



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Luane Schiochet Pinto

**ANÁLISE DE RISCO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
PROVENIENTE DA VINHAÇA DE AGROINDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Goiânia, 2018.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Luane Schiochet Pinto

**“ANÁLISE DE RISCO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE
BIOGÁS PROVENIENTE DA VINHAÇA DE AGROINDÚSTRIAS
SUCROENERGÉTICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Energias Renováveis e Engenharia Econômica
Aplicada.

Prof(a). Dr(a). ELDER GERALDO DOMINGUES (presidente e orientador – PPGTPS IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). DAYWES PINHEIRO NETO (coorientador – PPGTPS IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO (avaliador externo – UNB)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). SIMONE SOUZA RAMALHO (avaliadora – PPGTPS IFG)

Assinatura

Prof(a). Dr(a). JOSÉ LUIS DOMINGOS (suplente – PPGTPS IFG)

Assinatura

Aprovado em: 27/04/2018

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- Tese Artigo Científico
 Dissertação Capítulo de Livro
 Monografia – Especialização Livro
 TCC - Graduação Trabalho Apresentado em Evento
 Produto Técnico e Educacional - Tipo: Registro de Software

Nome Completo do(a) Autor(a): **Luane Schiochet Pinto**

Matrícula: **20152011140052**

Título do Trabalho: **Análise de Risco do Aproveitamento Energético de Biogás Proveniente da Vinhaça de Agroindústrias Sucroenergéticas para Geração de Energia Elétrica**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: ____/____/____

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

GOIÂNIA, 27 / 04 / 2018.
Local Data

Luane Schiochet Pinto

Assinatura do(a) Autor(a) e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Luane Schiochet Pinto

ANÁLISE DE RISCO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
PROVENIENTE DA VINHAÇA DE AGROINDÚSTRIAS SUCROENERGÉTICAS
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS - IFG) – Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues

Coorientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto

Goiânia, 2018.

P6593a Pinto, Luane Schiochet.

Análise de risco do aproveitamento energético do biogás proveniente da vinhaça de agroindústrias sucroenergéticas para geração de energia elétrica / Luane Schiochet Pinto. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2018.
117f.

Orientador: Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues.
Coorientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto.

Dissertação (mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Biogás. 2. Viabilidade econômica. 3. Geração de energia elétrica. I. Domingues, Elder Geraldo. II. Pinheiro Neto, Daywes (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 665.76

*“Se quer viver uma vida feliz, amarre-se a
uma meta, não às pessoas nem às coisas.”*

Albert Einstein

Aos meus pais, Luciano e Rozane, que mesmo distantes se fazem presentes em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Laís e Luan, por todo o apoio e amor transmitido.

Ao meu noivo Giovani, pelo companheirismo durante esta caminhada.

À minha amiga Sandmara, por mais essa etapa que concluímos juntas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ser minha fonte de fé e sabedoria, e o principal responsável pelo meu sucesso.

Aos meus pais e irmãos, por me apoiarem nos momentos difíceis, confiarem e acreditarem em mim, vibrarem por cada conquista e principalmente por compreenderem que distância física é por um bom motivo.

Ao meu noivo, pelos momentos que não estive ao seu lado, por toda calma e paciência que teve comigo durante essa jornada, e por nunca me deixar desanimar, mesmo com todas as dificuldades.

A minha amiga Sandmara pelas conversas, angústias e risadas compartilhadas, pois mesmo com a distância sempre me apoiou, incentivou e nunca duvidou da minha capacidade.

Ao orientador, Prof. Dr. Elder Geraldo Domingues, por ter aceitado orientar este trabalho, estar presente durante toda sua elaboração, compartilhando seu conhecimento e mostrando a melhor forma de se chegar no melhor resultado, mesmo com todos os desafios e imprevistos que surgiram no decorrer da jornada.

Ao coorientador, Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto, por esclarecer todas as dúvidas que surgiram durante a elaboração do trabalho, pelo tempo que disponibilizou para auxiliar no desenvolvimento do *software* e principalmente por toda a compreensão.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS - IFG) pelo esforço, dedicação e conhecimento transmitido durante o curso preparando me para o futuro da profissão. Agradeço também aos colegas de mestrado pelas experiências transmitidas.

Agradeço aos colaboradores da Agroindústria Sucroenergética Jalles Machado, por abrir as portas e disponibilizarem os dados necessários para que fosse possível a realização deste estudo.

Aos membros da banca de qualificação, pelas considerações e esclarecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de análise de risco de investimentos em geração de energia elétrica decorrente do aproveitamento energético do biogás oriundo da biodigestão da vinhaça produzida em agroindústrias sucroenergéticas. Para a análise de viabilidade econômica é considerada a comercialização da energia elétrica no ambiente de contratação livre (ACL) e no ambiente de contratação regulado (ACR). A metodologia aplica modelos econométricos, juntamente com o Método de Monte Carlo, para a geração das séries sintéticas da variável aleatória produção de etanol, a qual é aplicada para estimar a produção de vinhaça no processo, e para a variável aleatória Preço de Liquidação das Diferenças, empregada para obter as receitas provenientes da venda de energia elétrica no ambiente de contratação livre. A análise de viabilidade econômica é baseada na avaliação das distribuições de probabilidade dos indicadores Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno Modificada e *Payback* Descontado. É realizado um estudo de caso com base em dados reais de uma usina sucroenergética localizada na região Centro Oeste do Brasil. Os resultados mostram que o projeto é viável para a maioria dos cenários simulados, em ambas as opções de comercialização, além de fornecerem informações importantes para o processo de tomada de decisão. Por fim, é realizada a análise de sensibilidade dos principais parâmetros que influenciam a viabilidade da implantação do projeto, a saber: vazão diária da vinhaça (m^3/dia), preço da venda de energia elétrica no ACR (R\$/MWh), montante contratado no ACL (MW) e potência limite.

Palavras-chaves: Análise de Viabilidade Econômica, Biogás, Comercialização de Energia Elétrica, Processos Estocásticos, Vinhaça.

ABSTRACT

This work presents a methodology for risk analysis of investments in electric energy generation based on the biogas energy utilization derived from the biodigestion of vinasse produced in sugarcane agroindustries. For the economic feasibility analysis, it is considered that the electricity produced is commercialized in the free contracting environment (ACL) and the regulated contracting environment (ACR). The methodology of risk analysis uses econometric models, associated with the Monte Carlo Method, to generate the synthetic series of the random variable ethanol production, which is used to estimate the production of vinasse in the process, and for the random variable Settlement Price of Differences, which is used to obtain revenues from the sale of electricity in the free contracting environment. The economic viability analysis is based on the evaluation of the probability distributions of the indicators Net Present Value, Modified Internal Rate of Return and Discounted Payback. A case study was carried out using real data from a sugar-energy plant located in the Central West region of Brazil. The results showed that the project is feasible for most of the simulated scenarios in both marketing options, as well as providing important information for the decision-making process. Finally, it was done the sensitivity analysis of the main parameters that influences the feasibility of the project implementation, namely: vinasse flow per day (m^3/day), price of electric energy sales in the ACR (R\$/MWh), the amount contracted in the ACL (MW) and limit power.

Keywords: Economic Viability Analysis, Biogas, Electric Energy Trading, Stochastic Processes, Vinasse.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivo Geral.....	27
1.2 Objetivos Específicos.....	27
1.3 Estrutura do Trabalho.....	28
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
2.1 Processo de Produção de Etanol e Açúcar.....	29
2.1.1 Subprodutos Gerados no Processo de Produção de Etanol e Açúcar.....	30
2.2 Biogás.....	33
2.2.1 Temperatura.....	34
2.2.2 pH.....	35
2.2.3 Composição do Efluente.....	35
2.2.4 Agitação.....	36
2.3 Sistemas Anaeróbicos de Tratamento de Biomassa.....	36
2.3.1 Biodigestores Anaeróbicos.....	37
2.3.2 Lagoas Anaeróbicas.....	38
2.3.3 Reatores Anaeróbicos.....	39
2.4 Tecnologias de Aproveitamento do Biogás.....	40
2.4.1 Microturbinas e Turbinas a Gás.....	41
2.4.2 Turbinas a Vapor.....	41
2.4.3 Motor <i>Stirling</i>	42
2.4.4 Motores de Ciclo Otto.....	42
2.5 Mercado de Energia Elétrica Brasileiro.....	43
2.5.1 Ambiente de Contratação Regulado.....	44
2.5.2 Ambiente de Contratação Livre.....	45
2.6 Processos Estocásticos.....	46
2.6.1 Processo de Wiener.....	47
2.6.2 Movimento Aritmético Browniano.....	47
2.6.3 Movimento Geométrico Browniano.....	48
2.6.4 Movimento de Reversão a Média.....	48
2.6.4.1 Modelo Aritmético de Reversão à Média.....	49
2.6.4.2 Modelo Geométrico de Reversão à Média.....	49
2.7 Modelo Geométrico de Reversão à Média com Saltos de Poisson.....	50

