos e as incertezas. As previsões de demanda, de energia e de capacidade disponível devem ser realizadas com clareza e têm papel fundamental no processo. As fontes que devem ser consideradas são as de recursos disponíveis, de avaliação, de confiabilidade, de taxas e indicadores e de impactos ambientais. Os métodos utilizados para a integração dos In-En incluem avaliação de fatores culturais, legais, sociais e de análise das incertezas. Por fim, consideram-se as definições dadas aos recursos adequados, aos processos de integração e à seleção de alternativas.

3.2 Estrutura do PIR

O PIR pode ser dividido em quatro fases, conforme apresenta a Figura 6, que são o levantamento de informações prévias, o ranqueamento dos recursos energéticos, a integração dos recursos energéticos e a obtenção do plano preferencial de recursos energéticos (Maruyama, 2013).

Na fase do levantamento prévio das informações, é construída uma base de informações contemplando as características ambientais, sociais, políticas e econômicas, que subsidiará as próximas etapas do processo. As informações são organizadas em: inventário energoambiental, listagem e peneiramento dos recursos energéticos e identificação dos In-En. O inventário energoambiental é uma base de dados que caracteriza a região de estudo de maneira sistêmica, listando as vocações, necessidades, limitações, vulnerabilidades e facilidades em relação aos recursos energéticos. Na listagem dos recursos, são considerados todos aqueles possíveis de serem utilizados no horizonte de planejamento, de acordo com as características da região de estudo. São listados os recursos de oferta e de demanda e, então, é realizado o peneiramento, visando à aplicabilidade naquela região. Por fim, a identificação dos In-En representa o levantamento de todos os atores que são afetados pelo processo de planejamento, como ONG's, entidades privadas, empresas, especialistas e a sociedade organizada em geral (Maruyama, 2013).

Neste trabalho, utiliza-se a metodologia do PIR para avaliar o potencial da utilização do biogás como fonte geradora de energia elétrica. Portanto, não é levantada uma listagem dos recursos, visto que o recurso em questão é único. Entretanto, essa etapa é apresentada visando à continuação desta pesquisa por meio da consideração de outros recursos energéticos distribuídos, como painéis fotovoltaicos e os recursos do lado de demanda.

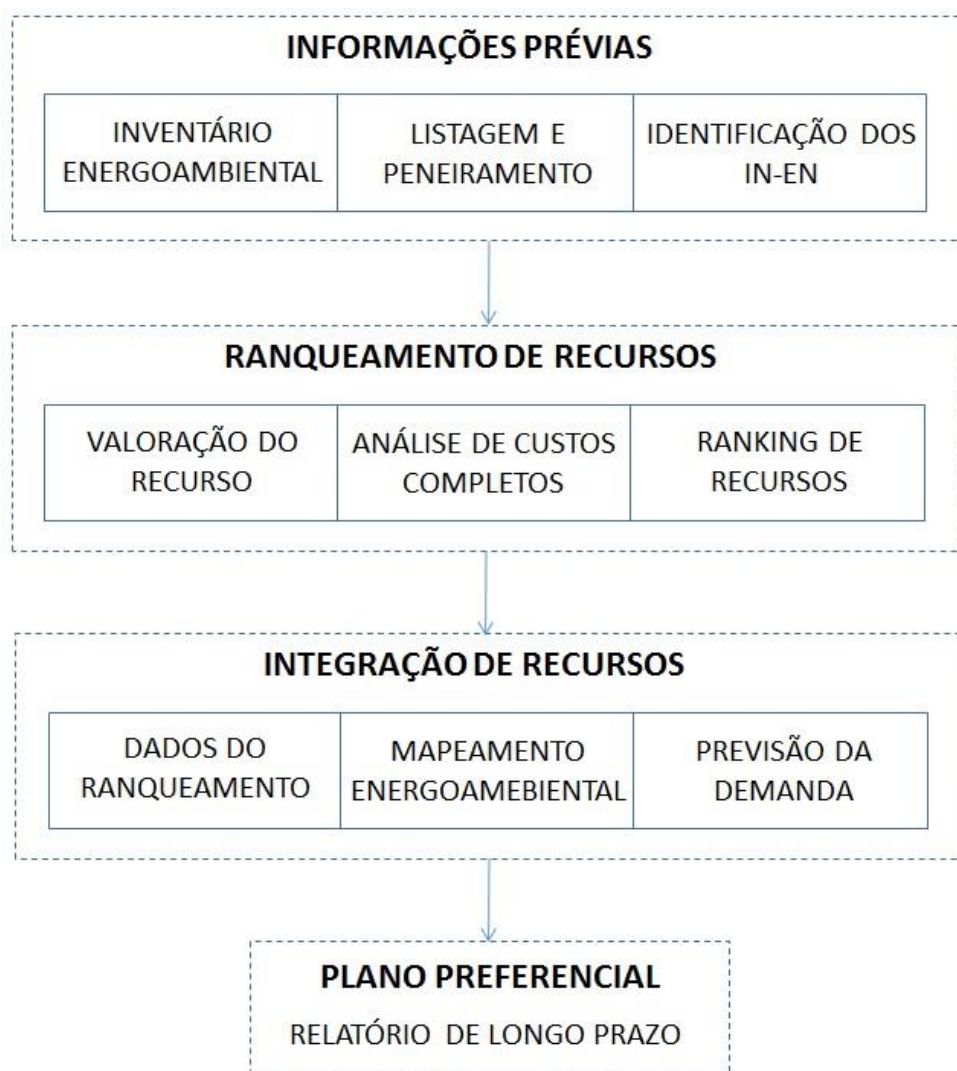


Figura 6 - Diagrama esquemático das etapas básicas do PIR. FONTE: Baseado em Maruyama (2013).

Na segunda fase, é realizado o ranqueamento dos recursos energéticos a partir da sua valoração, seguido da análise de custo completo. A valoração do recurso é uma caracterização completa desses recursos por meio de uma estrutura de atributos e subatributos que contempla as dimensões ambiental, política, social e técnico-econômica. Os atributos e subatributos são mensurados em valores numéricos que traduzem aspectos descritivos do recurso, como um sistema de escala, em que um recurso que polui muito recebe o valor 1 e um recurso que polui pouco recebe o valor 10. A partir da valoração do recurso, realiza-se a Avaliação de Custos Completos, o que possibilita um ranqueamento dos recursos, indicando qual deles é mais vantajoso para determinada região de estudo (Maruyama, 2013).

A integração dos recursos é realizada a partir dos dados obtidos do ranqueamento que, utilizando as informações do inventário energoambiental, dão origem ao mapeamento energoambiental. O mapeamento regional se comporta como uma “imagem momentânea” da região no instante de entrada do recurso, indicando se as características do recurso atendem

aos limites e às normas vigentes nela. Juntamente com o mapeamento energoambiental, deve ser realizada a previsão de demanda energética, de forma a obter o consumo energético ao longo do horizonte de planejamento definido previamente. É nesse momento que as incertezas são inseridas no PIR. Com a utilização de cenários prováveis, otimistas e do pior caso, por exemplo, é possível a escolha de recursos energéticos que atendam a eles, conhecendo o custo completo dessa escolha (Maruyama, 2013).

O resultado do PIR é um plano preferencial de recursos, formalizado em um relatório com um conjunto de recursos energéticos distribuídos sistematicamente ao longo do tempo. Esse documento tem o objetivo de subsidiar a elaboração de planos de curto prazo e serve como base para análises e pesquisas que podem contribuir para alterações e tomadas de decisões nas questões energéticas da região (Maruyama, 2013).

Devido à complexidade da fase de ranqueamento dos recursos energéticos onde é realizada a análise de seu custo completo, a seção a seguir descreve detalhadamente essa fase.

3.2.1 Ranqueamento dos Recursos Energéticos

Para que as questões ambientais, políticas e sociais tenham o mesmo peso das questões técnico-econômicas, é realizado um ranqueamento dos recursos, conforme citado anteriormente. Baseada no estudo desenvolvido por Fujii (2006), a Figura 7 apresenta como é realizado esse processo segundo o PIR.

Após o levantamento das informações prévias, procede-se à seleção dos atributos das quatro dimensões do PIR (técnico-econômica, ambiental, social e política) que serão consideradas. Os atributos devem ser detalhados em subatributos, se necessário, e devem ser estabelecidos os critérios da avaliação global dos recursos, também conhecida como “contabilização dos custos dos recursos”. Esse processo é realizado por meio do estabelecimento de notas e pesos para cada atributo. Deve-se lembrar de que custos não só são os financeiros, e sim todo possível ônus devido à utilização de determinado recurso.

Na seleção e no detalhamento dos atributos, é muito importante a consideração das externalidades, que podem ser impactos positivos ou negativos devido ao processo de geração de energia. Tais impactos têm custos não incorporados ao preço da energia, não sendo repassados aos consumidores no processo de planejamento tradicional.

Por meio do processo de seleção dos atributos e da contabilização dos custos do recurso, é possível compor o custo completo do recurso energético para a região de estudo. A seguir, serão descritos os processos de seleção dos atributos, de definição das escalas de notas dos atributos e de atribuição de notas aos recursos.

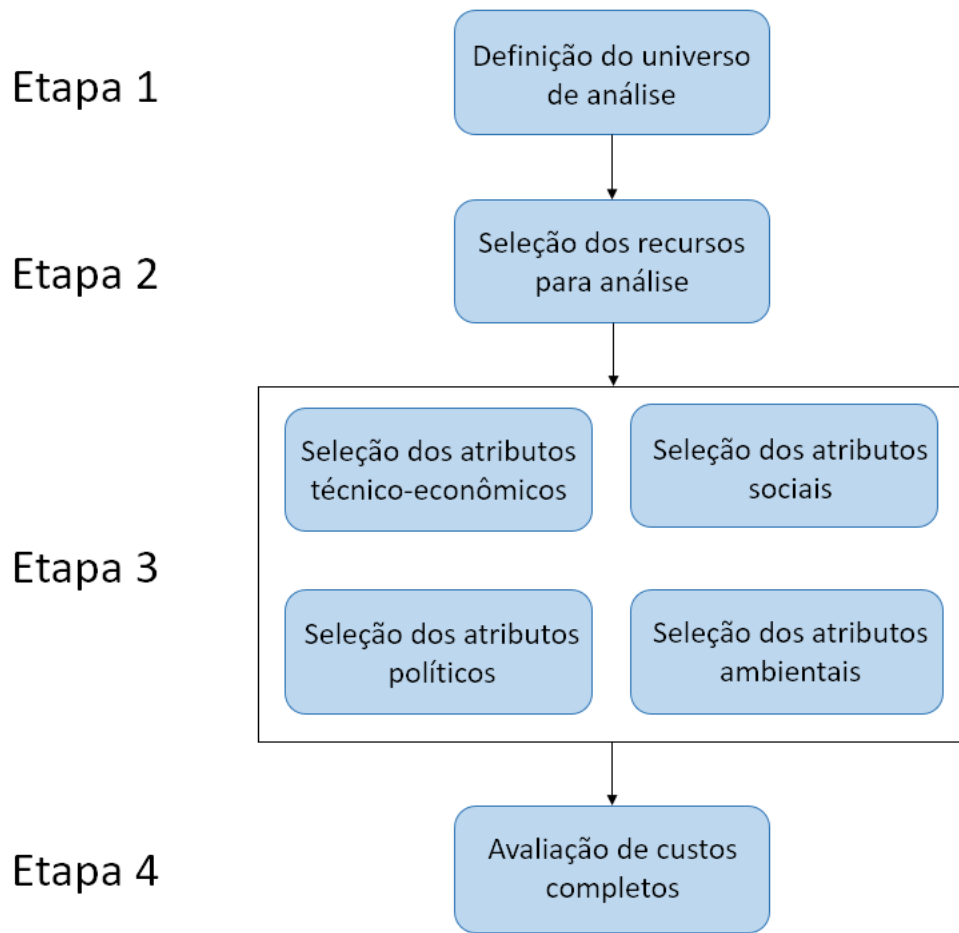


Figura 7 – Processo de valoração dos recursos energéticos em determinada região. Fonte: Adaptada de Fujii (2006).

Seleção dos Atributos

Os atributos devem ser distribuídos dentro de uma das quatro dimensões existentes e, apesar de certos atributos exercerem influência em diversas dimensões, deve-se evitar a repetição de um mesmo elemento em mais de uma dimensão. Na Tabela 2, são apresentados os atributos sugeridos por Fujii (2006) para a aplicação da metodologia de análise. Deve-se lembrar de que é apresentada apenas uma sugestão dos atributos a serem considerados, já que é importante considerar as necessidades e características de cada região antes de definir os atributos para um caso de estudo específico. Desta forma, é natural que os atributos sejam diferentes em casos de estudo diferentes.

Na dimensão técnico-econômica, apresentada na Tabela 2, o primeiro atributo é considerado pelo autor como um dos mais importantes dentro dessa dimensão. O custo unitário de geração pode ser dado em US\$/MWh e reflete diversos fatores que influenciam os custos incorridos no aproveitamento de energia, como complexidade do projeto, licenciamento ambiental, convergência de interesses entre os envolvidos e interessados, custo de financiamento, despesas com combustível, manutenção e operação. O segundo atributo,

chamado custo do empreendimento, representa o custo de instalação e compreende todas as despesas necessárias para a entrada em operação da usina.

O terceiro atributo representa o potencial de suprimento das necessidades energéticas e trata do potencial que dado recurso apresenta na região de análise. São considerados os potenciais teórico e realizável, sendo o teórico aquele que trata do potencial do recurso de forma absoluta com a inexistência de qualquer tipo de barreira para sua implantação; já o realizável tem como propósito complementar a análise realizada no subatributo anterior, considerando, desta vez, as possíveis barreiras e obstáculos a serem transpostos. Portanto, um recurso com grande potencial teórico pode estar sujeito a barreiras que não permitirão seu total aproveitamento.

Tabela 2 - Atributos selecionados e separados em dimensões. Fonte: Baseado em Fujii (2006).

<p>Dimensão técnico-econômica</p>	<p>Custo unitário de geração Custo de empreendimento Potencial de suprimento das necessidades energéticas ✓ <i>Potencial teórico</i> ✓ <i>Potencial realizável</i> Tempo de implantação do recurso Tempo de retorno do investimento Domínio tecnológico do recurso ✓ <i>Tecnologia e equipamento</i> ✓ <i>Pessoal qualificado</i> Confiabilidade e necessidade de assistência Potencial qualitativo de atendimento de necessidades específicas</p>
<p>Dimensão Ambiental</p>	<p>Poluição atmosférica ✓ <i>Óxidos de enxofre</i> ✓ <i>Óxidos de nitrogênio</i> ✓ <i>Óxidos de carbono</i> ✓ <i>Material particulado</i> ✓ <i>Efeito estufa - carbono equivalente</i> Poluição das águas ✓ <i>Impacto da captação de água</i> ✓ <i>Consumo de água</i> ✓ <i>Alteração da qualidade da água</i> Poluição do solo ✓ <i>Contaminação dos solos</i> ✓ <i>Ocupação do solo</i></p>
<p>Dimensão Social</p>	<p>Considerações ambientais e estéticas do recurso Efeitos do desequilíbrio ambiental no meio social ✓ <i>Impactos na saúde pública</i> ✓ <i>Impactos na agricultura</i> ✓ <i>Impactos em edificações</i> ✓ <i>Impactos decorrentes de poluição sonora</i> Impacto humano decorrente do espaço ocupado pelo recurso ✓ <i>Pessoas deslocadas ou lesadas com a formação de</i></p>

	<p><i>reservatórios, usinas de geração ou similares</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Deslocamentos de povos indígenas e quilombolas</i> ✓ <i>Existência de sítios de interesse arqueológico, histórico ou cultural</i> <p>Influência no desenvolvimento e infraestrutura locais</p>
Dimensão política	<p>Motivação dos agentes</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Consumidores de grande porte</i> ✓ <i>Distribuidores de grande porte</i> ✓ <i>Geradoras de energia</i> ✓ <i>Governos federal, estadual e municipal</i> ✓ <i>Movimentos ambientalistas</i> ✓ <i>Movimentos sociais</i> ✓ <i>População em geral</i> <p>Posse da fonte energética Aceitação ou oposição ao recurso Apoio governamental</p>

O tempo de implantação do recurso, apresentado como quarto atributo, é considerado porque o risco ao qual um empreendimento energético está submetido é maior durante a fase de construção do que nas fases de concepção e operação. Portanto, recursos cujo tempo de implantação é menor apresentam vantagem nessa análise.

O tempo de retorno do investimento é visto muitas vezes como um atributo de grande importância para aqueles que consideram que um rápido retorno do capital investido é condição necessária ao investimento. Sob o ponto de vista do PIR, nenhum dos atributos é necessário ou indispensável, e sim o conjunto deles, e ainda mais a relação entre eles. O tempo de retorno de investimento depende da taxa de retorno esperada pelo empreendedor. Isso indica, mais uma vez, a necessidade de analisar o processo como um todo.