2.8	Determinação do Processo Estocástico.....	51
2.8.1	Teste de Dickey-Fuller	51
2.8.2	Teste da Razão da Variância.....	52
2.9	Correlação entre Variáveis.....	53
3	METODOLOGIA.....	55
3.1	Índices de Sazonalidade	58
3.2	Modelo da Variável Aleatória Produção de Etanol.....	58
3.3	Modelo da Variável Aleatória Preço de Liquidação das Diferenças	59
3.4	Estimativa da Produção de Vinhaça.....	60
3.5	Dimensionamento do Reator UASB	60
3.6	Estimativa da Produção de Biogás	61
3.7	Potência Elétrica Disponível e Energia Elétrica Gerada.....	63
3.8	Análise de Viabilidade Econômica	64
3.8.1	Fluxo de Caixa.....	64
3.8.1.1	Receita Bruta da Venda de Energia Elétrica	66
3.9	Indicadores Econômicos	67
3.9.1	Custo de Capital.....	68
3.9.2	Valor Presente Líquido	68
3.9.3	Taxa Interna de Retorno Modificada.....	69
3.9.4	<i>Payback</i> Descontado.....	70
3.10	Análise de Sensibilidade	71
4	RESULTADOS.....	72
4.1	Caracterização da Agroindústria Sucroenergética	72
4.2	Obtenção dos Cenários da Variável Aleatória Produção de Etanol.....	73
4.2.1	Dados Históricos.....	73
4.2.2	Testes Estatísticos	73
4.2.3	Índices de Sazonalidade.....	75
4.2.4	Validação do Modelo Estocástico	75
4.3	Modelo Estocástico da Variável Aleatória PLD	78
4.3.1	Dados Históricos do PLD	78
4.3.2	Testes Estatísticos	79
4.3.3	Índices de Sazonalidade.....	80
4.3.4	Validação do Modelo Estocástico	80
4.4	Correlação	83

4.5	Obtenção dos Cenários da Variável Aleatória Produção de Vinhaça	84
4.6	Dimensionamento do Reator UASB	86
4.7	Obtenção dos Cenários da Produção de Biogás	86
4.8	Obtenção dos Cenários da Potência Elétrica Disponível	87
4.9	Obtenção dos Cenários da Energia Elétrica Gerada	88
4.10	Alternativas de Comercialização da Energia Elétrica Gerada	88
4.10.1	Opção 1 – Comercialização da Energia no ACR.....	89
4.10.1.1	Fluxo de Caixa	90
4.10.1.2	Análise da distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido	91
4.10.1.3	Análise da distribuição de probabilidade da Taxa Interna de Retorno Modificada	91
4.10.1.4	Análise da distribuição de probabilidade do <i>Payback Descontado</i>	92
4.10.2	Opção 2 – Comercialização da Energia no ACL.....	93
4.10.2.1	Fluxo de Caixa	93
4.10.2.2	Análise da distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido	94
4.10.2.3	Análise da distribuição de probabilidade da Taxa Interna de Retorno Modificada	95
4.10.2.4	Análise da distribuição de probabilidade do <i>Payback Descontado</i>	96
4.10.3	Comparação entre as Alternativas Apresentadas.....	96
4.11	Análise de Sensibilidade	97
4.11.1	Vazão Diária de Vinhaça	97
4.11.2	Preço da Energia Elétrica no ACR	99
4.11.3	Montante Contratado no ACL	100
4.11.4	Potência Limite	101
5	CONCLUSÕES.....	104
5.1	Artigos.....	105
5.2	Software	106
5.3	Sugestões de melhorias e trabalhos futuros	106
	ANEXO A.....	107
	ANEXO B.....	108
	ANEXO C.....	109
	ANEXO D.....	110
	REFERÊNCIAS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de produção do açúcar e do etanol.....	29
Figura 2.2 - Representação tridimensional em corte dos biodigestores chinês e indiano.	38
Figura 2.3 - Lagoa Anaeróbica.	39
Figura 2.4 - Desenho esquemático do reator UASB.	40
Figura 2.5 - Mercado de energia elétrica brasileiro.....	44
Figura 2.6 - Processo estocástico de uma família de variáveis aleatórias.	46
Figura 2.7 - Comportamento dos processos de Wiener, Wiener Generalizado e <i>drift</i>	48
Figura 2.8 - Comportamento do MGB e <i>drift</i>	49
Figura 2.9 - Processo de Reversão à Média.....	50
Figura 3.1 - Fluxograma geral de análise de risco.....	56
Figura 3.2 - Fluxograma da modelagem da variável PLD.	57
Figura 3.3 - Ilustração do cálculo da potência limite.	63
Figura 4.1 - Localização da Agroindústria Jalles Machado.	72
Figura 4.2 - Histórico da variável aleatória produção de etanol.....	73
Figura 4.3 - Resultado do teste da Razão da Variância.	74
Figura 4.4 - Regressão linear para a série produção de etanol.	76
Figura 4.5 - Simulação de validação da variável aleatória produção de etanol.....	77
Figura 4.6 - Séries sintéticas da variável aleatória produção de etanol.	78
Figura 4.7 - Histórico do PLD submercado SE/CO.	79
Figura 4.8 - Resultado do teste da Razão da Variância.	80
Figura 4.9 - Regressão linear para a série PLD.	81
Figura 4.10 - Simulação para validação do PLD submercado Sudeste/Centro-Oeste.....	83
Figura 4.11 - Séries sintéticas da variável aleatória PLD ao longo do período de análise.....	84
Figura 4.12 - Séries sintéticas da produção de vinhaça.	85
Figura 4.13 - Séries sintéticas do biogás obtido a partir da biodigestão da vinhaça.	87
Figura 4.14 - Séries sintéticas da potência elétrica disponível.	87
Figura 4.15 - Séries sintéticas da energia elétrica gerada.....	88
Figura 4.16 - Fluxo de caixa de um determinado cenário do ACR.	90
Figura 4.17 - Distribuição de Probabilidade do VPL da opção 1.....	91
Figura 4.18 - Distribuição de Probabilidade da TIRM da opção 1.	92
Figura 4.19 - Distribuição de Probabilidade do <i>Payback</i> da opção 1.....	92
Figura 4.20 - Fluxo de caixa de um determinado cenário do ACL	93

Figura 4.21 - Distribuição de Probabilidade do VPL da opção 2.....	95
Figura 4.22 - Distribuição de Probabilidade da TIRM da opção 2.	95
Figura 4.23 - Distribuição de Probabilidade do <i>Payback</i> da opção 2.....	96
Figura 4.24 - E[VPL] e σ [VPL] em função da vazão diária da vinhaça.	98
Figura 4.25 - E[VPL] e σ [VPL] em função do Preço da Energia no ACR.	99
Figura 4.26 - E[VPL] e σ [VPL] em função do montante contratado.	101
Figura 4.27 - E[VPL] em função da potência limite e da vazão diária da vinhaça.	102
Figura 4.28 - σ [VPL] em função da vazão diária da vinhaça e a potência limite.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características da vinhaça.	32
Tabela 2.2 - Composição do biogás.....	33
Tabela 2.3 - Valores críticos do teste de DF.....	52
Tabela 3.1 - Modelo de fluxo de caixa adotado.	65
Tabela 4.1 - Resultado do Teste de Dichey-Fuller para variável aleatória produção de etanol.	74
Tabela 4.2 - Índices de sazonalidade da variável produção de etanol.....	75
Tabela 4.3 - Parâmetros estimados.	76
Tabela 4.4 - Comparação entre os dados históricos e simulação da variável aleatória produção de etanol.....	77
Tabela 4.5 - Resultado do Teste de Dichey-Fuller com nível de significância igual a 5%.....	79
Tabela 4.6 - Índices de sazonalidade.	81
Tabela 4.7 - Parâmetros estimados.	82
Tabela 4.8 - Comparação entre os dados históricos e simulação da variável aleatória PLD. ..	83
Tabela 4.9 - Matriz de correlação.	84
Tabela 4.10 - Dados históricos para determinar a constante kVE	85
Tabela 4.11 - Parâmetros para dimensionar o reator UASB.	86
Tabela 4.12 - Dados da simulação.....	89
Tabela 4.13 - Indicadores do fluxo de caixa apresentado.....	90
Tabela 4.14 - Indicadores do fluxo de caixa apresentado.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

β	- beta alavancado de acordo com o setor regulado
COV	- carga orgânica volumétrica
ρ_{iz}	- coeficiente de correlação entre as variáveis i e z
Y_{abs}	- coeficiente de produção de sólidos
S_0	- concentração de substrato do afluente
S	- concentração de substrato do efluente
T	- conjunto arbitrário
c	- constante
R	- constante dos gases
σ_{iz}	- covariância entre as variáveis i e z
r_{CAMP}	- custo capital próprio
r_d	- custo de capital de terceiros
r_e	- custo de capital próprio
$\sigma[Payback]$	- desvio padrão da distribuição de probabilidade da <i>Payback</i>
$\sigma[TIRM]$	- desvio padrão da distribuição de probabilidade da TIRM
$\sigma[VPL]$	- desvio padrão da distribuição de probabilidade do VPL
γ	- desvio padrão da série de saltos
σ_z	- desvio padrão da variável
σ_i	- desvio padrão da variável i
K	- DQO correspondente a um mol de CH_4
$DQO_{CH_4,t+1}$	- DQO que será convertida em metano no período $t + 1$
E_{DQO}	- eficiência da remoção da matéria orgânica
η_{GMG}	- eficiência do grupo motor gerador
$E_{E,t+1}$	- energia elétrica gerada no período $t + 1$
$FC_{i(k)}$	- fluxo de caixa no período i e cenário k
$FCN_{i(k)}$	- fluxos de caixa negativos para o período i e cenário k
$FCP_{i(k)}$	- fluxos de caixa positivos para o período i e cenário k
ϕ	- frequência dos saltos
$^{\circ}C$	- graus Celsius
H_0	- hipótese nula
$b - l$	- inclinação da reta (regressão linear)
dt	- incremento de tempo
dx	- incremento de x
dY	- incremento de Y
I_{E_m}	- índice de sazonalidade da produção de etanol no mês m
I_{X_m}	- índice de sazonalidade da variável X no mês m
I_{P_m}	- índice de sazonalidade do PLD no mês m
a	- intercepto com o eixo vertical (regressão linear)
kVA	- kilovoltampere

R	- matriz de covariância
W	- matriz identidade
Z^T	- matriz transporta de Z
Z	- matriz triangular inferior
k_{ve}	- média da relação da produção de vinhaça por litro de etanol
\bar{k}	- média da série de saltos
$\overline{X_m}$	- média geral de determinado mês do histórico da variável X
$\overline{X_{hist}}$	- média global do histórico da variável X
MW	- megawatts
MWh	- megawatts hora
m	- mês
$MN_{i(k)}$	- mês i que o valor do fluxo de caixa é negativo logo antes de se tornar positivo no cenário k
$MP_{i(k)}$	- mês i que o valor do fluxo passa a ser positivo no cenário k
m^3	- metros cúbicos
M	- Montante contratado
N_H	- número de horas de funcionamento do grupo motor gerador
n	- número de períodos mensais durante o período de vida do projeto
α	- parâmetro de <i>drift</i>
σ	- parâmetro de variância (desvio padrão)
w	- período ou <i>lag</i> (razão da variância)
i	- períodos mensais durante o período de vida do projeto
$PCI_{biogás}$	- poder calorífico inferior do biogás
$P_{E_{t+1}}$	- potência elétrica disponível no período $t + 1$
P_C	- preço da energia elétrica no ACL
P_L	- preço da energia elétrica no ACR
r_B	- prêmio de risco Brasil
r_C	- prêmio de risco de crédito
$r_m - r_f$	- prêmio de risco do mercado de referência
P	- pressão atmosférica
dz	- processo de Wiener
$E_{S_{t+1}}$	- produção de etanol com sazonalidade no período $t+1$
E_t	- produção de etanol sem sazonalidade no instante t
$Q_{CH_4_{t+1}}$	- produção volumétrica de metano no período $t + 1$
V_{t+1}	- quantidade de vinhaça com sazonalidade no período $t+1$
$kcal$	- quilocaloria
kg	- quilograma
kW	- quilowatts
R_w	- razão da variância para <i>lag</i> w
$RB_{ACL_{t+1}}$	- receita bruta da venda de energia elétrica no ACL no período $t + 1$
$RB_{ACR_{t+1}}$	- receita bruta da venda de energia elétrica no ACR no período $t + 1$

ε_t	- ruído branco
X	- série estocástica qualquer
r_{desc}	- taxa de desconto adequada ao tipo de fluxo de caixa
r_f	- taxa de retorno do ativo livre de risco
$TIRM_{(k)}$	- taxa interna de retorno modificada no cenário k
T	- temperatura operacional do reator
t	- tempo
THR	- tempo de retenção hidráulico
x_t	- valor de x no instante t
$P_{S_{t+1}}$	- valor do PLD com sazonalidade no período $t+1$
P_t	- valor do PLD sem sazonalidade no instante t
$E[TIRM]$	- valor esperado da distribuição de probabilidade da TIRM
$E[Payback]$	- valor esperado da distribuição de probabilidade do <i>Payback</i>
$E[VPL]$	- valor esperado da distribuição de probabilidade do VPL
\bar{x}	- valor médio a longo prazo de x
\bar{Y}	- valor médio a longo prazo de Y
\bar{E}	- valor médio de longo prazo para a produção de etanol
\bar{P}	- valor médio de longo prazo para o PLD
$VPL_{(k)}$	- valor presente líquido no cenário k
Var	- variância
$Z(t)$	- variável aleatória
ε	- variável aleatória com distribuição normal padronizada $N(0,1)$
ε_E	- variável aleatória com $N(0,1)$ para a produção de etanol
ε_P	- variável aleatória com $N(0,1)$ para o processo de Wiener do PLD
ε_k	- variável aleatória com $N(0,1)$ para saltos do PLD
Y	- variável aleatória qualquer
x	- variável de aleatória qualquer
μ	- variável randômica com distribuição uniforme
Q	- vazão de vinhaça
η	- velocidade de reversão para o valor médio de longo prazo
η_E	- velocidade de reversão para o valor médio de longo prazo da produção de etanol
η_P	- velocidade de reversão para o valor médio de longo prazo do PLD
δ	- vetor de variáveis independentes com distribuição normal.
Ψ	- vetor transformado da decomposição de <i>Cholesky</i>
σ_E	- volatilidade da produção de etanol
σ_P	- volatilidade do PLD
VR	- volume total do reator

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	- Ambiente de Contratação Livre
ACR	- Ambiente de Contratação Regulado
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	- Modelo auto-regressivo sem deslocamento
ARD	- Modelo auto-regressivo com deslocamento
ARDT	- Modelo auto-regressivo com deslocamento e tendência determinística
CCEAL	- Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente de Contratação Livre
CCEAR	- Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado
CCEE	- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CENBIO	- Centro Nacional de Referência em Biomassa
CMO	- Custo Marginal de Operação
COFINS	- Contribuição para Financiamento de Seguridade Social
COPAM	- Conselho de Política Ambiental
CPSA	- Contrato de Prestação de Serviços Ancilares
CRUSP	- Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo
CSLL	- Contribuição Social sobre Lucro Líquido
DBO	- Demanda Biológica de Oxigênio
DF	- Dickey - Fuller
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
ESGB	- Expanded Granular Sludge Blanket
FC	- fluxo de caixa
FCD	- Fluxo de Caixa Descontado
FCLA	- Fluxo de Caixa Livre para os Acionistas
FCLE	- Fluxo de Caixa Livre para a Empresa
GLP	- Gás liquefeito de Petróleo
GMG	- Grupo Motor Gerador
IGP-ID	- Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna
IR	- Imposto de Renda
LAIR	- Lucro Antes do Imposto de Renda
MAB	- Movimento Aritmético Browniano
MARM	- Modelo Aritmético de Reversão à Média
MGB	- Movimento Geométrico Browniano
MGRM	- Modelo Geométrico de Reversão à Média
MMC	- Método de Monte Carlo
MME	- Ministério de Minas e Energia
MRM	- Modelo de Reversão à Média
NBR	- Norma Brasileira

O&M	- Custo de Operação e Manutenção
PASEP	- Programa de Formação de Patrimônio Público
PIS	- Programa de Integração Social
PLD	- Preço de Liquidação das Diferenças
RAFA	- Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RBC	- Relação Benefício - Custo
SIN	- Sistema Interligado Nacional
TIR	- Taxa Interna de Retorno
TIRM	- Taxa Interna de Retorno Modificada
TMA	- Taxa Mínima de Atratividade
TRH	- Tempo de Retenção Hidráulica
TUST	- Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
UASB	- Up-flow Anerobic Sludge Blanket
VPL	- Valor Presente Líquido
VRES	- Valores Anuais de Referência Específicos

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética e a instabilidade do sistema elétrico brasileiro são responsáveis, dentre outros fatores, pela busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica que apresentem maior eficiência e menor emissão de gases de efeito estufa (REIS, 2011).