O sexto atributo é o domínio tecnológico do recurso, que representa a disponibilidade do equipamento e a existência de pessoal capacitado dentro da região em análise para operá-lo e repará-lo, quando necessário. Este atributo é dividido entre tecnologia e equipamento, que considera a existência de fabricantes e representantes na região em questão e a dificuldade para importação de equipamentos e de pessoal qualificado.

A confiabilidade e a necessidade de assistência são estudadas no sétimo atributo, devido ao seu grande impacto sobre o consumidor. Além disso, os custos da eletricidade podem ser afetados por esse atributo, devido à necessidade de sistemas redundantes, à maior margem de operação e aos maiores custos de manutenção e operação.

O último atributo analisa o potencial qualitativo de atendimento de necessidades específicas do local em questão e é mais perceptível em casos nos quais a região em análise é isolada da rede de transporte. Desta forma, a inserção de um recurso para fornecimento de energia pode suprir necessidades da localidade, como iluminação, armazenamento de perecíveis etc.

A dimensão ambiental é descrita por três atributos: a poluição atmosférica, a poluição das águas e a poluição do solo. A poluição atmosférica considera a emissão dos principais poluentes, dentre eles o óxido de enxofre, o óxido de nitrogênio, o óxido de carbono e o material particulado. Para que seja possível a comparação dentre as diversas opções de oferta desse atributo, é interessante quantificar o volume de poluente emitido por MWh gerado.

A poluição das águas considera de que forma a captação de água para utilização no recurso de geração pode impactar a fauna local, assim como a quantidade de água necessária para a utilização do recurso e as possíveis alterações na qualidade da água devido ao processo de geração de energia.

A poluição do solo é um atributo importante, pois o impacto não é só local, já que, por meio dos lençóis freáticos, a poluição pode ser espalhada por vários quilômetros. Nesse atributo, é considerada a contaminação do solo por substâncias tóxicas e a ocupação do solo. Mesmo que sem a emissão de poluentes para o solo, a utilização do espaço devido à instalação do recurso pode causar uma transformação no local, alterando a biodiversidade presente nele.

A dimensão social é descrita por quatro atributos, que serão descritos a seguir. O primeiro atributo é sobre a funcionalidade e a estética do recurso. Quanto mais funcional o recurso, melhor, pois tais equipamentos, principalmente os recursos energéticos de pequeno porte, são operados por pessoas não especializadas. Já a estética do recurso deve ser considerada porque influi no conforto das pessoas que estão em contato com ele, já que a instalação do recurso pode afetar o equilíbrio estético do local, implicando uma maior ou menor aceitabilidade pelas pessoas que o frequentam.

O segundo atributo considerado são os efeitos do desequilíbrio ambiental no meio social. Nesse atributo, é analisado de que forma as alterações no ambiente devido à utilização do recurso podem causar mudanças na saúde pública, na agricultura local, nas edificações e, ainda, provocar poluição sonora.

O impacto sofrido pelo homem, decorrente da ocupação do espaço pelo recurso, é o terceiro atributo analisado na dimensão social. É considerada a necessidade do deslocamento de pessoas para a utilização do recurso, com uma atenção especial caso seja necessário o deslocamento de povos indígenas e quilombolas, devido ao aspecto cultural e histórico envolvido nesses casos. Além disso, é analisada, nesse atributo, a existência de sítios de interesse arqueológico, histórico ou cultural no local a ser ocupado pelo recurso.

O quarto atributo é a influência que o recurso pode causar no desenvolvimento e na infraestrutura local por meio da criação de empregos na região, estímulo ao setor comercial e imobiliário e maior arrecadação de impostos, por exemplo.

A quarta e última categoria é a dimensão política, que foi dividida em cinco atributos: motivação dos agentes, posse da fonte energética, aceitação ou oposição ao recurso, apoio governamental e conjunção e encontro de interesses.

Consideram-se, como agentes, os diversos atores envolvidos no planejamento do projeto da utilização de determinado recurso energético. Portanto, o primeiro atributo da dimensão política tem como função considerar a opinião de cada agente. No projeto de utilização de biogás, produzido da biodigestão de dejetos suínos como fonte primária para geração de energia elétrica, os agentes são os consumidores da região, o proprietário da granja, a distribuidora de energia da região, as cooperativas, o governo municipal e a população em geral.

O segundo atributo analisa a posse da fonte energética, isto é, se esta é de acesso livre, de posse da União ou estrangeira. Além disso, é adequado identificarem-se possíveis fatores de instabilidade no fornecimento da fonte energética.

O terceiro atributo mensura a aceitação ou oposição ao recurso por todos os agentes envolvidos. Este é um dos atributos mais importantes da dimensão política, pois, se os agentes envolvidos não forem favoráveis à adoção do recurso, o processo torna-se mais longo, custoso e muitas vezes sem condições de conclusão.

O quarto atributo considera o apoio governamental ao recurso, já que este pode exercer influência considerável no planejamento energético. Seja por meio de subsídios, simplificação da burocracia ou regime tributário diferenciado, o governo pode estimular mudanças no comportamento de outros agentes, tornando a adoção de um dado recurso mais atrativa ou não.

A conjunção e o encontro de interesses finalizam a dimensão política, avaliando-se a interação entre os diversos agentes. Essa consideração se mostra importante porque não basta um recurso energético ser apreciado por metade das partes envolvidas, sendo que a outra metade discorda drasticamente. É necessário que essas partes sejam capazes de encontrar um ponto de equilíbrio, de modo a viabilizar o uso do recurso.

Definição das escalas de notas dos atributos

Com os atributos definidos e separados por dimensão, passa-se então para a definição das escalas e dos pesos dos atributos. É recomendado que as escalas representem conceitos, como “ideal”, “adequado”, “regular” e “inadequado”, como exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Sugestão de escalas e notas. Fonte: Fujii (2006).

Atributo	Tempo de retorno do investimento realizado no empreendimento
Ideal (10)	Menor que 3 anos
Adequado (6,5)	De 3 a 7 anos
Regular (3,5)	De 7 a 12 anos
Inadequado (0)	Maior que 12 anos

Junto à definição das escalas, são definidos os pesos de cada atributo. Devem ser analisados quais os fatores mais relevantes junto aos envolvidos e interessados no recurso e na utilização deste, de forma a dar maior importância aos atributos que tenham uma maior representatividade naquela região de análise.

Atribuição de notas aos recursos

Após a definição dos atributos, das suas escalas e pesos, são atribuídas as notas de cada atributo que irão compor a nota final do recurso dentro de cada dimensão. Para a atribuição das notas aos recursos, devem ser consideradas pelos planejadores a opinião dos In-En, assim como a sua experiência como planejadores. Além disso, a atribuição de notas deve ocorrer em um único dia, pois muitas vezes as análises são complexas ou subconscientes e, ao se interromper e retomar esse processo, pode ser que não se construa a mesma estrutura avaliativa por parte dos avaliadores. Por fim, as notas obtidas nas quatro dimensões são somadas e divididas por 4, fornecendo-se a nota final do recurso que representa o seu custo global.

Deve-se observar que, quanto maior a nota obtida por um recurso, maior será a sua atratividade no âmbito do PIR.

3.2.2 Exemplo de Aplicação do PIR

Ainda no trabalho de Fujii (2006), o modelo proposto é aplicado em um estudo de caso na região administrativa de Araçatuba, em um projeto de Planejamento Integrado de Recursos Regional. Dentre os recursos energéticos considerados nessa região, bagaço de cana, coletores solares, cascas de arroz, dejetos animais e pequenas centrais hidráulicas (PCH) obtiveram notas similares ou superiores a 8, o que corresponde a um custo global baixo e, portanto, atrativo. Por outro lado, recursos economicamente viáveis como diesel, óleo combustível e gás natural obtiveram notas próximas a 5, o que equivale a um desempenho apenas regular. Isso se deve aos aspectos políticos, como a indefinição nas políticas de preço e expansão da rede, no caso do gás natural, e a aspectos socioambientais, como no caso do óleo combustível e do diesel.

Essa disparidade comprova, mais uma vez, a importância de se avaliar cada recurso disponível em cada região específica, pois o que parece ser obviamente a opção mais vantajosa, já que é a economicamente mais viável, pode não ser a melhor ao se aplicar uma visão sistêmica ao recurso.

3.3 Análise da Utilização do Biogás como Fonte de Geração

Este trabalho visa à utilização do planejamento integrado de recursos para avaliar o potencial de utilização do biogás obtido da biodigestão de dejetos suínos para geração de energia elétrica. Portanto, dada a especificidade do caso, foi utilizado como base o trabalho desenvolvido por Fujii (2006) para a seleção dos atributos das dimensões técnico-econômica, ambiental, social e política a serem analisados.

A Tabela 4 apresenta as dimensões propostas por Fujii (2006) para avaliação do potencial do recurso do ponto de vista ambiental. Dessa tabela, foi retirada a avaliação referente à natureza do combustível, já que, no caso do estudo aqui proposto, o combustível é exclusivamente o biogás. Além disso, mesmo que seja considerada a utilização de outros recursos posteriormente, como energia solar, ainda assim, seriam todas fontes renováveis.

Ainda na Tabela 4, foi adicionada a avaliação quanto à capacidade do recurso de reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera devido à utilização do recurso energético. A escolha do peso 3 foi baseada na comparação com o atributo que representa a emissão de GEE. Considerou-se que tão importante quanto uma baixa emissão desses gases é a utilização deles, impedindo que sejam liberados na atmosfera.

A Tabela 5 apresenta os atributos da dimensão técnico-econômica proposta por Fujii (2006). Dela foi removido o atributo que representa de que forma se dá o suprimento de combustível, se tem custo regulado ou livre, pois o combustível dos recursos considerados não tem custo.

A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os atributos da dimensão social e da dimensão política e são apresentadas conforme proposto por Fujii (2006).

Tabela 4 - Atributos, notas e pesos da dimensão ambiental.

	10	5	0	Peso
Poluição atmosférica	Não polui	Afeta a qualidade do ar de forma leve	Afeta o equilíbrio ambiental	2
Poluição das águas	Não polui	Afeta a temperatura das águas	Dejetos nocivos nas águas	2
Poluição do solo	Não polui	Afeta a qualidade da terra de forma leve	Dejetos nocivos na terra	2
Tamanho da área afetada	Não significativa	500m ² <área<1500m ²	>1500m ²	1

Facilidade para obtenção das licenças ambientais	Sem obstáculos significativos	Obstáculos razoáveis	Obstáculos grandes	3
Redução da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE)	Alta	Baixa	Nenhuma	3
Emissão de GEE	Desprezível	Médio	Alto	3

Após a definição dos atributos e de suas respectivas escalas e notas, segue-se o processo por meio da participação dos In-En. No caso do estudo em questão, essa participação pode se dar com entrevistas e questionários realizados junto ao produtor rural, pesquisas de campo nas propriedades e pesquisas de opinião junto às cooperativas. Deve-se, nesse momento, identificar as necessidades da propriedade e da região que pode ser afetada com a utilização do recurso energético em questão, assim como os objetivos do ponto de vista dos In-En.

Com as informações obtidas por meio da participação dos In-En, devem ser definidas as notas de cada atributo. A dimensão técnico-econômica, conforme apresentado na Tabela 2, considera como um dos atributos o custo de geração do recurso, dado em unidades monetárias por MWh. Para calcular esse custo, foi desenvolvido um modelo de otimização que busca a melhor tecnologia e considera o custo de instalação e operação ótima para o aproveitamento do biogás na geração de energia elétrica, que será abordado no próximo capítulo.

Tabela 5 - Atributos, notas e pesos da dimensão técnico-econômica.

	10	7,5	5	2,5	0	Peso
Custo empreendim. (US\$/kW)	custo<500	500<custo<=900	900<custo<=1500	1500<custo<=2000	custo>2000	4
Suprimento de Combustível		Custo regulado		Custo livre		2
Custo/Dificuldade de Manutenção	Sem necessidade de manutenção frequente - utiliza peças nacionais	Manutenção frequente e com necessidade de peças nacionais	Sem necessidade de manutenção frequente - utiliza peças importadas	Manutenção frequente e com necessidade de peças importadas	Necessidade de deslocamento da tecnologia para outros lugares	2
Custo de Geração (US\$/MWh)	custo<40		40<custo<90		custo>90	4
Distância Fonte e o centro de Consumo	1 km<dist. <=10 km	10 km<dist. <=100 km	100 km<dist. <=500 km	dist.>500 km		2
Tempo de construção	t<=6 meses		6 meses<t<=2 anos		t>2 anos	3
Disponibilidade do recurso energético na região	Alta		Média		Baixa	2
Tempo de retorno do investimento	t<=3 anos	3 anos<t<=7 anos	7 anos<t<=12 anos	12 anos<t<=15 anos	15 anos<t	4
Domínio da tecnologia	Regional	Regional/Nacional	Nacional	Nacional/Importado	Importado	1
Fator de Capacidade	FC>=70%		70%>FC>=40%		FC<40%	3
Mecanismos de incentivo	Proinfra/PPA	Linhas de financiamento	Subsídios		Sobretaxação	2
Potencial comercializ. Excedentes	Grande		Médio		Baixo	1

Tabela 6 - Atributos, notas e pesos da dimensão social.

	10	5	0	Peso
Contaminação atmosférica	Não polui	Afeta a qualidade do ar de forma leve	Poluição a ponto de afetar a qualidade de vida da população	1
Contaminação das águas	Não polui	Afeta a temperatura das águas	Dejetos nocivos nas águas	1
Contaminação do solo	Não polui	Afeta a qualidade da terra de forma leve	Dejetos nocivos na terra	1
Contaminação sonora	Não polui	Ruídos médios	Ruídos nocivos a população local ou aos animais	1
Utilidades secundárias para a população	Criação de áreas que podem ser utilizadas para atividades lucrativas ou que melhorem as condições da região	Criação de áreas que podem ser utilizadas para lazer	Não acrescenta nenhuma utilidade além da energia	2
Empregos (quanti e quali)	Grande Quantidade e Qualidade de empregos	Alta Quanti e Baixa ou vice-versa	Baixa Quantidade e Qualidade de empregos	2
Potencial de adoção em larga escala na região	Alto	Médio	Baixo	2

Após a participação dos In-En e do cálculo dos custos de geração, é calculada a nota de cada dimensão, ponderando-as de acordo com os pesos atribuídos a elas. Ao final desse processo, tem-se uma nota para cada dimensão e, por meio da média delas, tem-se a nota final do recurso. Uma nota elevada representa grande atratividade do recurso dentro do contexto de análise.

A aplicação do PIR pode ser realizada para vários recursos energéticos distribuídos aplicados a uma mesma localidade. Ou seja, o produtor rural pode, junto com a equipe técnica responsável, utilizar a metodologia proposta pelo PIR para avaliar o potencial da utilização do biogás como fonte energética somada à utilização de painéis fotovoltaicos instalados no telhado dos galpões da granja. Dessa forma, as duas opções

podem ser avaliadas, possibilitando-se a comparação entre elas, caso seja de interesse a utilização de apenas uma ou, ainda, a associação entre elas.

Tabela 7 - Atributos, notas e pesos da dimensão política.

	10	7,5	5	2,5	0	Peso
Disponibilidade do Combustível	Combustível abundante obtido na região		Gás natural		Combustível derivado de petróleo	2
Risco a Exposição Cambial	Tecnologia nacional sem risco cambial nos fluxos de caixa		Tecnologia mista, com risco cambial parcial nos fluxos de caixa		Tecnologia importada com grande influência do câmbio nos fluxos de caixa	3
Oposição da População	População apoia este tipo de tecnologia		População não se opõe, mas há movimentos de oposição		População contra esta tecnologia	4
Propriedade da Fonte de Energia	Fonte obtida na região				Fonte externa à região	2
Apoio Governamental	Governo é ativamente favorável à adoção da tecnologia	Governo é passivamente favorável à adoção da tecnologia	Governo é indiferente	Governo é passivamente oposto à adoção da tecnologia	Governo é ativamente oposto à adoção da tecnologia	4
Implicações regulatórias	Existe legislação regulatória favorável aos investimentos		Existe legislação regulatória, mas ela é passível de interpretações dúbias		Não existe legislação regulatória	3

3.4 Conclusões

O PIR é uma proposta de mudança na forma de pensar o planejamento das questões energéticas. Sua aplicação permite desde a avaliação do potencial de um único recurso a ser utilizado em uma determinada região, como neste trabalho, até o desenvolvimento de todo o processo de planejamento energético, com a utilização de diversos recursos, para atender determinada demanda em uma região.

O PIR busca selecionar a melhor dentre as opções de oferta disponíveis para atender a uma determinada demanda com o menor custo possível. É importante destacar que os recursos energéticos podem ser do lado de demanda ou de oferta, sendo que cada recurso deve ser valorado e analisado para que se possa concluir sobre o seu potencial de utilização naquele caso. Também é importante salientar que o custo não é só aquele financeiro, contabilizado em unidades monetárias, mas sim todo o ônus ocasionado por uma determinada escolha, contabilizando-se os custos decorrentes de quatro dimensões: a ambiental, a econômica, a social e a política. Isso é possível com a participação dos In-En no processo de planejamento.

Portanto, conclui-se que o PIR é um planejamento voltado para estabelecer a melhor alocação de recursos energéticos, procurando o uso racional dos serviços de energia. Mas, além disso, é uma ferramenta capaz de avaliar um determinado recurso energético, nesse caso o biogás produzido a partir de dejetos suínos, levando em conta os custos e benefícios envolvidos na sua implementação, promovendo o planejamento com maior eficiência energética, considerando a adequação ambiental e propondo a realização da análise de incertezas associadas com os diferentes fatores externos e as opções desse recurso.

Capítulo 4

Modelo matemático

A metodologia descrita pelo PIR para análise da viabilidade de determinada tecnologia considera as dimensões técnica, ambiental, social e política, conforme abordado anteriormente. Para analisar os aspectos que descrevem a dimensão técnica-econômica, será utilizado neste trabalho o modelo matemático desenvolvido por Lotero e Colombari (2015). Esse modelo é uma análise dos investimentos disponíveis de geração de energia a partir de biogás, que permite selecionar o tamanho da unidade ótima e a quantidade de energia que deve ser gerada por ela a cada hora, dia e mês.

O objetivo desse modelo é apresentar, do ponto de vista do investidor, qual o tamanho, a tecnologia e a operação ótima de uma unidade de geração de energia elétrica que utiliza o biogás como fonte primária de energia. Considera-se um contexto no qual a unidade de GD será instalada em uma unidade consumidora de energia que tem um processo produtivo, sendo obrigatório o tratamento de dejetos orgânicos, como, por exemplo, uma granja produtora de suínos.

Para determinar se um projeto de geração distribuída é economicamente viável, esse modelo considera todos os possíveis benefícios econômicos e custos associados ao investimento, assim como os custos de operação e manutenção da unidade de geração.

O custo de investimento corresponde aos gastos iniciais do projeto de geração distribuída, ou seja, toda a estrutura que deve ser construída para produzir energia elétrica. Nesse caso, esses custos incluem os biodigestores, o conjunto motor gerador e os gastos associados à sua instalação.

O custo de operação e manutenção da unidade de geração corresponde às despesas para manter o sistema em funcionamento durante sua vida útil. Isso inclui o custo de mão de obra, os gastos com lubrificação e as trocas de peças em geral. Nesse grupo, também deve ser incluído o custo do combustível, que, no caso do biogás, pode ser nulo, caso este seja considerado um subproduto resultante do processo obrigatório de tratamento de dejetos.

Quanto aos benefícios econômicos, pode-se citar o atendimento da demanda do próprio produtor, ou seja, a redução de seu consumo de energia, a possibilidade de vender energia para a concessionária, a venda de créditos de carbono devido à queima de metano e a possível utilização do resíduo da biodigestão como biofertilizante.

O modelo desenvolvido por Lotero e Colombari (2015) é de programação linear inteiro misto, o qual é resolvido utilizando-se técnicas clássicas de otimização, tendo como objetivo maximizar os benefícios econômicos da instalação da unidade de geração distribuída.

A alternativa ótima é escolhida dentro de uma lista com diversas tecnologias de conversão e tamanhos de unidades. Para cada uma dessas alternativas, devem ser conhecidos os custos de investimento, operação e manutenção, a potência nominal e o consumo de biogás. Além disso, o processo de otimização depende de algumas características particulares do investidor interessado na unidade, como sua curva de carga elétrica, a estrutura tarifária na qual se enquadra, o poder calorífico do biogás produzido, sua taxa de produção e a capacidade de armazenamento. Todos esses parâmetros correspondem às entradas do modelo que devem ser informadas pelo usuário.

O modelo de análise de investimentos está escrito e é executado em *General Algebraic Modeling System (GAMS)* enquanto a interface com o usuário e os parâmetros de entrada e de saída é feita com uso do *Microsoft Excel*. Uma visão geral sobre a ferramenta desenvolvida por Lotero e Colombari (2015) é mostrada na Figura 8, e o modelo matemático será descrito nas seções a seguir.

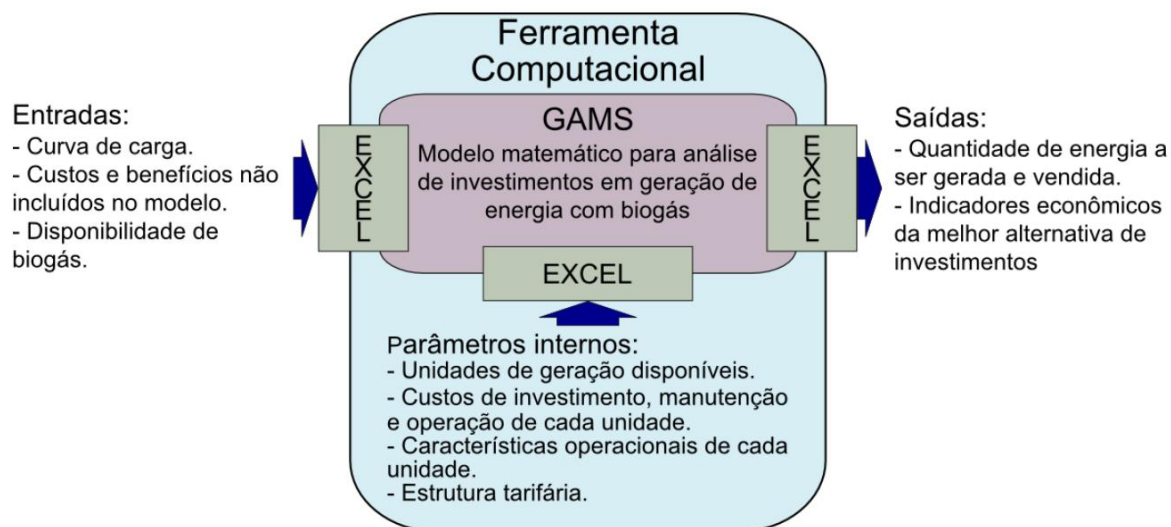


Figura 8 - Diagrama esquemático da ferramenta computacional desenvolvida. Fonte: Lotero e Colombari (2015).

4.1 Função Objetivo

A função objetivo que deve ser maximizada corresponde à quantificação do benefício auferido com a instalação da unidade de geração distribuída. Esse benefício é determinado a

partir das estimativas do fluxo de caixa do investimento, utilizando-se como atributo de avaliação da viabilidade o valor presente líquido (VPL) desse fluxo. Para isso, é necessário conhecer as fontes de receitas e os custos durante o horizonte a ser considerado, sendo, neste caso, a vida útil da tecnologia selecionada.

Os custos considerados foram o de investimento ($ZINV$) e o de manutenção e operação da tecnologia de geração de energia elétrica que pode ser selecionada ($ZMEO$). Já as receitas são provenientes da venda do excedente de energia ($ZVEN$), da economia com a energia que deixa de ser fornecida pela concessionária ao produtor ($ZECO$) e da venda de crédito de carbonos ($ZCAR$). A função objetivo desse modelo é apresentada nas Equações 1 a 10 a seguir:

$$Z = -ZINV + \left[\frac{1-(1+i)^{-NT}}{i} \right] \cdot (ZVEN + ZCAR + ZECO - ZMEO) \quad 1$$

Na Equação 2, o custo de investimento é calculado como o custo associado ao biodigestor mais o custo de todas as unidades instaladas, incluindo todos os elementos auxiliares, como filtros, sopradores, medidores, proteção e sistema de sincronização com a rede da distribuidora. Apesar de, neste trabalho, só se considerar geração de energia a partir do biogás e, portanto, qualquer tecnologia de geração obrigar a construção do biodigestor, a variável BIO foi inserida, visando a expandir o modelo e utilizá-lo com outros tipos de recursos energéticos distribuídos.

$$ZINV = BIODIGEST \cdot BIO + \sum_{I=1}^{NA} CINV_I \cdot X_I \quad 2$$

Sendo:

$$\sum_{I=1}^{NA} X_I \leq BIO \cdot 10 \quad 3$$

Onde:

$BIODIGEST$	Custo de investimento do biodigestor;
BIO	Variável binária que recebe 1 quando uma tecnologia de geração que utiliza o biogás como fonte primária for selecionada;
$CINV_I$	Custo de investimento da unidade de geração de energia elétrica I (R\$);
X_I	Variável binária que recebe 1 quando a unidade I de GD é instalada;
NA	Número de alternativas de investimento.

Na equação 4, o benefício associado à venda de energia é obtido multiplicando-se o preço de venda pela quantidade de energia gerada em cada hora. Os dois primeiros somatórios representam os dias dos 12 meses do ano, separados entre dias de semana e dias de finais de semana. O terceiro somatório representa as 24 horas do dia, em que uma determinada

potência de energia elétrica $PVEN_{MES,DIA,H}$ é vendida à distribuidora por um preço $TARVEND_{MES,H}$.

$$ZVEN = \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \cdot \sum_{H=1}^{24} TARVEND_{MES,H} \cdot PVEN_{MES,DIA,H} \quad 4$$

Onde:

$QUANTD_{DIA}$	Quantidade de dias para cada índice DIA ;
$TARVEND_{MES,H}$	Preço da venda de energia para cada mês e hora (R\$/kWh);
$PVEN_{MES,DIA,H}$	Potência total das unidades de GD para venda de energia à distribuidora (kWh);
MES	Índice dos meses do ano;
DIA	Índice com os tipos de dias (semana e final de semana).

O benefício obtido pela venda de crédito de carbono é calculado por meio da Equação 5, que considera que o metano contribui 21 vezes mais ao efeito estufa do que o carbono. O fator 1000, dividindo todos os termos da equação, é para a conversão de unidade tonelada para quilograma, enquanto o somatório representa a quantidade de biogás queimada durante um ano inteiro. Para o cálculo da quantidade de carbono que pode ser comercializada, são consideradas as parcelas de biogás queimado em flare $BQUE_{MES,DIA,H}$ e a quantidade de biogás utilizada para geração de energia elétrica $BGER_{MES,DIA,H}$.

$$ZCAR = \frac{21}{1000} \cdot v \cdot \rho_{CH_4} \cdot K_{CO_2} \cdot \quad 5$$

$$\sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \sum_{H=1}^{24} (BQUE_{MES,DIA,H} + BGER_{MES,DIA,H})$$

Onde:

v	Porcentagem de metano no biogás;
ρ_{CH_4}	Densidade do metano (kg/m ³);
K_{CO_2}	Valor pago por cada tonelada de carbono queimada (R\$/tonC);
$BQUE_{MES,DIA,H}$	Quantidade de biogás queimada em flare (m ³ /h);
$BGER_{MES,DIA,H}$	Quantidade total de biogás utilizada para gerar energia (m ³ /h).

A redução na conta de energia da unidade consumidora onde se pretende instalar GD também tem dois termos. O primeiro termo da Equação 6 está associado à utilização da energia da GD, mostrando o valor monetário referente à parcela da energia consumida que deixa de ser atendida pela concessionária. O segundo termo mostra a redução na fatura devido à menor demanda contratada, já que parte da demanda total passa a ser atendida pela GD instalada na unidade consumidora. Para determinar essa economia, é necessário encontrar a

demanda máxima da unidade consumidora do investidor após a instalação da unidade de geração distribuída. Isso pode ser realizado a partir das restrições dadas pelas Equações 7 a 9.

$$ZECO = \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \cdot \sum_{H=1}^{24} TARIFA_{MES,H} \cdot (PDEM_{MES,DIA,H} - PCON_{MES,DIA,H}) + [12 \cdot TARDF \cdot (DMF - DCF) + 12 \cdot TARDP \cdot (DMP - DCP)] \quad 6$$

Onde:

$TARIFA_{MES,H}$	Tarifa de energia para cada mês e hora (R\$/kWh);
$PDEM_{MES,DIA,H}$	Consumo de energia do consumidor (kWh);
$PCON_{MES,DIA,H}$	Parcela do consumo de energia elétrica do consumidor atendido pela distribuidora (kWh);
$TARDF$	Tarifa da demanda fora de ponta (R\$/kW);
DMF	Demanda que seria contratada sem GD fora de ponta (kW);
DCF	Demanda contratada fora de ponta após instalação da GD (kW);
$TARDP$	Tarifa da demanda no horário de ponta (R\$/kW);
DMP	Demanda que seria contratada sem GD no horário de ponta (kW);
DCP	Demanda contratada no horário de ponta após instalação da GD (kW).

Os parâmetros $TARIFA$, $TARDF$ e $TARDP$ do modelo estão relacionados à estrutura tarifária horo-sazonal da energia elétrica de acordo com a legislação brasileira. No modelo proposto por Lotero e Colombari (2015), o produtor pode estar enquadrado na tarifa convencional, verde ou azul, nas quais o preço da energia e da demanda contratada difere nos horários de ponta e fora de ponta.

É necessário garantir que a demanda contratada da distribuidora seja maior que a potência necessária de cada mês, considerando-se todos os meses do ano.

$$DCF \geq PCON_{MES,SEM,HF} \quad 7$$

$$DCF \geq PCON_{MES,FDS,H} \quad 8$$

$$DCP \geq PCON_{MES,SEM,HP} \quad 9$$

Na Equação 10, é possível observar que os custos de manutenção e operação foram divididos em custos fixos e custos variáveis. Os custos variáveis dependem do tempo de operação da unidade de geração, ao contrário dos custos fixos, indicados no primeiro termo da Equação 10, que só dependem da instalação da unidade. Os custos variáveis estão no segundo termo e dependem da potência desenvolvida pela unidade de GD.

$$\begin{aligned}
ZMEO &= \sum_{I=1}^{NA} CMOF_I \cdot X_I + \\
&\sum_{I=1}^{NA} \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \cdot \sum_{H=1}^{24} CMOV_I \cdot (PINTU_{I,MES,DIA,H} \\
&\quad + PVENU_{I,MES,DIA,H})
\end{aligned} \tag{10}$$

Onde:

- $CMOF_I$ Custo fixo de operação e manutenção da alternativa I (R\$/ano);
- X_I Variável binária que recebe 1 quando a unidade I de GD é instalada;
- $CMOV_I$ Custo variável de operação e manutenção da alternativa I (R\$/kWh);
- $PINTU_{I,MES,DIA,H}$ Potência com a qual é gerada energia pela unidade I para atender à demanda interna (kW);
- $PVENU_{I,MES,DIA,H}$ Potência com a qual é gerada energia pela unidade I para ser vendida para a distribuidora (kW).

4.2 Balanço Energético e Operação da Unidade

Considera-se que a demanda do consumidor pode ser atendida pela GD instalada e pela concessionária de distribuição, conforme descreve a Equação 11:

$$PINT_{MES,DIA,H} + PCON_{MES,DIA,H} = PDEM_{MES,DIA,H} \tag{11}$$

Sendo:

$$PINT_{MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} PINTU_{I,MES,DIA,H} \tag{12}$$

Onde:

- $PINT_{MES,DIA,H}$ Potência com a qual é gerada energia para atender à demanda interna (kWh/h).

Foram inseridas as restrições a seguir para impedir a compra e venda simultânea de eletricidade da concessionária:

$$ZDM_{MES,DIA,H} + ZDG_{MES,DIA,H} \leq 1 \tag{13}$$

$$PCON_{MES,DIA,H} \leq M * ZDM_{MES,DIA,H} \tag{14}$$

$$PVEN_{MES,DIA,H} \leq M * ZDG_{MES,DIA,H} \tag{15}$$

Onde:

- M Constante de valor elevado

$ZDM_{MES,DIA,H}$ Variável binária que recebe 1 quando a parcela do consumo é atendida pela energia elétrica comprada da concessionária;

$ZDG_{MES,DIA,H}$ Variável binária que recebe 1 quando a parcela do consumo é atendida pela energia gerada pela tecnologia de GD.

A relação entre a potência desenvolvida e o consumo de combustível da máquina motriz primária foi aproximada segundo Santos (2009), sendo o fator no denominador necessário para a conversão de unidades, dado em $kcal/kWh$:

$$PINTU_{I,MES,DIA,H} + PVENU_{I,MES,DIA,H} = \frac{\eta_I \cdot \rho_{CH4} \cdot C_{CH4}}{859,85} \cdot BGERU_{I,MES,DIA,H} \quad 16$$

Onde:

η_I Rendimento da unidade I ;

C_{CH4} Poder calorífico do metano (kcal/kg);

$BGERU_{I,MES,DIA,H}$ Quantidade de biogás utilizada para gerar energia na unidade I (m^3/h).