A geração de energia elétrica e térmica aproveitando biogás proveniente da decomposição anaeróbica de diferentes resíduos, como os resíduos sólidos urbanos, esgotos e lodos sanitários, resíduos agropecuários, industriais e agroindustriais, se caracteriza como fonte alternativa, que aumenta a eficiência do uso da energia e recursos, minimiza os resíduos e contribui para a diversificação da matriz energética.

As agroindústrias sucroalcooleiras geram grandes quantidades de resíduos durante o processo de fabricação do etanol e do açúcar, sendo eles o bagaço, a palha, a cinza, a torta de filtro e a vinhaça. Esses resíduos, quando bem gerenciados, podem gerar energia elétrica e térmica, por meio da queima do bagaço da cana, e o biogás da biodigestão anaeróbica da vinhaça (NOGUEIRA e GARCIA, 2013).

A viabilidade técnica e econômica da geração de eletricidade neste setor está diretamente relacionada com a oferta de biomassa e da tecnologia empregada. Tal oferta mostra-se vantajosa no cenário brasileiro por ser complementar à energia hidrelétrica devido sua sazonalidade, pois a safra sucroalcooleira coincide com o período de seca (CASTRO *et al.*, 2008).

Quando se trata do aproveitamento energético do biogás proveniente da biodigestão de resíduos pode-se citar as seguintes vantagens: geração distribuída, evitando investimentos em linhas de transmissão por parte da concessionária; autoprodução de energia elétrica, economizando na fatura; agregação de valor aos resíduos antes descartados; receitas adicionais com créditos de carbono referentes à energia elétrica não consumida da rede; possibilidade de comercialização do excedente da energia elétrica gerada; e melhora dos aspectos ambientais, pois reduz significativamente os impactos ambientais da fonte poluidora (SALOMON e LORA, 2005; COSTA *et al.*, 2016).

Salomon e Lora (2005) realizaram o levantamento do potencial de geração de biogás por meio dos resíduos sólidos urbanos, esgotos domésticos, vinhaça e resíduos animais derivados de suínos e bovinos. Os resultados encontrados pelos autores indicam que o potencial de geração de

energia elétrica aproveitando o biogás proveniente do somatório das fontes citadas no ano de 2005 era suficiente para suprir a demanda de energia de aproximadamente 1.100 MW próximo as unidades de geração, além de preservar os recursos naturais não-renováveis.

Existem 29 usinas que geram energia elétrica aproveitando biogás na matriz energética nacional, que juntas somam um total de 119 MW de potência instalada. No entanto, estas usinas representam apenas 0,1% do total de energia elétrica gerada no país (MME, 2017). A maioria dos projetos existentes para geração de energia aproveitam o biogás proveniente de aterros sanitários como, por exemplo, o Projeto de Gás de Aterro em Energia Bandeirantes e o Projeto de Gás de Aterro em Energia de São João, ambos situados em São Paulo, que produzem, respectivamente, 135.000 m³ de biogás e 755.700 MWh, e 15.000 m³ de biogás e 476.900 MWh por ano. Outros exemplos de aproveitamento de gás de aterro ocorrem nos estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte e Santa Catarina (SENAI, 2016).

Além dos aterros sanitários, algumas granjas e abatedouros também geram energia elétrica aproveitando o biogás proveniente de seus resíduos. A Granja de Suínos São Pedro Colombari localizada em São Miguel do Iguçu - PR, produz em média 53 m³ de dejetos por dia, quantidade esta capaz de gerar 750 m³ de biogás por dia, e gerar aproximadamente 1 MWh/dia de energia elétrica. Já o abatedouro de aves da Cooperativa LAR tem capacidade para abater 270 mil aves por dia, o que gera aproximadamente 960 m³ de efluentes industriais por dia. Este montante é capaz de produzir 1.700 m³ de biogás diariamente e alimentar um grupo motor gerador de 250 kVA de potência instalada (BLEY JR., 2015).

Com relação a viabilidade econômica dos projetos que aproveitam o biogás para gerar energia elétrica, a maior parte dos estudos encontrados na literatura analisam tal viabilidade aplicando métodos determinísticos com abordagens econômicas simplificadas. Pecora (2006) avalia o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento do esgoto do Conjunto Residencial da USP (CRUSP). A autora aborda aspectos técnicos, ambientais e econômicos com o intuito de comparar a eficiência da geração de energia elétrica usando uma microturbina e um grupo motor gerador (ciclo Otto). A análise determinística do Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa descontados indicou que a implantação do grupo motor gerador é mais viável quando comparada com implantação da microturbina.

Granato (2003) avalia o potencial de geração de energia elétrica proveniente da queima do biogás produzido pela biodigestão anaeróbica da vinhaça. A análise foi realizada considerando os dados históricos referentes à produção de álcool e de vinhaça de doze safras de uma usina sucroalcooleira localizada no Oeste do Estado de São Paulo, cuja capacidade de produção de álcool é de 600 m³ por dia. Para a usina em análise, o autor concluiu que o potencial de geração de energia elétrica por meio do biogás é de 971 MWh por safra, que representa 5,75% do total de energia consumida.

Szymanski *et al.* (2010) dimensionam o sistema de biodigestão anaeróbica para a vinhaça com o objetivo de analisar a aplicabilidade do sistema, bem como do aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica e obtenção de crédito de carbono em uma empresa do setor sucroalcooleiro localizada no estado do Paraná. O sistema de biodigestão proposto mostrou-se uma opção economicamente atrativa para o aproveitamento e tratamento da vinhaça, sendo que o biogás com potencial energético considerável é fundamental para obtenção de créditos de carbono.

Rodrigues *et al.* (2012) estimam o potencial energético, empregando relações existentes na literatura e dados históricos da produção de álcool das safras de 2004 a 2010, de uma usina no Noroeste do estado do Paraná. Os autores concluem que o potencial de geração de energia elétrica a partir da queima do biogás obtido no processo de biodigestão anaeróbica da vinhaça, por meio de um reator anaeróbico, é grande podendo suprir parte da demanda energética da empresa.

Gehring (2014) dimensiona os equipamentos do processo de biodigestão da vinhaça e de geração de energia elétrica aproveitando biogás, além de apresentar a análise determinística da viabilidade do projeto com base nos dados de investimentos e custos de operação e manutenção do sistema. Já Sousa (2014) elabora um simulador de dimensionamento do reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), o mais empregado no processo de biodigestão anaeróbica para conversão de vinhaça em biogás, para auxiliar as unidades sucroalcooleiras na tomada de decisão de investimento deste modelo de aproveitamento da vinhaça para a geração de energia elétrica.

Com o objetivo de comparar a viabilidade econômica, impactos ambientais e custo de diferentes alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético da vinhaça, Poveda (2014) apresenta cinco alternativas que representam as tecnologias mais empregadas, sendo essas: fertirrigação,

concentração, biodigestão, incineração com produção de energia elétrica e a combinação da biodigestão com a concentração e com o uso veicular do biogás. O autor conclui que a biodigestão com concentração apresentou-se vantajosa em relação aos demais.

Moraes *et al.* (2014) abordam a necessidade de adequação ambiental dos resíduos gerados nas usinas sucroalcooleiras no Brasil. No estudo é analisado o potencial energético e levantado os aspectos ambientais e econômicos do uso da vinhaça para a produção de biogás e energia. Os autores citam que a usina traria mais lucros com o uso do biogás quando comparado com a fertirrigação, pois poderia substituir até 40% do diesel nas operações agrícolas da usina e ainda fornecer aproximadamente 14 MWh anualmente a partir da cogeração, e principalmente diminuir as emissões de gases de efeito estufa.