Também devem ser respeitados os limites de geração das unidades de GD:

$$PINTU_{I,MES,DIA,H} + PVENU_{I,MES,DIA,H} \leq MAXCAP_I \cdot X_I \quad 17$$

Onde:

$MAXCAP_I$ Capacidade máxima da unidade I (kW).

A Equação 18 indica que a potência com a qual é vendida energia para a empresa de distribuição local é a soma da potência com a qual é despachada cada unidade de GD instalada. Da mesma maneira, a Equação 19 mostra que o biogás total utilizado para a geração de energia elétrica é a soma da quantidade de biogás utilizado por cada unidade.

$$PVEN_{MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} PVENU_{I,MES,DIA,H} \quad 18$$

$$BGER_{MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} BGERU_{I,MES,DIA,H} \quad 19$$

4.3 Produção, Armazenamento e Consumo do Biogás

A Equação 20 representa a conservação da quantidade de biogás, assegurando que todo o biogás produzido seja armazenado, queimado em *flare* ou utilizado para gerar energia elétrica.

$$BARM_{MES,DIA,H} = BARM_{MES,DIA,H-1} + BPRO_{MES} - BGER_{MES,DIA,H} - BQUE_{MES,DIA,H} \quad 20$$

Quanto ao armazenamento do biogás, a Equação 21 garante que a capacidade máxima do reservatório seja respeitada.

$$BARM_{MES,DIA,H} \leq CAPMAX \quad 21$$

Onde:

$BARM_{MES,DIA,H}$ Quantidade de biogás armazenada (m³);

$CAPMAX$ Máxima capacidade de armazenamento de biogás (m³);

$BPRO_{MES}$ Biogás produzido durante o mês (m³/h).

Finalmente, a última restrição, apresentada na Equação 22, garante que pelo menos uma unidade de geração com biogás deve ser instalada. Essa restrição assegura que a melhor alternativa de tamanho e operação da unidade seja exibida, uma vez que ela exclui a alternativa de não ser realizado o investimento em uma unidade.

$$\sum_{I=1}^{NA} X_I \geq 1 \quad 22$$

Quando o VPL for menor que zero, o investimento é inviável do ponto de vista econômico; isso quer dizer que os resultados de caixa futuros não serão suficientes para recuperar o capital investido. Por outro lado, quando o valor presente líquido for maior do que zero, afirma-se que o investimento é economicamente viável, pois será capaz de garantir e remunerar o capital investido com uma taxa efetiva de retorno superior à taxa de retorno exigida pelo investidor. Caso o VPL seja igual à zero, não há remuneração nem perda sobre o capital investido (Castanheira e Macedo, 2012). No caso de o VPL ser igual à zero, sob a ótica do PIR, o investimento ainda pode se fazer viável e ainda lucrativo, devido aos aspectos sociais, ambientais e políticos considerados no processo.

4.4 Incerteza e risco

A todo projeto de investimento, está associado um risco, visto que o sucesso dele depende de informações futuras incertas, que podem ser estimadas, mas não conhecidas com exatidão. A aleatoriedade do clima, de acontecimentos políticos e sociais e as descobertas científicas são exemplos que ressaltam a incerteza sobre o futuro (Galesne et al., 1999).

No caso da geração distribuída, as principais fontes de incerteza são a intermitência das fontes primárias (disponibilidade de sol, vento, água ou biogás), a variação dos preços dos

combustíveis dos REDs utilizados, quando for o caso, a variação da tarifa de energia elétrica e a demanda de energia elétrica ou térmica do consumidor (Farzan, 2013; Alvez, 2015).

As incertezas associadas a projetos de geração de energia elétrica conduzem à alteração da geração planejada, ocasionando variações de custos e receitas (Alvez, 2015). Logo, existe um risco associado a uma incerteza, ou seja, é possível que ocorram resultados não desejados, como perda de receitas ou elevação dos custos, afetando a atratividade do projeto conforme planejado.

Segundo Galesne et al. (1999), o risco do investimento é consequência da incerteza associada ao projeto. Pode-se dizer que, devido a uma variável incerta, existe um risco de que os resultados sejam diferentes do esperado. Isso significa que a probabilidade de o valor ser tal como o esperado pode ser descrita por uma distribuição discreta de probabilidade de ocorrência. Desta forma, o risco pode ser mensurado por meio da probabilidade de que o valor que se espera seja o valor que ocorra realmente.

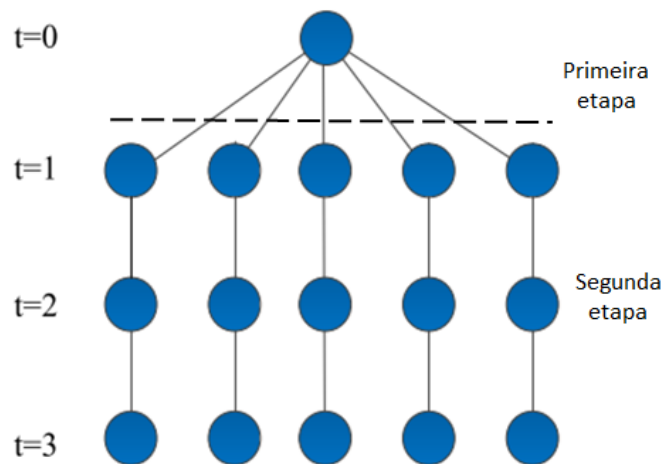
As incertezas relacionadas aos problemas de planejamento energético com REDs podem ser tratadas por meio de árvore de cenários, conforme Pappala et al. (2009), De Quevedo (2009), Gomez-Villalva e Ramos (2003), Farzan (2013) e Alvez (2015); da teoria das opções reais, utilizada por Asano et al. (2010) e Siddiqui e Marnay (2008); do método probabilístico 2m PEM, utilizado por Baziar e Kavousi-Fard (2013); do método de controle preditivo, utilizado por Prodam e Zio; e da lógica difusa (*fuzzy logic*) utilizada por Chaouachi et al. (2013).

4.4.1 Árvore de cenários de duas etapas

A representação das incertezas pode ser realizada por meio de uma árvore de cenários de duas etapas, conforme mostra a Figura 9. Com a decomposição do processo em duas etapas, é possível transformar um problema complexo em problemas menores, tornando-o mais simples de ser resolvido e facilitando a tomada de decisão por parte do planejador (Alabedin, 2012; Galesne et al., 1999).

Em uma programação de dois estágios, no primeiro, uma escolha deve ser feita dentre as opções disponíveis, sem conhecer as consequências dessa decisão. Já o segundo estágio refere-se à fase de operação, na qual são consideradas incertezas, como as da demanda e da disponibilidade dos REDs (Farzan, 2013; Alvez, 2015).

Figura 9 - Árvore de cenários de duas etapas. Fonte: Alabedin (2012).



Na primeira etapa, são tomadas as decisões do tipo “*here-and-now*” e, na segunda etapa, as do tipo “*wait-and-see*” (Alabedin, 2012; Alvez, 2015). Ou seja, a escolha tomada na primeira etapa trará certas consequências na segunda etapa que, ao menos em parte, não estarão sob o controle do tomador de decisão (Galesne et al., 1999).

4.4.2 Perfil do investidor frente ao risco

Devido às incertezas das variáveis relacionadas a um projeto, um investidor está sujeito ao risco de que seu plano fracasse total ou parcialmente. Com o auxílio de ferramentas de gestão de risco, cabe ao investidor decidir se está disposto a se arriscar mais ou menos em busca do retorno do seu investimento.

A postura de um investidor em relação ao risco é pessoal e pode não ser a mesma em todas as situações. Entretanto, podem-se expressar as preferências do investidor frente ao conflito entre risco e retorno. Os comportamentos básicos em relação ao risco podem ser de aversão, neutralidade ou indiferença e propensão (Ribeiro e Machado, 2013).

Um investidor avesso ao risco é aquele que não está disposto a correr riscos investindo em negócios cujo retorno não seja garantido ou que tenham grandes oscilações. Um investidor neutro ao risco se mostra indiferente quanto à relação entre perdas e ganhos associados com as opções de investimento. Por último, o investidor é propenso ao risco quando está disposto a correr riscos para conseguir a máxima rentabilidade sobre o dinheiro investido (Ribeiro e Machado, 2013; Alvez, 2015; Rockafellar, 2001).

Percebe-se que um investimento em geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por meio de dejetos suínos, provavelmente, não é o negócio principal do investidor. Considerando que é necessário ter uma granja de suínos para isso, o investimento em geração de energia pode ser tratado como um investimento adicional (García, 2004).

Desta forma, o investidor, que nesse caso é o produtor rural, não está disposto a correr grandes riscos nesse negócio. O que se busca nesses casos é a viabilidade do investimento. Portanto, considerando as características do investidor, pode-se dizer que ele apresenta um comportamento avesso ao risco (García, 2004).

Diante disso, serão apresentadas as medidas de risco, para que, somadas ao comportamento do investidor frente ao risco, possibilite-se a tomada de decisão sobre a viabilidade do investimento.

4.4.3 Medidas de Risco

Segundo Aguiar (2008), as medidas de risco visam a quantificar o risco da perda que uma determinada posição financeira pode proporcionar em termos de unidades monetárias. Para isso, tais medidas consideram a probabilidade de ocorrência dos eventos que causam uma perda.

As medidas de risco mais utilizadas são a variância, o desvio padrão (*total absolute deviation*), o custo máximo (*maximum cost*), o valor em risco (*value at risk*) e o valor condicional em risco (*conditional value at risk*) (Villalva e Ramos, 2004; Alvez, 2015).

A variância e o desvio padrão são medidas de risco que analisam a dispersão dos retornos do investimento. Fazendo uma analogia ao mercado de ações, quanto mais o preço da ação varia num período de tempo, maior o risco de se ganhar ou perder dinheiro nesse investimento (Santos, 2010).

Para medir essa dispersão, pode ser utilizada a variância, definida como a soma dos desvios quadrados ao redor da média. Devido ao fato de os desvios serem elevados ao quadrado, os desvios positivos e negativos são igualmente considerados, não sendo possível compará-los à média. Pelo mesmo motivo, tanto valores que superam o valor médio, o que no caso se quer evitar, quanto valores que são inferiores ao valor médio do investimento são penalizados com essa medida de risco (Santos, 2010).

Já o desvio padrão, a medida mais comum da dispersão estatística, indica a variação ou dispersão em relação ao valor esperado, ou a raiz quadrada da variância. Desta forma, essa medida de risco torna possível a comparação com o valor esperado, já que não está mais elevada ao quadrado. Entretanto, o desvio padrão, assim como a variância, penaliza valores menores que o esperado, não sendo uma medida eficiente para a análise do risco que o investidor corre de gastar mais que o esperado (Santos, 2010).

O método chamado custo de referência penaliza custos mais altos que aqueles indicados como de referência. Entretanto, quando o custo está abaixo do valor de referência, essa medida se mostra adequada para investidores neutros ao risco (Alvez, 2015; Villalva e Ramos, 2004).

Os métodos do valor em risco (VaR) e valor condicional em risco (CVaR) consistem na identificação de cenários futuros desfavoráveis, sendo calculada a perda decorrente desses cenários (Villalva & Ramos, 2004).

O VaR representa a maior perda financeira que pode ocorrer dentro de um horizonte temporal com um determinado nível de significância. Ou seja, ele indica um valor pessimista para o resultado de uma carteira de recursos. Essa medida de risco é amplamente difundida devido a sua aplicabilidade para diferentes tipos de investimentos e a sua facilidade de cálculo e de uso (Aguiar, 2008b; García, 2004).

Para exemplificar, suponha-se que o VaR de determinada carteira de recursos é R\$ 300 mil, tem um nível de confiança de 95%, em um horizonte temporal de um ano. Então, nesse ano, há 5% de chance de o resultado dessa carteira ser inferior ao valor de R\$ 300 mil (Aguiar, 2008a).

Já o CVaR representa a média dos cenários piores que o VaR. Ou seja, ele não informa somente o valor que separa os 95% melhores casos dos 5% piores, no caso do exemplo acima, como também considera o valor da perda de ativos desses 5% de casos (Maffra, 2013; Aguiar, 2008a).

Apesar de ser uma medida de risco mais completa, o CVaR é uma estimativa menos precisa e menos robusta que o VaR. Além disso, o perfil do investidor em questão nesse trabalho é de aversão ao risco; portanto, não é necessário conhecer o tamanho da perda, já que sua chance de ocorrência deve ser mínima. Por esses motivos, a medida de risco a ser implementada no modelo matemático deste trabalho é o VaR (Maffra, 2013; Aguiar, 2008a; Alvez, 2015; Villalva & Ramos, 2004).

Alvez (2015) desenvolveu um modelo estocástico com uma visão de aversão ao risco e utilizou o VaR para incorporar a medida do risco devido às incertezas na demanda e na potência máxima disponível nos REDs renováveis. Desse modo, o risco devido às incertezas da demanda será incorporado no modelo desenvolvido por Lotero e Colombari (2015) baseado no trabalho desenvolvido por Alvez (2015).

4.5 Modelo matemático estocástico

Antes de incorporar as medidas de risco no modelo matemático apresentado anteriormente, nesta seção, são apresentadas as mudanças necessárias para a incorporação das incertezas no modelo.

As variáveis incertas são consideradas, conforme a árvore de cenários indica, de maneira probabilística. Isto é, existe uma probabilidade $p(s)$ de que ocorra o cenário s . Desta forma, considerando a probabilidade de que determinada variável assumira determinado valor,

o modelo passa a ter uma característica estocástica e não mais determinística (Alvez, 2015; García, 2004).

Com a Equação 23, é possível obter o custo esperado de implantação de uma unidade de geração de energia elétrica. O primeiro termo dessa equação indica o custo da primeira etapa da árvore de cenários, relacionado à implantação das tecnologias e que ocorre somente no início do processo, representada pelo termo $C(x)$. Já o segundo termo está relacionado ao custo da segunda etapa, representado pelo somatório do custo de cada cenário s multiplicado pela sua respectiva probabilidade de ocorrência $P(s)$.

$$CustoE = C(x) + \sum_s (P(s) \times q(x, s)) \quad 23$$

Devido à característica estocástica do modelo, notou-se a necessidade de utilizar um método de análise de investimento diferente do valor presente líquido (VPL) aplicado por Lotero e Colombari (2015), optando-se pelos custos anualizados, que facilita a análise dos cenários atualizados monetariamente.

O VPL consiste no somatório de todos os valores do fluxo de caixa no instante zero. Isso significa que, para serem somados, todos os valores do fluxo de caixa devem ser trazidos ao instante zero, utilizando-se uma taxa de juros predeterminada (Galesne et al., 1999). Neste caso, as despesas e receitas futuras são $ZVEN$, $ZCAR$, $ZECO$ e $ZMEO$, e a imediata é o $ZINV$.

Portanto, o custo de investimento $ZINV$ passa a ser anualizado, considerando-se uma taxa de remuneração i . Desta forma, todas as despesas e receitas estão anualizadas e podem ser somadas.