Moraes *et al.* (2015) apresentam o contexto da biodigestão anaeróbica da vinhaça proveniente da produção de etanol no Brasil e alternativas para o uso do biogás proveniente de tal processo. Os autores abordam também os principais obstáculos para implementar o sistema, bem como as vantagens ambientais e energéticas do mesmo.

Fuess e Zaiat (2017) buscam identificar, com base em abordagem técnica econômica, os principais fatores que afetam o desempenho econômico do processo de biodigestão anaeróbica da vinhaça em usinas sucroalcooleiras. Os autores concluem que é de suma importância que o governo crie políticas públicas no intuito de incentivar a implementação de biodigestores nesse setor, devido ao alto custo do investimento inicial.

Micunski *et al.* (2014) avaliam, por meio da viabilidade técnica e econômica, a aproveitamento do biogás proveniente da biodigestão vinhaça para implantação de uma planta de 3 MW. Os autores empregam métodos determinísticos baseado nos critérios da Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e *Payback* Descontado para realizar a análise de viabilidade econômica de dois cenários, a saber: i) a obtenção de receitas oriundas da venda da energia elétrica para a concessionária local e, ii) receitas oriundas do custo evitado com a compra da energia (consumo próprio). Ambos os cenários se mostraram economicamente viáveis.

São poucos os trabalhos desenvolvidos que abordam análise de risco para geração de energia elétrica proveniente do biogás. Nagaoka *et al.* (2007) analisam a viabilidade econômica, por meio do método de simulação de Monte Carlo, de um projeto de investimento em cogeração de energia elétrica, para autoconsumo e venda de excedentes, a partir da queima de 3 toneladas de

bagaço da cana para geração de 1MW em uma usina sucroalcooleira de médio porte localizada na região oeste do estado de São Paulo. Os indicadores VPL, TIR, Relação Custo-Benefício (RCB), *Payback* Simples e *Payback* Descontado indicam que o projeto só é viável quando o investimento inicial é realizado com financiamento.

Mendes (2007) propôs uma avaliação econômico-financeira levando-se em consideração a flexibilidade operacional, com o auxílio da Teoria das Opções Reais. O autor utilizou um modelo de reversão a média para modelar o Preço de Liquidação de Diferenças (PLD), que corresponde ao preço da energia elétrica negociada no mercado *spot*¹. Os resultados do estudo apresentam que quanto maior o nível de contratação de energia menor a exposição às incertezas do mercado *spot*. Sendo assim, aponta que o nível de contratação em que o risco é mínimo ocorre quando 85% de energia é contratada.

Pinto (2009) apresenta uma aplicação do processo de reversão a média para prever o preço de venda do açúcar e etanol produzido em uma agroindústria sucroenergética, juntamente com flexibilidade de produção entre os dois produtos com base na Teoria das Opções Reais. A estimação dos parâmetros dos modelos das variáveis aleatórias é realizada a partir das séries temporais referentes do preço do açúcar e do etanol deflacionadas, pois elas apresentam maior precisão em relação às séries temporais com inflação.

Pessoa (2011) aplica o modelo de reversão a média com saltos de Poisson juntamente com o método de simulação de Monte Carlo para analisar quando é mais eficiente produzir açúcar ou etanol. Tal modelo foi escolhido devido ao preço desses produtos sofrerem variações bruscas em intervalos curtos de tempo. A autora conclui que a opção de conversão, ou flexibilidade de operação, pode obter ganhos maiores quando comparado com uma planta dedicada a apenas um dos produtos, pois a flexibilidade da planta agrega valor ao usineiro.

Com o objetivo de verificar viabilidade econômico-financeira de armazenamento do biogás gerado a partir da biomassa de origem suína em uma granja da região Sul do Brasil, Fernandes *et al.* (2014) analisaram, com base no método de Opções Reais, a flexibilidade de adiar a venda imediata da energia elétrica no mercado *spot* para armazená-la sob a forma de gás e vendê-la futuramente. Além disso, com base nas séries históricas de preços semanais do PLD foram

¹ Mercado de curto prazo com pagamento à vista e entrega imediata. O preço *spot* é único e sua definição depende das condições de oferta e procura do mercado, sendo definido pelo Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).

estimados os parâmetros da variável aleatória, modelada por meio do modelo geométrico browniano. Os resultados apontam que a opção de armazenamento agrega valor para a produção de energia a partir de biomassa suína.

Costa *et al.* (2016) apresentam uma metodologia para análise de risco fundamentada nos processos estocásticos de reversão a média associados ao método de simulação de Monte Carlo para modelar as variáveis aleatórias que afetam o fluxo de caixa de um projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em aterro sanitário localizado na região Centro-Oeste do Brasil. Os resultados encontrados concluem que a maior produção de biogás ocorre próximo ao fechamento do aterro, e a análise de risco realizada mostra que o projeto é viável economicamente, pois o VPL é maior que zero e o período para retorno do investimento é de aproximadamente 12 anos, menor que sua vida útil.

Admite-se que a análise de viabilidade de projetos de investimento é imprescindível quando se trata do aproveitamento de resíduos para a geração de biogás, pois nenhuma empresa ou organização assume riscos que não possam arcar ou que porventura não tragam benefícios favoráveis a ela. A maioria dos projetos aplica metodologias determinísticas, o que torna a análise de viabilidade não abrangente. A análise de risco considera as variáveis aleatórias envolvidas no processo, oferecendo uma abordagem ampla e informações de risco para suporte à tomada de decisão.

Portanto, no atual cenário em que se encontra o setor elétrico brasileiro, torna-se importante conhecer os tipos de riscos envolvidos nos projetos de geração de energia distribuída, buscando projetá-los no tempo para evitar situações adversas no futuro.

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a indústria da cana-de-açúcar é composta por 373 usinas em operação no Brasil. Juntas, essas usinas moeram 651.841 mil toneladas de cana de açúcar na safra de 2016/2017, o que resultou na produção de 38.734 mil toneladas de açúcar e 27.254 mil m³ de etanol (UNICA, 2017). Além de maior produtor de cana-de-açúcar o Brasil é considerado também como maior produtor mundial de açúcar e segundo maior produtor de etanol.

As condições climáticas brasileiras permitem a produção de cana-de-açúcar nas regiões Centro-Sul, entre os meses de abril e novembro, e Nordeste, entre setembro a março, possibilitando que o país produza etanol e açúcar durante todo o ano. É importante ressaltar que a produção e

processamento da cana-de-açúcar são exclusivamente realizados pelo setor privado, sendo que o estado de São Paulo é responsável por produzir em torno de 60% de toda a cana, açúcar e etanol do país (NOVA CANA, 2017).

No estado de Goiás existem 39 usinas, e segundo o Sindicato da Indústria de Fabricação de Etanol do Estado de Goiás (SIFAEG) o desempenho do setor sucroenergético na safra 2016/2017 atingiu 4,3 mil milhões de litros de etanol (SIFAEG, 2017). Considerando que cada litro de etanol produzido gera em torno de 10 litros de vinhaça, o montante deste resíduo pode chegar a mais de 43 mil milhões de litros.

Desta forma, este estudo se justifica pela necessidade de uma análise de viabilidade econômica ampla que contemple aspectos de riscos físicos e financeiros e técnicas aprimoradas de análise de investimento, de forma a servir como instrumento de suporte e de planejamento para o aproveitamento dos resíduos da agroindústria sucroenergética.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver uma metodologia de análise de risco de investimentos em geração de energia elétrica a partir do aproveitamento energético do biogás oriundo da biodigestão da vinhaça produzida em agroindústrias sucroenergéticas.

1.2 Objetivos Específicos

- Obter os dados históricos das variáveis aleatórias quantidade de etanol produzido e PLD;
- Levantar as principais características da vinhaça com o intuito de conhecer a composição e a concentração do resíduo;
- Modelar as variáveis aleatórias quantidade de etanol e vinhaça produzidos e PLD a partir de processos estocásticos para geração de cenários (séries sintéticas);
- Dimensionar o reator para a quantidade de vinhaça estimada;
- Estimar o potencial de produção de biogás e de geração de energia elétrica proveniente da biodigestão anaeróbica da vinhaça para cada cenário;
- Quantificar os investimentos necessários para implementação do sistema e as receitas provenientes da venda de energia elétrica para cada cenário;
- Obter o fluxo de caixa para cada cenário;

- Realizar a análise de viabilidade econômica considerando as variáveis de risco envolvidas, utilizando-se as distribuições de probabilidade do VPL, da TIRM e do *Payback* Descontado;
- Realizar a análise de sensibilidade dos principais parâmetros que afetam na viabilidade econômica do projeto;
- Desenvolver o *software* para análise de risco proposta.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo - 2 trata do referencial teórico aproveitado como base para o desenvolvimento da dissertação. É descrito o processo de produção de etanol e açúcar e os resíduos gerados nas indústrias sucroenergéticas; as características do biogás; os sistemas anaeróbicos empregados para o tratamento dos resíduos; as tecnologias para gerar energia elétrica a partir do biogás; os principais aspectos do mercado de energia elétrica brasileiro e as formas de comercialização existentes; os processos estocásticos e os modelos que serão base para a modelagem das variáveis aleatórias; e os testes empregados para validação dos mesmos.

O Capítulo 3 – Metodologia, apresenta as modelagens matemáticas desenvolvidas para análise de risco das variáveis aleatórias e para o fluxo de caixa; os testes aplicados para a validação dos modelos; o método de dimensionamento do sistema anaeróbico, no caso Reator UASB; os métodos de avaliação de investimento, contemplando os principais indicadores econômicos; e a análise de sensibilidade dos principais parâmetros que afetam o fluxo de caixa e a viabilidade econômica do projeto.

O Capítulo 4 – Resultados, contempla os resultados do trabalho. Inicialmente, apresenta-se os dados históricos das variáveis aleatórias em análise, produção de etanol e PLD; os resultados dos testes estatísticos; os índices de sazonalidade; a validação dos modelos; as séries sintéticas da vinhaça, do biogás e da energia elétrica gerada; as distribuições de probabilidade dos indicadores econômicos; e a análise de sensibilidade dos principais parâmetros que afetam a viabilidade econômica do projeto.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, onde são expostas algumas discussões sobre os resultados, além de propostas para trabalhos futuros e as publicações realizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Processo de Produção de Etanol e Açúcar

Para a indústria sucroenergética a cana-de-açúcar é composta basicamente por fibra, material insolúvel em água, e o caldo, matéria-prima, composto por todos os componentes solúveis, como os açúcares, as cinzas, materiais nitrogenados e outros (CORRÊA NETO, 2001; NOGUEIRA e GARCIA, 2013).

Para melhor compreensão a Figura 2.1 apresenta de forma simplificada o processo de produção de etanol e açúcar, e quais as etapas do processo que geram resíduos.

Nota-se na Figura 2.1 que o processo de produção de etanol e açúcar a partir da cana-de-açúcar é idêntico nas etapas iniciais, que são: colheita, manuseio da matéria-prima, extração, filtração e tratamento do caldo (VILELA, 2013).

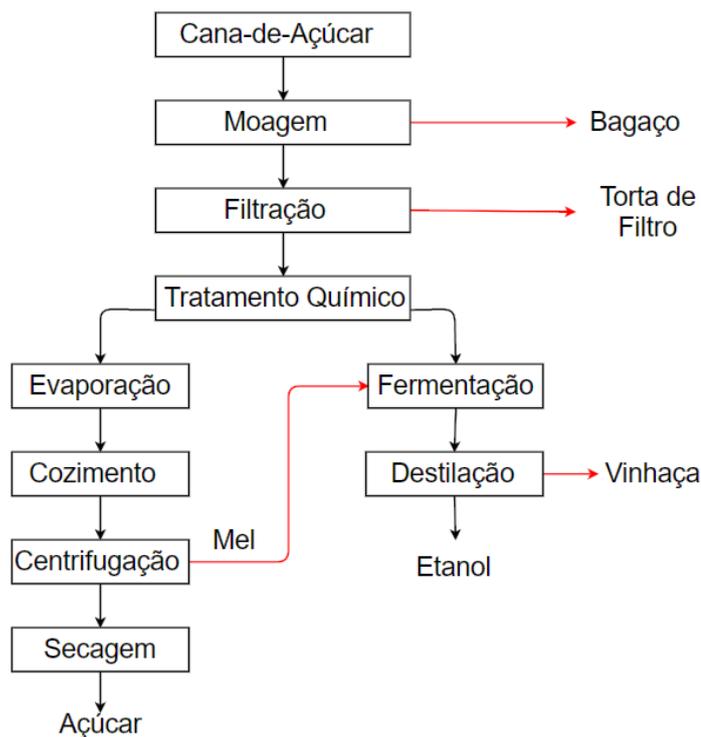


Figura 2.1 - Processo de produção do açúcar e do etanol.

Antes de chegar na usina ocorre o processo de colheita, no qual está incluso o corte, carregamento e suprimento uniforme e contínuo da matéria prima. A primeira etapa do processo na usina é a recepção da cana-de-açúcar, momento em que ocorre também a lavagem para retirar

as impurezas. Em seguida é adicionada água, para facilitar o processo, e realizada a extração do caldo nas moendas (unidades esmagadoras).

O caldo extraído passa por um tratamento de filtração com intuito de retirar as impurezas insolúveis, como minerais e vegetais em suspensão. Já as impurezas solúveis são removidas do caldo através do tratamento químico.

O caldo tratado pode seguir para processos distintos. O caldo destinado à produção de açúcar é enviado para evaporação, com o objetivo de remover em torno de 75% da água para elevar a concentração do mesmo, que neste momento passa a ser denominado como xarope. O xarope segue para o cozimento para retirar o excesso de água existente e recuperar a sacarose, resultando em uma massa cozida. Esta massa segue para a centrifugação e lavagem com a água quente, e por fim passa pelo processo de secagem, obtendo-se o açúcar.

Já na produção de etanol, o caldo é enviado para a fermentação, onde ocorre a conversão de açúcares em etanol dentro de dornas (tanques) com o auxílio de leveduras e microrganismos unicelulares produzindo o vinho fermentado. O próximo passo do processo é a destilação onde ocorre a purificação, e a separação do vinho do etanol.

É importante ressaltar que durante o processo de produção de açúcar e etanol gera-se uma quantidade significativa de subprodutos, os quais eram considerados como resíduos a serem eliminados. Atualmente a grande maioria destes resíduos é aproveitada para reduzir custos ou obter receitas.

2.1.1 Subprodutos Gerados no Processo de Produção de Etanol e Açúcar

Segundo Rego e Hernandez (2006) a cana-de-açúcar pode ir além da produção de etanol e açúcar, pois todos seus subprodutos podem ser aproveitados. Para Granato (2003) essas agroindústrias podem produzir energia elétrica contribuindo com a matriz energética do país.

Na Figura 2.1 são apresentados também os principais subprodutos gerados no processo de produção de etanol e do açúcar nas agroindústrias sucroenergéticas. Antes mesmo de chegar na usina tem-se a biomassa proveniente da colheita da cana-de-açúcar, composta pelas folhas e os ponteiros da mesma.

No início do processo, durante a moagem, caracterizado como um subproduto sólido da extração do caldo, tem-se o bagaço, que atualmente é aproveitado em sistemas de aquecimento e na cogeração de energia dentro das usinas, e o excedente, em alguns casos comercializado (NOGUEIRA e GARCIA, 2013). No procedimento de filtração tem-se a torta de filtro, subproduto que contém as impurezas insolúveis retiradas do caldo, que é aplicada como fertilizante orgânico nos canaviais para aumentar o teor de matéria orgânica e condicionar o solo.

Na produção de açúcar é gerado o subproduto mel, o qual é destinado para produção de etanol juntamente com a parte do caldo destinado para tal. Na produção de etanol, durante o processo de destilação, é gerada a vinhaça que é um subproduto líquido resultante da destilação do vinho (SOUSA, 2014; ARAUJO, 2017).

Segundo deliberação normativa nº 164, de 30 de março de 2011 do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) a vinhaça é definida como “efluente líquido da destilação de uma solução alcoólica denominada vinho, obtida no processo de fermentação do caldo de cana-de-açúcar, do melaço ou da mistura dos dois”.