Além disso, tanto na função objetivo quanto nas restrições, deve ser adicionado o subíndice s , que representa a ocorrência de cada cenário, de maneira que possam ser consideradas todas as possibilidades. Logo, a função objetivo adota a expressão apresentada a seguir:

$$Z = -ZINV \cdot \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-NT}} \right) + \sum_s [P_s \cdot (ZVEN_s + ZCAR_s + ZECO_s - ZMEO_s)] \quad 24$$

$$ZINV = BIODIGEST \cdot BIO + \sum_{I=1}^{NA} CINV_I \cdot X_I \quad 25$$

$$ZVEN_s = \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM, FDS} QUANTD_{DIA} \cdot \sum_{H=1}^{24} TARVEND_{MES,H} \cdot PVEN_{s,MES,DIA,H} \quad 26$$

$$\begin{aligned}
ZCAR_S = & \frac{21}{1000} \cdot v \cdot \rho_{CH_4} \cdot K_{CO_2} \\
& \cdot \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \\
& \cdot \sum_{H=1}^{24} [BQUE_{S,MES,DIA,H} + BGER_{S,MES,DIA,H}]
\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
ZECO_S = & \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \\
& \cdot \sum_{H=1}^{24} TARIFA_{MES,H} \cdot (PDEM_{S,MES,DIA,H} - PCON_{S,MES,DIA,H}) + 12 \\
& \cdot TARDP \cdot (DMP_S - DCP_S)
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
ZMEO_S = & \sum_{I=1}^{NA} CMOF_I \cdot X_I \\
& + \sum_{I=1}^{NA} \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=1}^2 QUANTD_{DIA} \sum_{H=1}^{24} [CMOV_I \\
& \cdot (PINTU_{S,I,MES,DIA,H} + PVENU_{S,I,MES,DIA,H})]
\end{aligned} \tag{29}$$

Quanto às restrições, são necessárias modificações em relação ao modelo da seção anterior, sendo a potência dos REDs renováveis considerada como estocástica em lugar de determinística:

$$DCF_S \geq PCON_{S,MES,SEM,HF} \tag{30}$$

$$DCF_S \geq PCON_{S,MES,FDS,H} \tag{31}$$

$$DCP_S \geq PCON_{S,MES,SEM,HP} \tag{32}$$

$$PINT_{S,MES,DIA,H} + PCON_{S,MES,DIA,H} = PDEM_{S,MES,DIA,H} \tag{33}$$

$$PINT_{S,MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} PINTU_{S,I,MES,DIA,H} \tag{34}$$

$$PINTU_{S,I,MES,DIA,H} + PVENU_{S,I,MES,DIA,H} = \frac{1}{\eta_I \cdot v_S \cdot C_{CH_4}} \cdot BGERU_{S,I,MES,DIA,H} \tag{35}$$

$$PINTU_{S,I,MES,DIA,H} + PVENU_{S,I,MES,DIA,H} \leq MAXCAP_I \cdot X_I \tag{36}$$

$$PVEN_{S,MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} PVENU_{S,I,MES,DIA,H} \quad 37$$

$$ZDM_{S,MES,DIA,H} + ZDG_{S,MES,DIA,H} \leq 1 \quad 38$$

$$PCON_{S,MES,DIA,H} \leq ZDM_{S,MES,DIA,H} * M \quad 39$$

$$PVEN_{S,MES,DIA,H} \leq ZDG_{S,MES,DIA,H} * M \quad 40$$

$$BGER_{S,MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} BGERU_{S,I,MES,DIA,H} \quad 41$$

$$\begin{aligned} BARM_{S,MES,DIA,H} &= BARM_{S,MES,DIA,H-1} + BPRO_S - BGER_{S,MES,DIA,H} \\ &\quad - BQUE_{S,MES,DIA,H} \end{aligned} \quad 42$$

$$BARM_{S,MES,DIA,H} \leq CAPMAX \quad 43$$

$$\begin{aligned} BARM_{S,MES,DIA,H} &= BARM_{S,MES,DIA,H-1} + BPRO_{S,MES} - BGER_{S,MES,DIA,H} - BQUE_{S,MES,DIA,H} \end{aligned} \quad 44$$

Após as alterações necessárias no modelo devido à consideração das variáveis incertas, parte-se, na próxima seção, para a incorporação da medida de risco VaR, selecionada como mais adequada para esse caso de estudo.

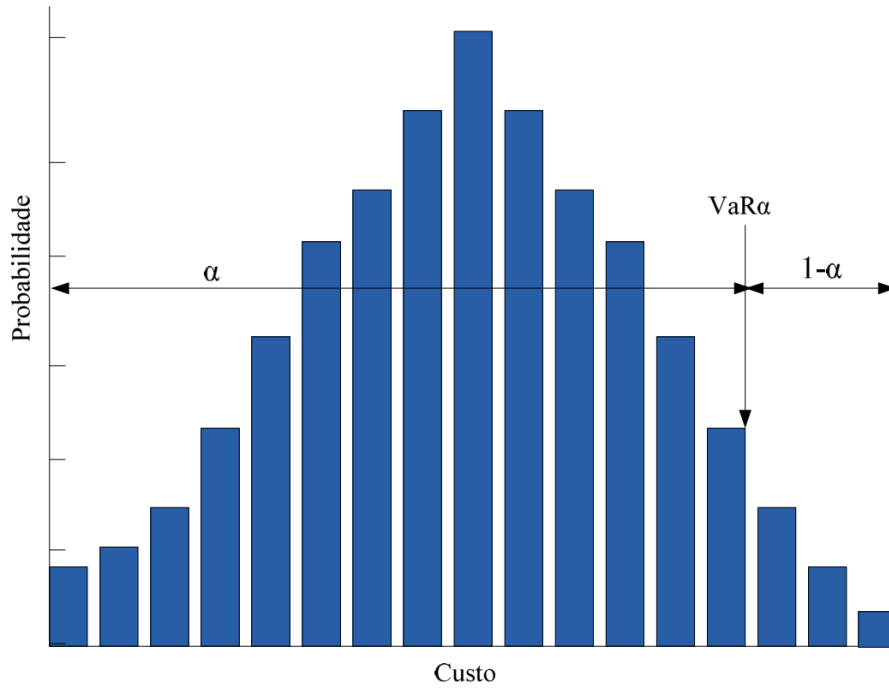
4.6 Incorporação da medida de risco VaR no modelo matemático

A formulação matemática desenvolvida acima é baseada numa atitude de neutralidade ao risco por parte do consumidor/investidor, sendo necessário incorporar a medida de risco conforme consta em Villalva e Ramos (2004).

A partir da árvore de cenários, considera-se que a função custo total anual segue uma distribuição de probabilidade discreta, como na Figura 10. Nesse caso, α representa o nível de confiança, definido pelo investidor. O VaR representa o menor custo total anual tal que sua probabilidade de ocorrência seja menor ou igual ao nível de confiança (α) definido pelo investidor (Alvez, 2015; Villalva & Ramos, 2004).

Para exemplificar, suponha-se que o α definido pelo investidor seja de 95% e o VaR seja de R\$ 200 mil. Então, pode-se dizer que o custo total será inferior ou igual a R\$ 200 mil em 95% dos casos.

Figura 10 – Valor em risco (VaR).



Fonte: Alvez (2015).

A formulação matemática para o modelo estocástico utilizando o VaR como medida de risco, com base em Villalva e Ramos (2004), é apresentada a seguir:

$$\min \xi \quad 45$$

$$\sum_s P_s \cdot \delta_s \leq 1 - \alpha \quad 46$$

$$Custo_s \leq \xi + M \cdot \delta_s \quad 47$$

$$CustoE \leq Svar \quad 48$$

Nessa formulação, ξ representa o VaR para um nível de confiança α ; P_s é a probabilidade de ocorrência de cada cenário; δ_s é um vetor de variáveis binárias auxiliares; α representa o nível de confiança definido pelo investidor em função de sua atitude frente ao risco; $Custo_s$ representa o custo anual de cada cenário; M é uma constante de valor elevado, tal que no modelo aumenta o custo dos cenários que superam o VaR; $CustoE$ representa o valor esperado do custo total anualizado e que está descrito como a função objetivo apresentada na seção anterior; e, finalmente, $Svar$ é um parâmetro que estabelece um limite máximo para o valor esperado do custo total anual.

A Equação 46 limita o número de variáveis binárias δ_s que podem ter valor 1 ao número de cenários com custo superior ao VaR. Já a Equação 47 força que essas variáveis binárias adotem o valor 1 nos cenários cujo custo supere o VaR. Desta forma, o VaR é definido pelo cenário de maior custo que possui sua respectiva variável δ_s nula. Resumindo, o modelo estabelece, dentre os cenários considerados, qual se ajusta melhor ao VaR.

A formulação apresentada visa a minimizar os custos em um fluxo de caixa em que as saídas são positivas e as entradas, negativas. Neste fluxo, caso as entradas sejam maiores que as saídas, tem-se um custo final de sinal negativo. Entretanto, entradas maiores que as saídas representariam um lucro.

Para evitar o conflito quanto ao custo final negativo representar um lucro, a formulação proposta por Villalva e Ramos (2004) foi adaptada a um caso de maximização. Para isso, o modelo matemático passa a ser descrito por um fluxo de caixa com saídas negativas e entradas positivas, conforme se expõe na formulação matemática final deste modelo, considerando os riscos associados às incertezas:

$$\max \xi \quad 49$$

$$\sum_s (P_s \cdot \delta_s) \leq 1 - \alpha \quad 50$$

$$-ZINV \cdot \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-NT}} \right) + (ZVEN_s + ZCAR_s + ZECO_s - ZMEO_s) \geq \xi + M \cdot \delta_s \quad 51$$

$$\begin{aligned} -ZINV \cdot \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-NT}} \right) + \sum_s [P_s \times (ZVEN_s + ZCAR_s + ZECO_s - ZMEO_s)] \\ \geq Svar \end{aligned} \quad 52$$

$$Z = -ZINV \cdot \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-NT}} \right) + \sum_s [P_s \cdot (ZVEN_s + ZCAR_s + ZECO_s - ZMEO_s)] \quad 53$$

$$ZINV = BIODIGEST \cdot BIO + \sum_{I=1}^{NA} CINV_I \cdot X_I \quad 54$$

$$ZVEN_s = \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} \text{QUANTD}_{DIA} \cdot \sum_{H=1}^{24} \text{TARVEND}_{MES,H} \cdot \text{PVEN}_{s,MES,DIA,H} \quad 55$$

$$\begin{aligned}
ZCAR_S = & \frac{21}{1000} \cdot v \cdot \rho_{CH4} \cdot K_{CO2} \\
& \cdot \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \\
& \cdot \sum_{H=1}^{24} [BQUE_{S,MES,DIA,H} + BGER_{S,MES,DIA,H}]
\end{aligned} \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
ZECO_S = & \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=SEM,FDS} QUANTD_{DIA} \\
& \cdot \sum_{H=1}^{24} TARIFAMES,H \cdot (PDEM_{S,MES,DIA,H} - PCON_{S,MES,DIA,H}) + 12 \\
& \cdot TARDF \cdot (DMF_S - DCF_S) + 12 \cdot TARDP \cdot (DMP_S - DCP_S)
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
ZMEO_S = & \sum_{I=1}^{NA} CMOF_I \cdot X_I \\
& + \sum_{I=1}^{NA} \sum_{MES=1}^{12} \sum_{DIA=1}^2 QUANTD_{DIA} \sum_{H=1}^{24} [CMOV_I \\
& \cdot (PINTU_{S,I,MES,DIA,H} + PVENU_{S,I,MES,DIA,H})]
\end{aligned} \tag{58}$$

$$DCF_S \geq PCON_{S,MES,SEM,HF} \tag{59}$$

$$DCF_S \geq PCON_{S,MES,FDS,H} \tag{60}$$

$$DCP_S \geq PCON_{S,MES,SEM,HP} \tag{61}$$

$$PINT_{S,MES,DIA,H} + PCON_{S,MES,DIA,H} = PDEM_{S,MES,DIA,H} \tag{62}$$

$$PINT_{S,MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} PINTU_{S,I,MES,DIA,H} \tag{63}$$

$$PINTU_{S,I,MES,DIA,H} + PVENU_{S,I,MES,DIA,H} = \frac{1}{\eta_I \cdot v_S \cdot C_{CH4}} \cdot BGERU_{S,I,MES,DIA,H} \tag{64}$$

$$PINTU_{S,I,MES,DIA,H} + PVENU_{S,I,MES,DIA,H} \leq MAXCAP_I \cdot X_I \tag{65}$$

$$PVEN_{S,MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} PVENU_{S,I,MES,DIA,H} \tag{66}$$

$$ZDM_{S,MES,DIA,H} + ZDG_{S,MES,DIA,H} \leq 1 \quad 67$$

$$PCON_{S,MES,DIA,H} \leq ZDM_{S,MES,DIA,H} * M \quad 68$$

$$PVEN_{S,MES,DIA,H} \leq ZDG_{S,MES,DIA,H} * M \quad 69$$

$$BGER_{S,MES,DIA,H} = \sum_{I=1}^{NA} BGERU_{S,I,MES,DIA,H} \quad 70$$

$$BARM_{S,MES,DIA,H} = BARM_{S,MES,DIA,H-1} + BPRO_S - BGER_{S,MES,DIA,H} - \quad 71$$

$$BQUE_{S,MES,DIA,H}$$

$$BARM_{S,MES,DIA,H} \leq CAPMAX \quad 72$$

$$\sum_{I=1}^{NA} X_I \geq 1 \quad 73$$

4.7 Conclusões

Conclui-se este capítulo com um modelo matemático estocástico linear que considera a incerteza das variáveis a partir de uma árvore de cenários de duas etapas. A primeira etapa corresponde ao planejamento, em que uma escolha deve ser feita dentre as demais, sem conhecer as consequências dessa decisão. Já a segunda etapa refere-se à fase de operação, no qual são consideradas incertezas, como as da demanda e da disponibilidade dos REDs.

Devido às incertezas apresentadas, o investidor torna-se vulnerável a um risco. Propõe-se, portanto, a utilização de uma medida de risco que garante, com uma confiança de $1-\alpha$, sendo α o nível de confiança, que o benefício total anual será maior que um determinado valor, valor este denominado como VaR.

Desta forma, o investidor tem como retorno do modelo a opção com o maior lucro esperado, considerando as incertezas relacionadas à demanda e à produção de biogás, bem como o VaR como medida de risco devido a essas incertezas. Com essas informações, permite-se que o investidor possa conhecer o retorno financeiro aplicado a esse projeto e aplicá-lo como aspecto econômico no processo de avaliação do PIR.

Capítulo 5

Resultados

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho é uma ferramenta computacional capaz de determinar o tamanho e a tecnologia ótima de uma unidade de geração distribuída de biogás do ponto de vista do investidor. Além disso, utilizando o VaR como medida de risco, o modelo considera o custo associado ao risco causado pelas variáveis incertas. Nesse caso, foram consideradas as incertezas da demanda e na produção de biogás.

O modelo matemático foi implementado na linguagem GAMS, sendo resolvido utilizando o *solver* CPLEX. Uma interface com o usuário foi desenvolvida em *Microsoft Excel*, a partir da qual devem ser inseridos os dados de entrada do caso a ser avaliado.

5.1 Interface

A interface com o usuário da ferramenta computacional, e que contém o modelo matemático do capítulo anterior, foi desenvolvida no *Microsoft Excel* e pode ser vista na Figura 11. Pode-se observar do lado esquerdo as opções para a entrada de dados; no meio, o botão que permite iniciar a execução do modelo de otimização; e, do lado direito, os botões que dão acesso aos resultados das simulações realizadas.

Para inserir os dados de entrada, o usuário deve clicar nos botões curva de carga, dados econômicos e características do biogás. Cada botão desses é um *hiperlink* que encaminha o usuário a outra aba para inserir os dados.

Ao clicar no botão *Curva de Carga*, o usuário é encaminhado a uma aba onde deve inserir a curva de demanda, discretizada por hora, de dias típicos de semana e de final de semana, para cada mês do ano.

O botão referente aos dados econômicos encaminha o usuário para uma tela conforme mostra a Figura 12. Nessa aba, o usuário deve inserir os dados da modalidade tarifária na qual está enquadrado, a opção de comercialização de energia e créditos de carbono e os dados que permitirão construir o fluxo de caixa de cada alternativa a ser analisada. Na caixa *Opções de*

Comercialização de Energia, existem duas *checkbox* que o usuário pode selecionar: a que permite optar pela venda de créditos de carbono, quando for possível, e a que dá a opção pela venda de excedentes da geração local. Ao selecionar a opção da **Venda de créditos de carbono**, o usuário deve inserir o preço de venda esperado, em R\$/ton de carbono. A seleção da **Comercialização de Energia** abre os campos de forma de comercialização de energia, que pode ser a venda de excedentes ou a compensação de energia e o preço de venda esperado, em R\$/MWh.

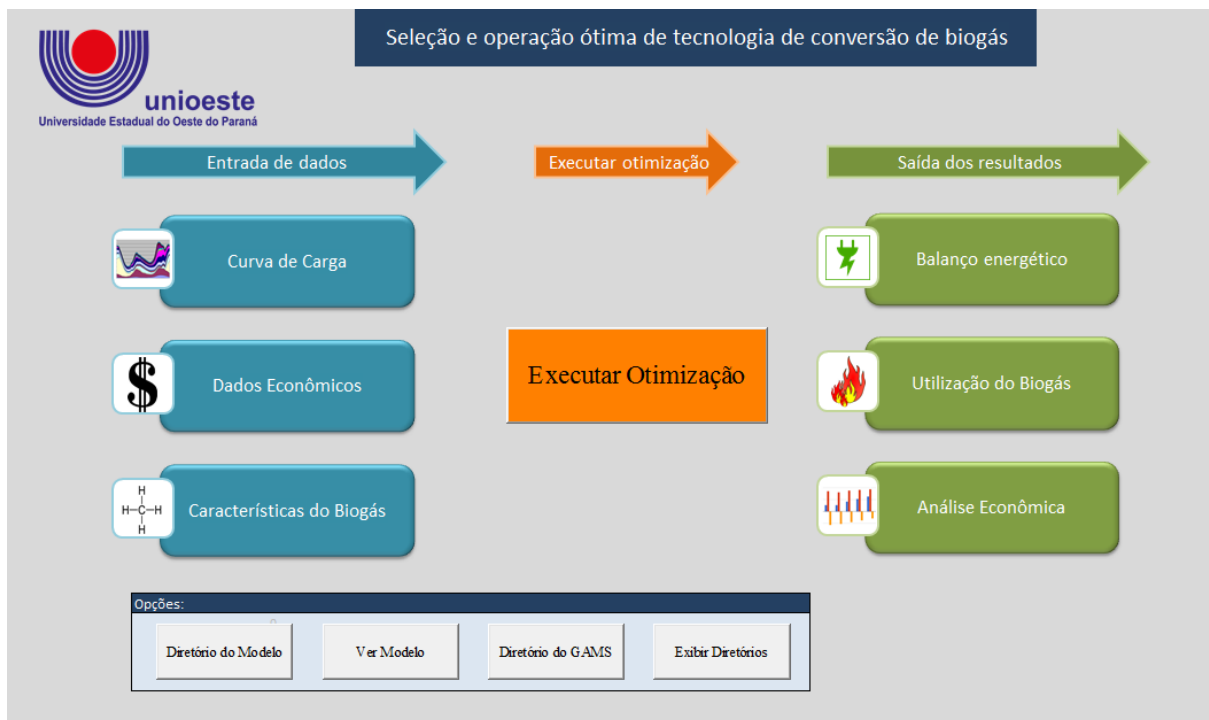


Figura 11 - Interface do modelo matemático para o usuário.