A NBR 10004 considera a vinhaça como um resíduo sólido com altíssimo potencial poluidor devido ao alto teor de matéria orgânica, o qual impossibilita o tratamento convencional para descarte em corpos de água (ABNT, 2004). Além da grande quantidade de matéria orgânica e da temperatura elevada, a vinhaça apresenta altas concentrações de sólido (2,5% em média), nitrogênio, micronutrientes e potássio, os quais são importantes para o solo agrícola e desta forma este resíduo pode ser empregado na substituição de fertilizantes (ELIA NETO, 2016; SOCCOL, BRAR, *et al.*, 2016). A Tabela 2.1 apresenta as principais características da vinhaça.

Antes dos anos 60, a vinhaça era lançada diretamente nos cursos d'água, o que causava sérios problemas de contaminação das águas superficiais. Porém, em 1976, foi proibido tal forma de despejo, sendo ele direto ou indireto, em qualquer coleção hídrica. A solução encontrada na época foi de manter uma área de sacrifício, local onde não se cultivava a cana-de-açúcar, apenas despejava a vinhaça (VIANA, 2006; ELIA NETO, 2016).

Após análises e estudos compreendeu-se que a vinhaça poderia ser aproveitada, com dosagens controladas, para a fertirrigação do solo, separada ou conjuntamente com as águas residuárias (lavagem de pisos, purgas de circuitos fechados, sobra de condensados e outros). Tal dosagem de aplicação varia de acordo com o tipo de solo e as variedades de cana, pois é necessário o

cuidado em relação ao risco de salinização do solo e de lixiviação², contaminando a água subterrânea (POVEDA, 2014; GEHRING, 2014).

Tabela 2.1 - Características da vinhaça.

Parâmetro (Unidade)	Valor
pH	4,2 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100
DBO (mg/l O ₂)	16.500 – 19.800
DQO (mg/l O ₂)	45.000
Sólidos totais (mg/l)	52.700
Nitrogênio (mg/l N)	480 – 710
Fósforo (mg/l P ₂ O ₅)	9 – 200
Potássio (mg/l K ₂ O)	3.340 – 4.600
Cálcio (mg/l CaO)	1.330 – 4.570
Magnésio (mg/l MgO)	580–700
Sulfato (mg/l SO ₄)	3.700 – 3730

Fonte: Cortez e Freire, 1996.

A vinhaça como fertilizante aumenta a produção e diminui a utilização de fertilizante. Entretanto, trata-se de uma forma de destinação limitada, pois o custo com transporte faz com que este resíduo seja despejado em áreas mais próximas da usina, podendo levar à contaminação das águas subterrâneas, além de odores e proliferação de insetos (SALOMON e LORA, 2005; SILVA, GRIEBELER e BORGES, 2007; SOUSA, 2014)

Trata-se de um subproduto com oferta sazonal, e este motivo deve ser levado em consideração quando existe a necessidade de disponibilidade contínua do resíduo, principalmente para aplicações energéticas (CORRÊA NETO, 2001).

Atualmente vários estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de realizar a biodigestão anaeróbica da vinhaça, uma maneira de tratar o resíduo. Neste processo, gera-se o biogás, rico em metano, que pode ser empregado para gerar energia elétrica por meio de sua queima. Tem-se também um efluente final biodigerido com características nutricionais adequadas para a fertirrigação, pois mantém seu valor nutritivo como adubação orgânica e rico em potássio (SZYMANSKI, BALBINOT e SCHIRMER, 2010; SOUSA, 2014).

² Extração ou solubilização dos constituintes químicos do solo pela ação de um fluido percolante.

2.2 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa e inflamável resultante da fermentação da matéria orgânica presente nos resíduos gerados pela atividade humana, indústrias e agroindústrias (PECORA, 2006). A concentração de cada componente que compõe a mistura é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição do biogás.

Componente	% Volume
Metano (CH ₄)	50 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 45
Água (H ₂ O)	2 – 7
Oxigênio (O ₂)	< 2
Nitrogênio (N ₂)	< 2
Hidrogênio (H ₂)	< 1

Fonte: Probiogás, p. 29, 2010.

No setor sucroenergético o biogás pode ser extraído da vinhaça mediante o processo de biodigestão anaeróbica. A quantidade de biogás que será produzido dependerá das características da vinhaça e da tecnologia empregada para realizar a biodigestão anaeróbica da mesma (GRANATO, 2003; SALOMON e LORA, 2005).

Quando a destinação final dos gases é para gerar energia é importante conhecer seu volume, seu poder calorífico e a sua umidade. O poder calorífico do biogás precisa ser analisado cuidadosamente, pois é ele quem define a quantidade de energia liberada pela combustão completa. O poder calorífico do biogás varia entre 4.780 e 6.000 kcal/m³, tal variação ocorre devido ao teor do metano, que pode chegar a 60%, e o grau de umidade do gás (SALOMON e LORA, 2005; MICUANSKI, 2014; TOLMASQUIM, 2016).

A biodigestão anaeróbica é um processo biológico, dividido em quatro estágios, que ocorre na ausência de oxigênio e gera como produto final o biogás. Tal processo é realizado por microrganismos que convertem a matéria orgânica numa mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio (PROBIOGÁS, 2010).

O primeiro estágio do processo é a hidrólise. Os compostos orgânicos complexos são fragmentados por enzimas dando origem à compostos orgânicos simples como aminoácidos, ácidos

graxos e açúcares. Trata-se de um processo fundamental, pois somente com a quebra dos polímeros maiores é que começa o processo de biodigestão (PROBIOGÁS, 2010; CHERNICHARO, 2016).

Na acidogênese, segundo estágio do processo, os compostos resultantes da hidrólise são transformados por bactérias fermentativas em ácido de cadeia curta, hidrogênio e dióxido de carbono. É importante ressaltar que os compostos formados neste momento dependem da concentração de hidrogênio dissolvido na mistura, pois quando esta é muito alta o pH do composto baixo e o processo pode ser afetado (PROBIOGÁS, 2010; CHERNICHARO, 2016).

No terceiro estágio, denominado como acetogênese, ocorre o processo de formação do ácido acético, ou seja, o composto resultante da fase anterior é convertido por bactérias em precursores do biogás. Porém, é necessário manter o equilíbrio para que a quantidade de hidrogênio gerado seja consumida pelas bactérias responsáveis pela metanogênese (PROBIOGÁS, 2010; CHERNICHARO, 2016).

A metanogênese é o último estágio do processo de produção de biogás. Ocorre por diferentes grupos de bactérias, basicamente, por meio de duas reações, sendo que na primeira reação, ocorre a geração de metano e gás carbônico derivados do ácido acético, e na segunda o hidrogênio e o gás carbônico dão origem ao metano e a água.

O resíduo que será submetido ao processo de biodigestão anaeróbica deve ter suas principais características analisadas. A insuficiência de um dos fatores pode prejudicar totalmente o processo, devido este requerer um determinado tempo de retenção hidráulica³, sob condições ideais de temperatura e agitação. Desta forma, é necessário analisar os fatores que influenciam no tratamento anaeróbico, sendo eles: temperatura, pH, composição do efluente e agitação.

2.2.1 Temperatura

Para que o processo de biodigestão anaeróbica ocorra de forma eficiente é necessário que a temperatura da biomassa que alimentará o biodigestor esteja dentro da faixa de temperatura de operação. Abaixo de 15°C o processo é muito reduzido, e pode chegar até ser interrompido, já acima de 65°C as enzimas podem ser destruídas pelo calor. Desta forma, as faixas ideais de

³ Tempo que o efluente é retido no reator para que possam acontecer as reações biológicas na unidade de tratamento.

temperatura para que a produção de biogás ocorra de forma eficiente é de 32°C a 37°C (bactérias mesofílicas) e de 50°C a 60°C (bactérias termofílicas) (PINTO, 1999; PECORA, 2006; GEHRING, 2014; TOLMASQUIM, 2016).

Grande parte dos biodigestores atuam na faixa mesofílica, por não ser necessário o controle de temperatura. Porém a faixa termofílica, apresenta taxas de conversão maiores e, conseqüentemente menor tempo de permanência do resíduo no biodigestor, além disso os custos iniciais podem ser reduzidos devido o volume do biodigestor ser menor quando comparado com os biodigestores que atuam na faixa mesofílica (PINTO, 1999; CHERNICHARO, 2016).

2.2.2 pH

A acidez e alcalinidade são fatores de suma importância no processo de biodigestão anaeróbica para que os micro-organismos se mantenham em desenvolvimento. O pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8 para que a produção de metano se mantenha alta. Para elevar o pH, primeiramente a matéria orgânica é transformada em ácidos voláteis, aumentando a acidez e reduzindo o pH, posteriormente ocorre a transformação dos ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH (PINTO, 1999; PECORA, 2006; CHERNICHARO, 2016).