O botão **Características do biogás** encaminha o usuário para uma tela onde é solicitada a capacidade de armazenamento de biogás dentro do biodigestor em m³, a capacidade de produção em m³/h e a porcentagem de metano presente no biogás, a qual permitirá determinar o Poder Calorífico Inferior (PCI).

As **Opções**, localizadas na parte inferior da Figura 11, endereçam para o arquivo de otimização do modelo matemático desenvolvido em *GAMS*. O botão **Diretório do modelo** e **Diretório do GAMS** solicita que o usuário aponte a localização do modelo matemático e do *GAMS* nos arquivos do computador. O botão **Ver modelo** abre o modelo matemático para a visualização pelo usuário, e o botão **Exibir Diretórios** apresenta onde os arquivos estão localizados.

Dados Econômicos do Investidor	
Modalidade da tarifa de energia	
Nível de Tensão:	Menor que 2,3kV
Modalidade:	Azul
Opções de comercialização de energia	
<input checked="" type="checkbox"/> Venda de créditos de Carbono	
Preço de venda esperado (R\$/tonC):	0
<input checked="" type="checkbox"/> Comercialização de Energia	
Form de comercialização:	Venda de excedentes
Preço de venda esperado (\$/MWh):	190
Dados do Fluxo de caixa	
Taxa do custo de oportunidade (%):	10%
Investimento inicial no biodigestor (R\$):	75000
Custos anuais extras (R\$/ano):	0
Benefícios anuais extas (R\$/ano):	0

Figura 12 - Interface da aba de dados econômicos do investidor.

Os resultados são separados entre Balanço energético, Utilização do biogás e Análise econômica. Assim como nos dados de entrada, cada botão desses é um hiperlink que encaminha o usuário à outra aba do Microsoft Excel onde são apresentados os resultados.

O balanço energético apresenta a geração de energia utilizando biogás, a energia vendida e a comprada da concessionária, bem como a demanda do usuário.

A utilização do biogás é apresentada na forma de um gráfico que indica o gás consumido e o gás armazenado ao longo do dia.

A análise econômica do investimento retorna a unidade ótima selecionada e o fluxo de caixa anual.

5.2 Dados de Entrada

Devem ser inseridos dados econômicos, disponibilidade de biogás na planta e a curva de carga, conforme indica a Tabela 8. A curva de carga deve conter a demanda de um ano do consumidor, sendo um dia típico de cada mês durante a semana e um dia típico de final de semana discretizados por hora.

Tabela 8 - Dados de entrada do investidor.

Dados Econômicos	Modalidade tarifária Nível de tensão Venda de crédito de carbono Preço de venda da tonelada de carbono Comercialização de energia Forma de comercialização Preço de venda Taxa do custo de oportunidade Investimento inicial no biodigestor
Disponibilidade de biogás	Capacidade de armazenamento do biodigestor Capacidade de produção de biogás Percentagem de metano no biogás
Curva de carga	Demanda discretizada por hora em dia típico de semana Demanda discretizada por hora em dia típico de final de semana

Para a simulação apresentada neste trabalho, a modalidade tarifária escolhida foi a azul, onde o consumidor paga uma tarifa diferenciada para a demanda e para a energia consumida nos horários de ponta e fora de ponta, conforme apresentado na Tabela 9. O nível de tensão selecionado foi menor que 2,3 kV.

Tabela 9 - Tarifas de energia elétrica.

	Ponta	Fora de Ponta
Compra de Energia (R\$/kWh)	1,603	0,443
Demanda Contratada (R\$/kW)	32,34	16,17

A venda de crédito de carbono não foi selecionada por se considerar que existem dificuldades técnicas para a emissão da certificação de emissão reduzida (CER) que valida o processo de redução de emissão. Esse processo é ainda bastante burocrático e acarreta custos extras além daqueles descritos nesse trabalho e que deveriam ser considerados no caso da venda de créditos de carbono. Por esse motivo, não se faz necessário indicar o preço de venda da tonelada de carbono nessa aplicação do modelo matemático.

Foi selecionada a opção de comercialização de energia, por meio da venda de excedentes para a concessionária, considerando um preço de venda esperado de R\$/MWh 190,00 para o caso base e para o caso B. O caso A consiste em alterar esse parâmetro para

testar a viabilidade econômica do projeto com diferentes valores de preço de venda. A taxa de remuneração do capital investido, ou custo de oportunidade, foi considerada 10% a. a.

Os dados da demanda, da produção de biogás e do biodigestor utilizados nessa simulação foram obtidos de Silva (2015) e correspondem ao ano de 2014 na granja Colombari.

Granja Colombari	
Cidade/Estado: São Miguel do Iguçu/PR.	
Temperatura média anual: 22°C.	Altitude: 250 m.
Atividades desenvolvidas: Suinocultura, bovinocultura em confinamento e extensivamente e agricultura convencional.	
Sistema de criação: Fase de crescimento e terminação de suínos.	
Nº de suínos: 5.000.	
Dimensão das lagoas de decantação: 25x10m e 16x8,5m.	
Produção média de biogás: 430 m ³ /dia.	
% Metano no biogás: 65%.	
Meses monitorados: abril/2014 a dez/2014.	

O custo do investimento inicial no biodigestor foi inserido considerando que o produtor rural já possui as lagoas de decantação, já que essa parte do processo de tratamento é obrigatória do ponto de vista ambiental. Considerando uma flecha de 2m para cada biodigestor e conhecendo a dimensão de cada lagoa utilizada na Granja Colombari, conforme Silva (2015), a área de lona necessária seria de 270 m² e 150 m². Para o cálculo dos custos do biodigestor, a área aproximada calculada da lona foi multiplicada pelo valor de R\$ 120,00, sendo este o custo por m². Além disso, foi considerado um custo de instalação de R\$ 25.000,00, totalizando em um custo de investimento inicial no biodigestor de R\$ 75.400,00.

Devido à aproximação dos valores referentes ao custo do biodigestor e à grande divergência entre os valores encontrados na bibliografia, esse parâmetro foi analisado no Caso C, em que a sua variação foi simulada visando a conhecer o impacto disso nos custos finais.

Quanto aos parâmetros do biogás, foi considerada uma capacidade de armazenamento de 300 m³ de biogás com 65% de metano. A capacidade de produção foi considerada como uma variável incerta, e, com base em Silva (2015), foi utilizada uma produção média de 430m³ por dia ou 18m³ por hora. Além disso, foi utilizado um valor de produção mínima de 288m³ por dia ou 12m³ por horas e de produção máxima de 552m³ por dia ou 23m³ por hora.

Foram utilizados dados da demanda da Granja Colombari medidos entre os meses de abril e dezembro de 2014. Como o modelo necessita da demanda ao longo de um ano, foi considerada, para o mês de janeiro, a mesma demanda do mês de dezembro. Já para os meses de fevereiro e março, foi considerada a mesma demanda do mês de abril.

Quanto aos parâmetros relacionados com as tecnologias de geração disponíveis, devem ser inseridos os custos de investimento, manutenção e operação de cada unidade, bem como suas características. Além disso, a estrutura tarifária deve ser atualizada conforme os valores praticados no momento.

As tecnologias de geração distribuída consideradas nesse caso são grupos motor gerador (GMG) que utilizam o biogás como fonte primária. Foram utilizados GMGs das empresas Leão Energia e Grupo Fockink de potências variadas, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados das tecnologias de geração disponíveis. Fonte: Orçamentos das empresas Leão Energia e Grupo Fockink.

	Max Cap	Investimento	Manut. Var	Manut. Fixa	Biogás	Rend.	Modelo
	kW	R\$	\$/kWh	\$/ano	m ³ /kWh	%	
I1	16	130.000,00	0,05	6.000,00	0,7	0,25	SG20B
I2	32	140.000,00	0,03	6.000,00	0,7	0,26	SG40B
I3	40	150.000,00	0,02	6.000,00	0,7	0,26	SG50B
I4	60	160.000,00	0,02	9.600,00	0,65	0,26	SG75B
I5	80	170.000,00	0,02	9.600,00	0,65	0,26	SG100B
I6	100	220.000,00	0,02	18.000,00	0,65	0,26	SG125B
I7	237,6	349.495,00	0,01	16.200,00	0,46	0,32	LGB330

Os cenários propostos para a consideração das incertezas relativas à demanda e à produção de biogás são apresentados na Tabela 11. O consumo foi considerado como médio nos cenários de 1 a 3, mínimo nos cenários de 4 a 6 e máximo nos cenários de 7 a 9. O consumo mínimo e máximo foi obtido a partir da comparação dos valores da demanda do consumidor e da seleção das demandas máximas e mínimas de cada mês. O consumo médio foi obtido por meio da média das demandas diárias de cada mês.

Da mesma forma, a produção de biogás por hora foi considerada como média e de 18 m³/h nos cenários 1, 4 e 7, como mínima no valor de 12 m³/h nos cenários 2, 5 e 8 e máxima no volume de 23 m³/h nos cenários 3, 6 e 9.

A probabilidade de ocorrência dos cenários foi obtida pela razão entre as probabilidades da demanda e da produção de biogás. Por sua vez, as probabilidades de ocorrência das duas variáveis foram consideradas como 50% para o caso médio e 25% para o caso mínimo e máximo.

Tabela 11 - Cenários possíveis devido à consideração das incertezas relativas à demanda e à produção de biogás.

Cenário	Consumo	Prod. de biogás (m ³ /h)		Probab.
		Méio	18	
1	Méio	Méio	18	0,25
2	Méio	Mínimo	12	0,125
3	Méio	Máximo	23	0,125
4	Mínimo	Méio	18	0,125
5	Mínimo	Mínimo	12	0,0625
6	Mínimo	Máximo	23	0,0625
7	Máximo	Méio	18	0,125
8	Máximo	Mínimo	12	0,0625
9	Máximo	Máximo	23	0,0625

O modelo matemático busca maximizar o VaR; portanto, as saídas são inseridas como negativas no fluxo de caixa e as entradas, como positivas. Como resultados do modelo, tem-se o custo de cada um dos cenários criados e o VaR encontrado para cada simulação.

5.3 Caso base

Foi considerado como caso base aquele com os dados apresentados anteriormente, com custo de investimento do biodigestor de R\$ 75.000,00 e tarifa de venda de energia elétrica de R\$190,00 por MWh.

A Tabela 12 apresenta os valores do custo esperado para o caso base que considera, como custo de investimento do biodigestor, R\$75.000,00, e preço da venda de energia excedente no valor de R\$ 190,00 por MWh. Nesse caso, obteve-se um valor de benefício esperado de R\$ 72.290,00. As tecnologias ótimas selecionadas foram a I1 e I2, que, segundo a Tabela 10, têm potência igual a 16 e 32 kW, respectivamente. Quanto ao VaR ótimo, pode-se afirmar, com um nível de confiança de 95%, que o benefício financeiro será de, no mínimo, R\$ 41.706,74.

O balanço energético retornado pelo programa é apresentado na Figura 13 para o cenário 1, na Figura 14 para o cenário 5 e, na Figura 15, para o cenário 9. O cenário 1 é apresentado por ser aquele de maior probabilidade de ocorrência, de 25%; o cenário 5 é apresentado por ser aquele que retorna o menor benefício; e cenário 9, por ser o cenário mais vantajoso. Os gráficos apresentam a energia vendida para a concessionária, energia gerada

para o atendimento da demanda interna e da demanda do consumidor. Foi escolhido um dia típico de semana do mês de outubro de cada um dos cenários, para a comparação entre eles.

Tabela 12 – Custos dos cenários e valor esperado do caso base.

	Custo (R\$/ano)
S1	80.558,70
S2	66.204,30
S3	90.014,00
S4	55.595,30
S5	41.706,70
S6	65.050,70
S7	105.921,70
S8	88.800,00
S9	115.377,00
Valor esperado	79.290,00
VaR$\alpha=0.95$	41.706,74
Tecnologia selecionada	I1 e I2

A Figura 13 representa o balanço energético do Cenário 1, considerado como o cenário de maior probabilidade de ocorrência, com uma probabilidade de 25%. Esse cenário representa um caso em que a demanda e a produção de biogás na propriedade são considerados médios. No caso da ocorrência desse cenário, toda a demanda da propriedade seria atendida pela GD instalada, que corresponde às tecnologias I1 e I2, segundo a Tabela 12.

Além da demanda do consumidor, a energia produzida seria excedente, de tal forma que poderia ser vendida à concessionária. Com exceção da hora 17, a venda de energia excedente ocorreria durante todo o dia. Esse cenário tem um retorno financeiro de R\$ 80.558,70.

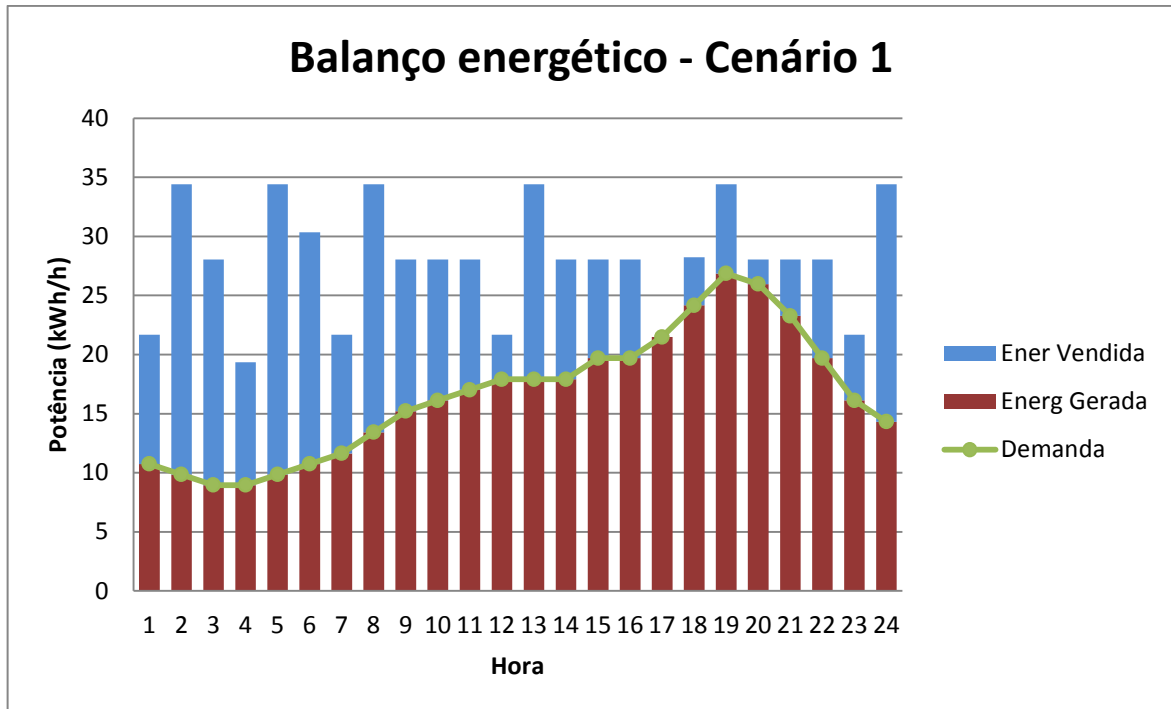


Figura 13 - Balanço energético do cenário 1 para um dia típico de semana do mês de outubro.

A Figura 14 representa o balanço energético do Cenário 5, considerado como o cenário de menor benefício e com a menor probabilidade de ocorrência, de 6,25%. Esse cenário representa um caso em que a demanda e a produção de biogás na propriedade são considerados mínimos. No caso da ocorrência desse cenário, toda a demanda da propriedade seria atendida pela GD instalada, que corresponde às tecnologias I1 e I2, segundo a Tabela 12.

Além da demanda do consumidor, a energia produzida seria excedente, de tal forma que poderia ser vendida à concessionária, exceto durante as horas 8, 11, 16, 18, 20 e 22, quando não há excedente de energia. Esse cenário tem um retorno financeiro de R\$ 41.706,70.

A Figura 15 representa o balanço energético do Cenário 9, considerado como o cenário de maior benefício e, assim como o Cenário 5, tem a probabilidade de ocorrência de 6,25%. Esse cenário representa um caso em que a demanda e a produção de biogás na propriedade são considerados máximos. No caso da ocorrência desse cenário, a demanda da propriedade seria atendida pela GD instalada na maior parte do tempo, sendo necessário comprar energia da concessionária nas horas 18, 19 e 20. Segundo a Tabela 12, as tecnologias de geração selecionadas seriam as I1 e I2.

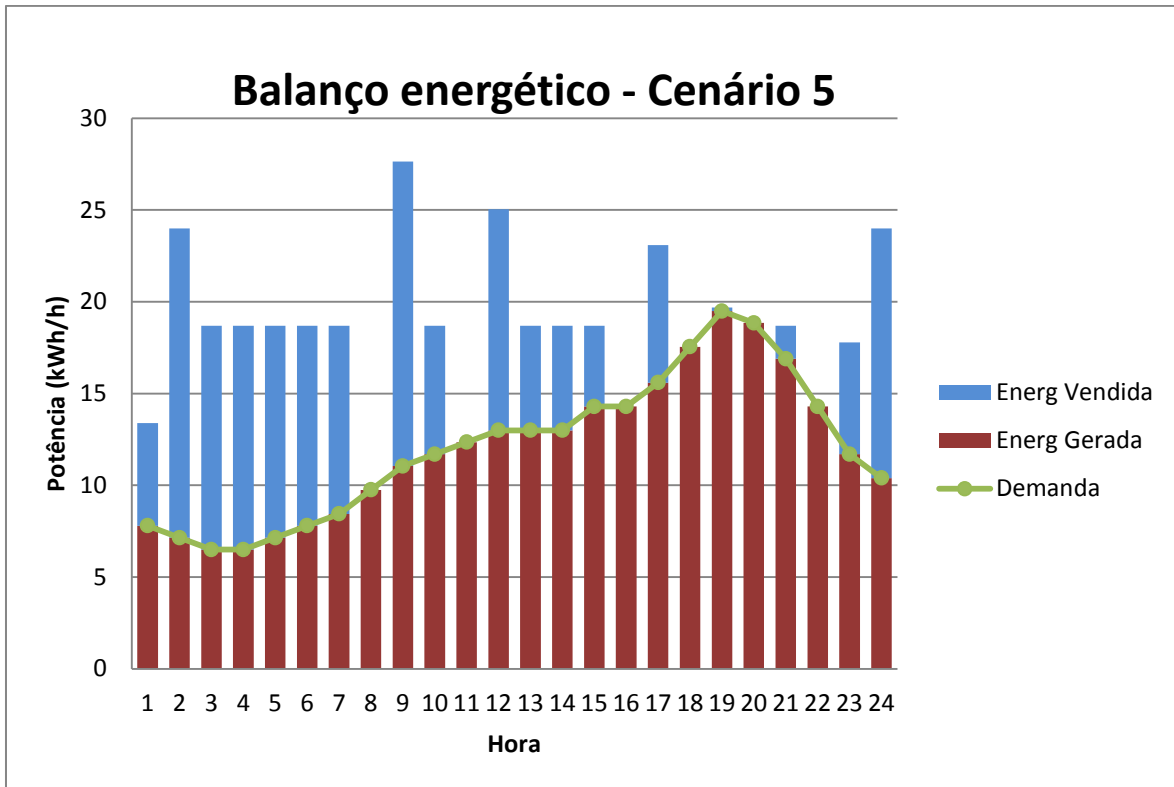


Figura 14 - Balanço energético do cenário 5 para um dia típico de semana do mês de outubro.

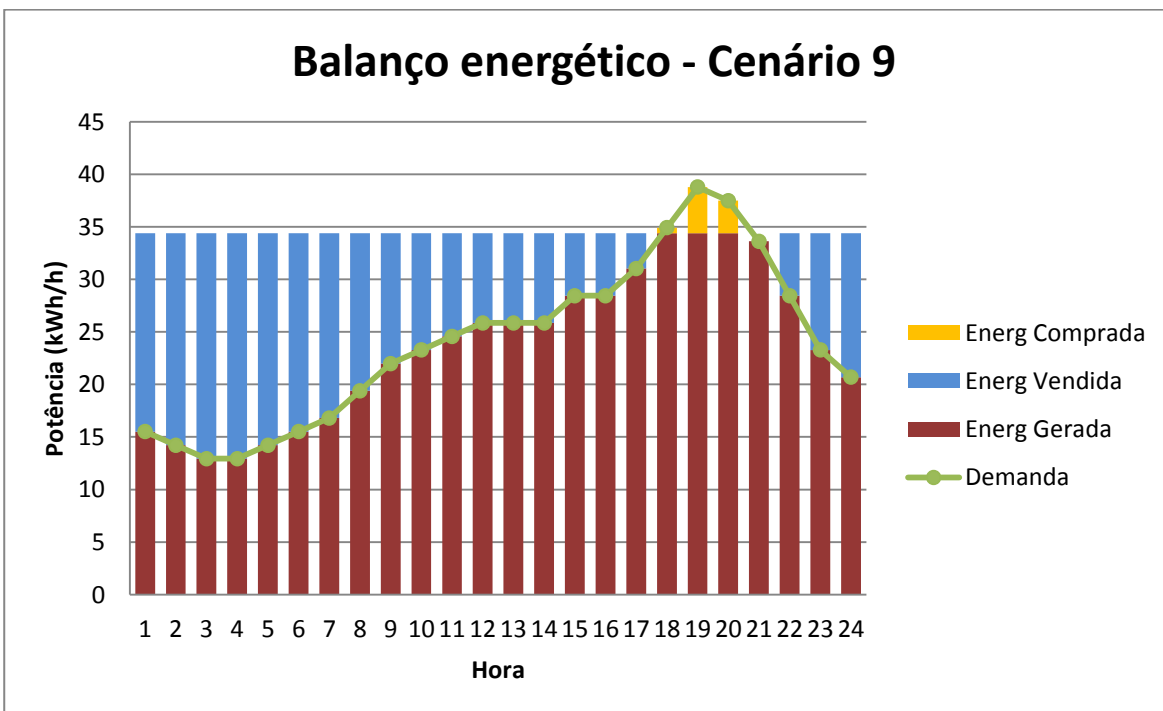


Figura 15 - Balanço energético do cenário 9 para um dia típico de semana do mês de outubro.

Além da demanda do consumidor, a energia produzida seria excedente, de tal forma que poderia ser vendida à concessionária, exceto durante as horas 18, 19 e 20, quando não há excedente de energia. Esse cenário tem um retorno financeiro estimado de R\$ 115.377,00.

5.4 Caso A

O caso A consistiu na simulação do caso base, variando o preço de venda de energia elétrica para a concessionária, entre R\$150,00 por MWh, para o Caso A1 e R\$ 120,00 por MWh, para o Caso A2. Desta forma, seria possível avaliar o impacto desse parâmetro sobre o VaR e o valor esperado do projeto.

A Tabela 13 apresenta os valores do custo esperado para o caso A1, que considera, como custo de investimento do biodigestor, R\$75.000,00, e preço da venda de energia excedente no valor de R\$ 150,00 por MWh. Neste caso, obteve-se um valor esperado de R\$ 74.250,00 e as tecnologias selecionadas foram a I1 e I2, que, segundo a Tabela 10, têm potência igual a 16 e 32 kW, respectivamente. Quanto ao VaR ótimo, pode-se afirmar, com um nível de confiança de 95%, que o benefício financeiro será de, no mínimo, R\$ 37.509,50.

Tabela 13 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso A1 considerando o preço da venda de energia de R\$ 150,00 por MWh.

	Custo (R\$/ano)
S1	75.468,10
S2	64.328,90
S3	82.478,60
S4	48.168,20
S5	37.509,50
S6	55.192,20
S7	103.055,80
S8	87.959,70
S9	109.403,40
Valor esperado	74.250,00
VaR$\alpha=0.95$	37. 509,50
Tecnologia selecionada	I1 e I2

A Tabela 14 apresenta os valores do custo esperado para o caso A2, que considera, como custo de investimento do biodigestor, R\$75.000,00, e preço da venda de energia excedente no valor de R\$ 120,00 por MWh. Neste caso, o modelo retornou um valor esperado de R\$ 70.500,00, e as tecnologias selecionadas foram a I1 e I2, que, segundo a Tabela 10, tem potência igual a 16 e 32 kW. Quanto ao VaR ótimo, pode-se afirmar que, em 95% dos cenários, o fluxo de caixa será de R\$ 34.316,56.

Tabela 14 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso A2 considerando o preço da venda de energia de R\$ 120,00 por MWh.

	Custo (R\$/ano)
S1	71.648,70
S2	62.833,70
S3	76.690,10
S4	42.597,80
S5	34.361,60
S6	48.205,10
S7	100.782,90
S8	88.199,30
S9	104.830,00
Valor esperado	70.500,00
VaR$\alpha=0.95$	34.361,56
Tecnologia selecionada	I1 e I2

Nota-se, pelos valores comparados na Tabela 15, que a diminuição do preço da venda de energia, em torno de 20% no caso A1, provoca uma variação no VaR de aproximadamente 11% e, no valor esperado, de aproximadamente 6%. Já no caso A2, em que o preço da venda de energia excedente é de aproximadamente 35%, no valor do caso base, a variação no VaR é de quase 18%, e, no valor esperado, é de aproximadamente 11% em relação ao caso base. Portanto, pode-se afirmar que a sensibilidade do VaR e do valor esperado ao preço de venda da energia excedente é pequena para esse caso de estudo.

Tabela 15 - Comparação entre o caso base, caso A1 e caso A2 devido à variação do preço da venda de energia excedente.

	Caso base	Caso A1	Caso A2
Tecnologia selecionada	I1 e I2	I1 e I2	I1 e I2
Preço da venda de energia excedente (R\$/MWh)	190,00	150,00	120,00
VaR$\alpha=0.95$ (R\$)	41.706,74	37.509,50	34.361,56
Valor Esperado (R\$)	79.290,00	74.250,00	70.500,00

5.5 Caso B

O caso B consistiu na simulação do modelo considerando o custo de investimento do biodigestor como R\$100.000,00, para o Caso B1, e de R\$ 150.000,00, para o caso B2, para avaliar o impacto desse parâmetro sobre o VaR e o valor esperado.

A Tabela 16 apresenta os valores do custo esperado para o caso B1, que considera, como custo de investimento do biodigestor, R\$100.000,00, e preço da venda de energia excedente no valor de R\$ 190,00 por MWh. Neste caso, tem-se um valor esperado de R\$ 71.240,00, e as tecnologias selecionadas foram 3 unidades da I1, que, segundo a Tabela 10, têm potência igual a 16 kW cada. Quanto ao VaR ótimo, pode-se afirmar, com um nível de confiança de 95%, que o benefício financeiro será de, no mínimo, R\$ 38.276,35.

Tabela 16 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso B1 considerando o custo de investimento do biodigestor como R\$ 100.000,00.

	Custo (R\$/ano)
S1	76.685,4
S2	61.631,1
S3	80.084,8
S4	50.298,3
S5	38.276,3
S6	38.316,1
S7	99.004,3
S8	78.004,8

S9	96.464,3
Valor esperado	71.240,00
VaR$\alpha=0.95$	38.276,35
Tecnologia selecionada	3 x I1

A Tabela 17 apresenta os valores do custo esperado para o caso B2, que considera, como custo de investimento do biodigestor, R\$150.000,00, e preço da venda de energia excedente no valor de R\$ 190,00 por MWh. Neste caso, tem-se um valor esperado negativo de R\$ 59.000,00, e as tecnologias selecionadas foram 3 unidades da I1, que, segundo a Tabela 10, têm potência igual a 16 kW cada. Quanto ao VaR ótimo, pode-se afirmar que, em 95% dos cenários, o fluxo de caixa será de, no mínimo, R\$ 30.139,08.

Tabela 17 - Custos dos cenários, VaR e valor esperado do caso B2 considerando o custo de investimento do biodigestor como R\$ 150.000,00.

	Custo (R\$/ano)
S1	67.666,00
S2	50.287,90
S3	62.277,20
S4	32.982,20
S5	30.139,10
S6	30.139,10
S7	86.219,60
S8	65.683,30
S9	83.840,90
Valor esperado	59.000,00
VaR$\alpha=0.95$	30.139,08
Tecnologia selecionada	3 x I1

Nota-se, pelos valores apresentados na Tabela 18, que o aumento do custo de investimento no biodigestor, de aproximadamente 33% no caso B1 em relação ao caso base,

provoca uma variação no VaR de aproximadamente 8% e, no valor esperado, de aproximadamente 10%. Já no caso B2, em que o aumento do custo de investimento no biodigestor é de 50% em relação ao valor do caso base, a variação no VaR é de quase 28% e, no valor esperado, de aproximadamente 26%.

Tabela 18 - Comparação entre o caso base, caso B1 e caso B2 devido à variação do custo de investimento do biodigestor.

	Caso base	Caso B1	Caso B2
Tecnologia selecionada	I1 e I2	3 x I1	3 x I1
Custo de investimento do biodigestor (R\$)	75.000,00	100.000,00	150.000,00
VaR$\alpha=0.95$ (R\$)	41.706,00	38.276,35	30.139,08
Valor Esperado (R\$)	79.290,00	71.240,00	59.000,00

Com as simulações de diversos casos do modelo matemático, é possível conhecer o comportamento desse investimento do ponto de vista econômico. Neste caso, mesmo considerando o risco devido à incertezas relacionadas à demanda e à produção de biogás do caso hipotético, o investimento se mostra vantajoso economicamente.

Essa avaliação econômica, apesar de mostrar-se vantajosa por si só, é ainda parte do PIR de uma maneira geral. Com os dados e valores conhecidos pelas simulações do modelo matemático, o PIR deve prosseguir na avaliação do recurso energético para considerar os aspectos ambientais, sociais e políticos.

5.6 Caso C

Neste caso, foram simulados valores buscando-se obter um VaR igual a zero, que significa que, com um nível de 95% de confiança, o fluxo de caixa anual não resultará em lucro nem em prejuízo, ou seja, as receitas serão iguais às saídas.

No Caso C apresentado na Tabela 19, utilizando o custo de investimento do biodigestor de R\$ 300.000,00 e o preço de venda de energia excedente no valor de R\$ 125,00, obteve-se um VaR de R\$ 288,10. Isso significa que, mesmo nessas condições, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que o benefício será de, no mínimo, R\$ 288,10.

Tabela 19 – Valores obtidos da simulação do Caso C.

	C1
Valor esperado	R\$ 21.839,13
VaR$\alpha=0.95$	R\$ 288,10
Tecnologia selecionada	I2
Preço de venda de energia	R\$ 125,00
Custo do Biodigestor	R\$ 300.000,00

5.7 Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados casos de estudo por meio dos quais foi possível avaliar e analisar as funções do modelo matemático desenvolvido. Utilizando dados baseados na bibliografia e em pesquisas informais com empresas que atuam no mercado de geração distribuída, foi criado um caso hipotético, chamado de caso base, para fins de análise. Apesar disso, buscou-se garantir que a aproximação com a realidade fosse a maior possível.

A partir do caso base estudado, foi possível identificar a sensibilidade dos custos esperados e do VaR frente à variação de alguns dos parâmetros analisados, como o preço de venda da energia excedente e o custo de investimento do biodigestor. Notou-se que, quanto maior o VaR, maior a sensibilidade deste à variação dos parâmetros analisados.

Por fim, o modelo mostrou-se uma ferramenta válida para selecionar a unidade ótima de geração distribuída, utilizando, como fonte primária de energia, o biogás, considerando custos de instalação, operação e manutenção e as receitas com a venda da energia excedente e com a economia de energia elétrica, levando em conta os riscos devido às incertezas das variáveis e utilizando, como medida de risco, o VaR.

Capítulo 6

Conclusões

A utilização do biogás para a geração de energia elétrica no ambiente rural é uma opção que soma benefícios para o produtor, para a concessionária e para o ambiente. Esse processo deve ser analisado sob a ótica de um método capaz de valorar tais benefícios, que rompem a barreira dos valores monetários.

Para o produtor rural, o benefício se dá pela solução do problema do tratamento dos dejetos, que são gerados em grande quantidade na criação de animais confinados e devem sofrer os tratamentos mínimos exigidos na legislação ambiental antes de serem depositados no meio ou em corpos hídricos. Além disso, a geração de energia na própria propriedade pode sanar possíveis falhas no atendimento por parte da concessionária, devido às longas distâncias dos grandes centros, e ainda trazer benefícios econômicos para o produtor.

A concessionária, por sua vez, beneficia-se pela utilização da geração distribuída em seu sistema de distribuição e pela garantia do atendimento ao consumidor rural. Devido à distância das propriedades rurais, muitas vezes a concessionária acaba tendo gastos elevados para atender e prestar a devida manutenção a esses consumidores, sem um retorno financeiro compensatório.

O benefício, do ponto de vista ambiental, é a garantia da destinação correta dos dejetos e a menor emissão de metano, que tem uma capacidade de degradação 21 vezes maior que o gás carbônico para a camada de ozônio. Indiretamente, ainda se pode considerar os benefícios da geração de energia elétrica de maneira distribuída, o que diminui a necessidade da expansão do sistema de transmissão e distribuição.

Para a valoração dos ônus e bônus da utilização desse recurso energético em propriedades rurais, este trabalho se baseou nos pilares do Planejamento Integrado de Recursos (PIR). O PIR contabiliza os custos não só financeiros, mas todo o ônus causado pelo recurso energético, assim como os benefícios relacionados a ele.

Pode-se dizer que o PIR contabiliza os custos decorrentes das dimensões ambiental, econômica, social e política, por meio da atribuição de notas a cada parâmetro relacionado com as quatro dimensões.

Outra característica do PIR é aplicação específica, considerando as necessidades e os objetivos da região de estudo, utilizando, para isso, a participação dos Interessados e

Envolvidos (In-En) no processo de planejamento. São os In-En todas as pessoas, organizações ou empresas que podem ser afetadas ou que estão relacionadas ao que está sendo planejado.

Quanto à dimensão econômica, este trabalho propôs, para a sua avaliação, a utilização de um modelo matemático estocástico linear que considera a incerteza das variáveis a partir de uma árvore de cenários de duas etapas. Para a avaliação do risco causado pelas incertezas, utilizou-se o Valor em Risco (VaR) como medida, que garante, com uma confiança de $1-\alpha$, sendo α o nível de confiança, que o custo total anual não será maior que um determinado valor, valor este denominado como VaR.

Foram criados nove cenários, em que três indicavam a variação da demanda entre média, mínima e máxima e três indicavam a produção de biogás como média, mínima e máxima por hora na propriedade. A partir das simulações de um caso hipotético, concluiu-se a grande sensibilidade do VaR e do valor esperado do custo final em relação aos custos de investimento com o biodigestor.

O modelo mostrou-se uma ferramenta válida para a avaliação financeira, considerando os riscos devido às incertezas e um investidor avesso ao risco. Esse modelo, quando utilizado junto ao processo do PIR, pode ser um instrumento de auxílio ao processo de tomada de decisão quanto à utilização de determinada fonte energética para uma região sob estudo.

As dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho ficam como sugestão de trabalhos futuros para a continuidade dessa linha de pesquisa, dentre elas:

- Levantamento dos dados necessários para aplicação do modelo matemático proposto e para a avaliação do potencial do biogás como fonte geradora sob a ótica do PIR em um caso real e atual.
- Consideração do risco que as incertezas referentes às variáveis relativas à qualidade do biogás representam, levando em conta a sensibilidade do processo de produção de biogás à variação da temperatura.
- Criação de uma interface no *Microsoft Excel* mais simples e intuitiva para a utilização do modelo pelo investidor.
- Análise da sensibilidade do VaR e do valor esperado frente à variação dos preços das tecnologias de geração.
- Atualização do modelo com os custos envolvidos com o processo de certificação de emissão reduzida (CER) para a análise da venda de créditos de carbono.

Referências Bibliográficas

- ABRELPE (2013). *Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos*, Associação Brasileira de empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil.
- ABRELPE (2015). *Estimativas dos Custos para Viabilizar a Universalização da Destinação Adequada de Resíduos Sólidos no Brasil*, Associação Brasileira de empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil.
- Aguiar, A.S. de (2008a). Equivalente certo e medidas de risco em decisões, *Relatório Técnico*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Aguiar, A.S. de (2008b). *Equivalente Certo e Medidas de Risco em Decisões de Comercialização de Energia Elétrica*, Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Alabedin, A.Z. (2012). *Generation scheduling in Microgrids under uncertainties in power generation*, University of Waterloo, Waterloo, Canadá.
- Alves, J.W.S. (2000). *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Alvez, C.A. (2015). *Seleção e operação ótima de recursos energéticos distribuídos inseridos em uma microrrede de energia elétrica*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.
- ANEEL (2008). *Biomassa, Atlas de energia elétrica do Brasil*, 3 ed. , Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF.
- ANEEL (2007). Resolução Normativa nº77, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF.
Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>.
- ANEEL (2009). Resolução Normativa nº247, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF.
Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006247.pdf>.
- ANEEL (2012). Resolução Normativa nº482, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF.
Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- ANEEL (2015). Resolução Normativa nº687, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília,

DF.

Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.

- Asano, H., Ariki, W., Bando, S. (2010). Value of investment in a microgrid under uncertainty in the fuel price, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, United States of America.
- Baitelo, R.L. (2011). *Modelo de Cômputo e Valoração de Potenciais Completos de Recursos Energéticos para o Planejamento Integrado de Recursos* Modelo de Cômputo e Valoração de Potenciais Completos de Recursos Energéticos para o Planejamento Integrado de Recursos, Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Baziar, A., Kavousi-Fard, A. (2013). Considering uncertainty in the optimal energy management of renewable micro-grids including storage devices, *Renewable Energy* **59**: 158–166.
- Bley Jr., C. (2015). *Biogas: a energia invisível*, 2 ed., CIBiogás, ed., CIBiogás, São Paulo.
- Brito, R.G.D.C., Andrade, F.C., Sakiyama, E., Dias, E.F. (2015). Geração Distribuída no Brasil: panorama , barreiras e oportunidades.
Disponível em: http://www.cogen.com.br/paper/2015/GDartigo_02_06_2015.pdf.
- Campos, C.E.A., Viera, G.E.G., Teixeira, L.F., Colen, A.G.N. (2015). Produção de biogás em áreas de aterros sanitários : uma revisão, *Revista Liberato* **16**: 193–204.
- Castanheira, N.P. & Macedo, L.R.D. de M. (2012). *Matemática financeira aplicada*, 3 ed., IBPEX, Curitiba.
- Cervi, R.G. (2009). *Avaliação econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por biodigestão anaeróbia: estudo de caso em unidade biointegrada*, Universidade Estadual Paulista ‘Julio de Mesquita Filho’, Botucatu, Brasil.
- CETESB (2006). Biogás: projetos e pesquisas no Brasil, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo, SP.
- Chaouachi, A., Kamel, R.M., Andoulsi, R. & Nagasaka, K. (2013). Multiobjective Intelligent Energy Management for a Microgrid, *IEEE Transactions on Industrial Electronic* **60**(4): 1688–1699.
- Coelho, S. T., Velázquez, S. M. S. G., Silva, O. C., & Abreu, F. C. (2006). Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18kW, V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio, Brasília, Brasil, pp. 1–12.
- CONAMA (1993). Resolução no5, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- Costa, T. V. M. (2012). A pecuária bovina no Brasil e as possibilidade de sua inserção no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Associação Brasileira de Criadores, Passo Fundo, Brasil.

- Curado, M.I.C. (2015). *Localização de perdas não técnicas de energia em sistemas de distribuição utilizando o método PQ*, Trabalho de conclusão de curso, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Daga, J., Campos, A. T., Feiden, A., Klosowski, E. S., & Câmara, R. J. (2008). Análise da adequação ambiental e manejo dos dejetos de instalações para suinocultura em propriedades na região oeste do Paraná, *Engenharia Agrícola* **27**(3): 1-11.
- Ensinas, A.V. (2003). *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas-SP*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010). Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização, Gulzow, Alemanha.
- Falleiro, A.D.M., Gastaldini, M.D.C.C. & Andrade, J.C.S. (2016). Projetos de energia renovável no âmbito do MDL - perfil dos projetos localizados no RS, *Revista Metropolitana de Sustentabilidade* **6**(0): 100–112.
- Farzan, F. (2013). *Towards Uncertainty in Micro-grids: Planning, Control and Investment*, Tese de doutorado, The State University of New Jersey, Estados Unidos da América.
- FEAM (2015). Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria, Fundação Estadual de Meio Ambiente, Belo Horizonte, Brasil.
- Fernandes, D.M. (2012). *Biomassa e biogás da suinocultura*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil.
- Feroldi, M., Urio, M.B., Araújo, A.V. de, Cremonez, P.A. (2014). Geração de biogás a partir de efluentes de abatedouros, *Journal of Agronomic Sciences* **3**: 130–148.
- Freitas, J.Z. (2008). Esterqueiras para dejetos bovinos. Niterói: Programa Rio Rural.
- Fujii, R.J. (2006). *Modelo de Caracterização Sistêmica das Opções de Oferta Energética para o PIR*, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Furtado, M. de C. (2010). *Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energias renováveis no Brasil*, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Galesne, A., Fensterseifer, J.E. & Lamb, R. (1999). Decisões de investimento da empresa, 1. ed., Atlas, São Paulo.
- García, E.G.-V. (2004). *Gestión Energética Óptima de un consumidor industrial de vapor y electricidad en mercados liberalizados*, Tese de doutorado, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, Espanha.
- Gimenes, A.L.V., Udaeta, M.E.M., Galvão, L.C.R. & Reis, L.B. dos (2004). Modelo de integração de recursos para um planejamento energético integrado e sustentável, *Congresso Brasileiro de Energia*, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1590–1600.
- Gomez-Villalva, E. & Ramos, A. (2003). Optimal energy management of an industrial

- consumer in liberalized markets, *IEEE Transactions on Power Systems*, **18**(2): 716–723.
- Haas, L.B. (2013). *Desenvolvimento De Um Filtro Para Remoção De H₂S De Biogás*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- Inovagrid (2016). Tratamento de biogás através de tecnologias atuais. Acesso em: outubro/2016.
Disponível em: <http://www.inovagrid.com/geracao-com-biogas/tecnologias-atuais-de-tratamento-de-biogas/>.
- Investing (2016). Crédito de Carbono Futuro, Acesso em: Fevereiro/2016.
Disponível em: <http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>.
- Konzen, E.A. (1983). Manejo e utilização de dejetos suínos, EMBRAPA, Concórdia.
- Lima, A.C.G. & Passamani, F.C. (2012). *Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES*, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
- Lotero, R.C., Colombari, L.F. dos S. (2015). Seleção e operação ótima de tecnologia para geração distribuída a partir de biogás, *XVI Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré*, Puerto Iguazu, Argentina.
- Machado, D.O. (2014). *Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás*, Dissertação de mestrado, Universidade do vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil.
- Machado, L.L.N. (2011). *Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Maffioletti, J., Mota Neto, J. (2013). Geração de energia elétrica com uso de casca de arroz, *Revista brasileira de energia* **19**: 49–59.
- Maffra, S.A.R. de S. (2013). *Risco e Seleção de portfólios com a medida CVaR e o modelo GO-GARCH*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada - IMPA, Rio de Janeiro, Brasil.
- Marques, L.S. (2014). *Avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto*, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil.
- Maruyama, F.M. (2013). *Arquitetura do Plano Preferencial de Recursos para o Setor Elétrico no Planejamento Integrado de Recursos Energéticos*, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Panzarini, N.H., Rodrigues, R.L. & Francisco, A.C. de (2015). Uso de resíduo da suinocultura na produção de biogás : revisão da literatura, *V Congresso brasileiro de engenharia de produção*, Ponta Grossa, Brasil.
- Pappala, V.S., Erlich, I., Rohrig, K., Dobschinski, J. (2009). A Stochastic Model for the

- Optimal Operation of a Wind-Thermal Power System, *IEEE Transactions on Power Systems* **24**(2): 940–950.
- Pecora, V., Velázquez, S.M.S.G., Coelho, S.T. (2009). Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo, *Congresso Internacional de Bioenergia, IV, Vol 18*, Curitiba, Brasil.
- Portal Brasil (2013). Governo federal aprova Plano Nacional de Saneamento Básico. Acesso em: Janeiro/2015.
Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2013/12/governo-federal-aprova-plano-nacional-de-saneamento-basico>.
- Portal Resíduos Sólidos (2014). O mercado de crédito de carbono, O mercado de crédito de carbono. Acesso em: Fevereiro/2017.
Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/o-mercado-de-credito-de-carbono/>.
- Practical Action (2017). Biogas, Acesso em: Março/2017.
Disponível em: <http://practicalaction.org/biogas-fuel>.
- Prati, L. (2010). *Geração De Energia Elétrica a Partir Do Biogás Gerado Por Biodigestores*, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Quevedo, P.M. de (2009). *Optimización estocástica de la operación a medio plazo de una empresa generadora*, Dissertação de mestrado, Universidade Pontificia Comillas, Madrid, Espanha.
- Ribeiro, R.P. & Machado, M.E.R. (2013). Análise do comportamento dos investidores no multinvest, GEPROS. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas* **8**: 107–118.
- Rockafellar, R.T. (2001). Optimization under uncertainty, *Relatório Técnico*, University of Washington, Seattle, Estados Unidos da América.
- Rodrigues, D.L., Aquino, C.F., Estevam, G.P. (2011). Produção de biogás a partir dos esgotos utilizando reatores anaeróbicos do tipo rafa seguido por lodos ativados numa estação de tratamento de esgoto, *Omnia Exatas* **4**(2): 103–109.
- Rogers Family Company (2012). Revolutionizing waste treatment in coffee production. Acesso em: Março/ 2017.
Disponível em: <http://www.rogersfamilyco.com/index.php/revolutionizing-waste-treatment-in-coffee-production/>.
- Santos, E.L.B. dos, & Nardi Jr, G. de (2013). Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal, *Tekhne e Logos* **4**(2).
- Santos, I.F.S. dos (2015). *Proposta de um método escalonado para a motorização do Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de Geração de Energia Elétrica*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.

- Santos, N.S. (2009). *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de Tratamento De esgotos de Madre De Deus - Bahia*, Dissertação de mestrado, Faculdade de tecnologia e ciências, Salvador, Brasil.
- Santos, R.O. (2010). *Análise de retorno e risco em fundos de investimento dos bancos públicos brasileiros*, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (2016). *Números da Pecuária Paranaense*, Curitiba, PR.
- Seixas, J., Folle, S., Marchetti, D. (1981). *Construção e funcionamento de biodigestores*, EMPRABA, Brasília..
- SEMA (1998). *Resolução SEMA nº031/1998*, Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília, DF.
- Siddiqui, A.S.& Marnay, C. (2008). Distributed generation investment by a microgrid under uncertainty, *Energy* **33**(12): 1729–1737.
- Silva, F.P. (2015). *Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil.
- Silva, P.R.N. & Minini, K.M.S. (2013). Geração de energia elétrica a partir do biogás obtido da biodigestão de dejetos suínos com resíduos da produção de biodiesel, P&D - *Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL* 5: 28–30.
- SNSA (2013). *Plano Nacional de Saneamento Básico*, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, DF.
- SNSA (2014). *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos*, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, DF.
- SNSA (2016). *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2014*, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, DF.
- Souza, C. de F., Campos, J.A., Bressan, W.S., Mogami, C.A. & Santos, C.R. dos (2008). Produção Volumétrica de Metano-Dejetos de Suínos, *Ciência e Agrotecnologia* **32**(1):219-224.
- Souza, F.L.F. (2015). No ritmo atual, país levaria 129 anos para cumprir metas de saneamento, Folha de São Paulo. Acesso em: Janeiro/2016.
Disponível em : <http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/04/1621985-no-ritmo-atual-pais-levaria-129-anos-para-cumprir-metas-de-saneamento.shtml>
- Souza, M.E. (1984). Fatores que influenciam a digestão anaeróbia, *Revista DAE* **44**(137): 88-94.
- Souza, S.N.M. de, Sordi, A., Oliva, C.A. (2002). Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná, *4º Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas, Brasil.

- The EcoAmbassador (2017). Biogas and anaerobic digestion. Acesso em: Março/2017. Disponível em: <http://www.theecoambassador.com/Biogas.html>.
- Tutor Vista (2017). Sources and principle of biogas plants. Acesso em: Março/2017. Disponível em: <http://www.tutorvista.com/content/science/science-ii/sources-energy/biogas-plants.php>.
- Udaeta, M.E.M. (1997). *Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR - para o Setor Elétrico*, Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- UNFCCC. (2016). Project Search, United Nations Framework Convention on Climate Change. Acesso em: março/2017. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>.
- Versiani, B.M. (2005). *Desempenho de um reator submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do campus da UFRJ*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Villalva, E.G. & Ramos, A. (2004). A two-stage stochastic model for energy contracting decisions of an industrial consumer, *10th International Conference on Stochastic Programming*, Tucson, Estados Unidos da América, pp. 1–22.
- Westrup, G., Duarte, G.W., Alberton, J., Niehues, C., Rocha, D.A. & Vandresen, S. (2015). Estudo da viabilidade econômica de geração de energia elétrica a partir de bogás proveniente de dejetos de suínos de uma propriedade rural em Forquilha/SC, *Revista Ciência & Cidadania* 1(1).