2.2.3 Composição do Efluente

A composição do resíduo é determinante para a produção de biogás. Quanto maior a porcentagem de matéria orgânica no resíduo, maior o potencial de produção de metano, o qual é diretamente proporcional à demanda química de oxigênio (DQO)⁴. Quanto maior for o DQO do resíduo, maior será o potencial de geração de metano, logo maior será a vazão de biogás (PECORA, 2006).

A principal vantagem da biodigestão anaeróbica é a diversidade de resíduos que podem ser submetidos a fermentação, pois as bactérias anaeróbicas se nutrem de toda a matéria orgânica (PINTO, 1999).

⁴ Avalia a quantidade de oxigênio dissolvido consumido em meio ácido que leva à degradação de matéria orgânica.

2.2.4 Agitação

A agitação é necessária para que ocorra um maior contato do resíduo com as bactérias, além da melhor distribuição do calor, maior uniformidade dos produtos resultantes do processo de biodigestão e evita a produção de crostas que podem prejudicar o funcionamento do biodigestor. Tal processo pode ser realizado por meio de mecanismos de acionamento direto com um eixo e hélice em contato com a biomassa ou pelo borbulhamento do biogás (PINTO, 1999).

2.3 Sistemas Anaeróbicos de Tratamento de Biomassa

A biodigestão anaeróbica pode ser reproduzida por meio de sistemas anaeróbicos, biodigestores e reatores. Os sistemas citados são formados por uma câmara fechada composta por uma entrada para o substrato a ser fermentado, material orgânico com carga elevada de diferentes fontes, tanto de origem industrial, quanto agroindustrial e doméstica, que representam riscos ao meio ambiente, e duas saídas, sendo uma para o gás e outra para o efluente produzido (SOUSA, 2014; BLEY JR., 2015).

Segundo Granato (2003) e Chernicharo (2016) as vantagens do processo anaeróbico são as seguintes:

- Baixa produção de sólidos;
- Baixa demanda de área;
- Pode ser aplicado em qualquer lugar e em pequena e grande escala;
- Tolera elevadas cargas orgânicas;
- Baixo custo de operação e manutenção.

Para o tratamento de efluentes líquidos, a biodigestão anaeróbia representa importante papel, pois além de permitir a redução significativa do potencial poluidor, permite a recuperação da energia na forma de biogás (PECORA, 2006).

São gerados dois produtos por meio dos sistemas anaeróbicos de tratamento de biomassa: um líquido, também chamado de digestato, efluente do processo que pode ser usado como fertilizante, e outro gasoso, o biogás (PECORA, 2006; GEHRING, 2014; BLEY JR., 2015; MICUANSKI, 2014).

Segundo Micuanski (2014) os sistemas de biodigestão podem ser classificados de acordo com o tipo de construção, modo de operação, forma de armazenamento do gás, forma de alimentação, temperatura de operação, se necessita ou não de agitação e de dispositivos para agregar a biomassa bacteriana. Porém, o principal quesito a ser analisado é em relação ao tipo de alimentação, se é contínua, quando a oferta de biomassa é diária ou periódica, ou semicontinua, quando a biomassa apresenta decomposição lenta. Neste caso, o sistema recebe a carga total, retendo-a até completar o processo de biodigestão.

Para dimensionar o sistema anaeróbico, biodigestor ou reator, deve-se considerar a natureza do resíduo, a vazão do efluente que será despejado no mesmo e o tempo de retenção que este deve permanecer no biodigestor. Para isso é necessário conhecer a carga orgânica volumétrica, a taxa de remoção da carga orgânica, a temperatura da biomassa e a concentração do substrato efluente (BLEY JR., 2015).

Os biodigestores anaeróbicos e as lagoas anaeróbicas suportam baixa taxa de carga orgânica na alimentação do sistema, além de não possuírem sistema de agitação. Já os reatores anaeróbicos suportam altas cargas orgânicas, operam com alimentação uniforme e, na maioria dos casos, possuem mecanismos de aquecimento e mistura (SENAI, 2016).

2.3.1 Biodigestores Anaeróbicos

Os principais modelos de biodigestores anaeróbicos são o modelo chinês e o modelo indiano, apresentados na Figura 2.2. Ambos devem ser alimentados diariamente e aceitam resíduos que contém no máximo 8% de sólidos totais (SENAI, 2016).

O biodigestor modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para fermentação, e teto impermeável, destinado a armazenar o biogás gerado durante o processo de biodigestão. Porém, caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada pode ocorrer o vazamento de biogás (PECORA, 2006). Ele apresenta baixo custo de construção, não possui partes metálicas, porém não é apropriado para acúmulo de biogás, ou seja, guarda pouco gás e por isso não é indicado para instalações de grande porte (SENAI, 2016).

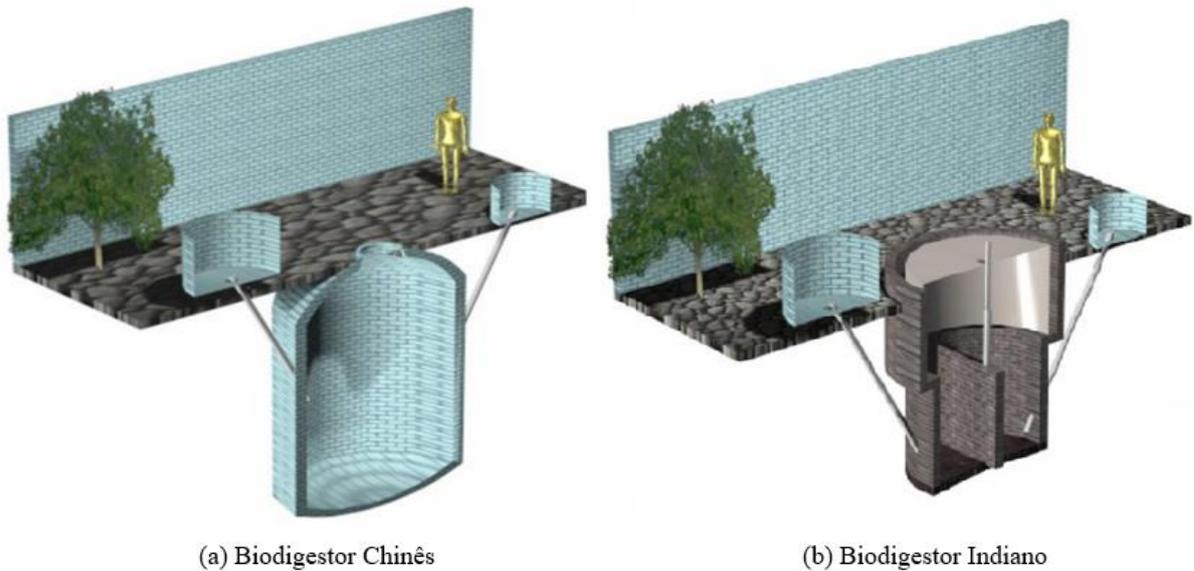


Figura 2.2 - Representação tridimensional em corte dos biodigestores chinês e indiano.
Fonte: Deganutti *et al.*(2002).

O biodigestor modelo indiano é o mais indicado para biodigestão de esterco bovino e/ou suínos, que apresentam uma certa regularidade no seu fornecimento. Caracterizado por ser de fácil construção, mas com o custo de manutenção e de construção elevado por possuir uma campânula como gasômetro. Tal campânula serve para manter a pressão de operação constante através do ajuste do gasômetro para a quantidade de volume de gás (SENAI, 2016).

2.3.2 Lagoas Anaeróbicas

Conhecido também por lagoa coberta ou tipo balão, os materiais construtivos empregados para esse tipo de sistema são: tijolo, cimento, pedra, areia e plástico. É indicado para solos não profundos e biomassa com até 5% de sólidos totais. O tempo de retenção hidráulico varia entre 6 a 30 dias, para cargas orgânicas de 1 a 2 kg DQO/m³ dia (SALOMON, 2007).

Tem como vantagem a maior produção de gás; mantém a pressão de gás constante; fácil limpeza, descarga e manutenção; facilidade de transporte; e baixo custo de produção e instalação. Porém apresenta algumas desvantagens, como: maior área exposta ao sol e menor durabilidade devido a sensibilidade a danos, como cortes (SENAI, 2016). A Figura 2.3 apresenta o esquema de uma lagoa anaeróbica.

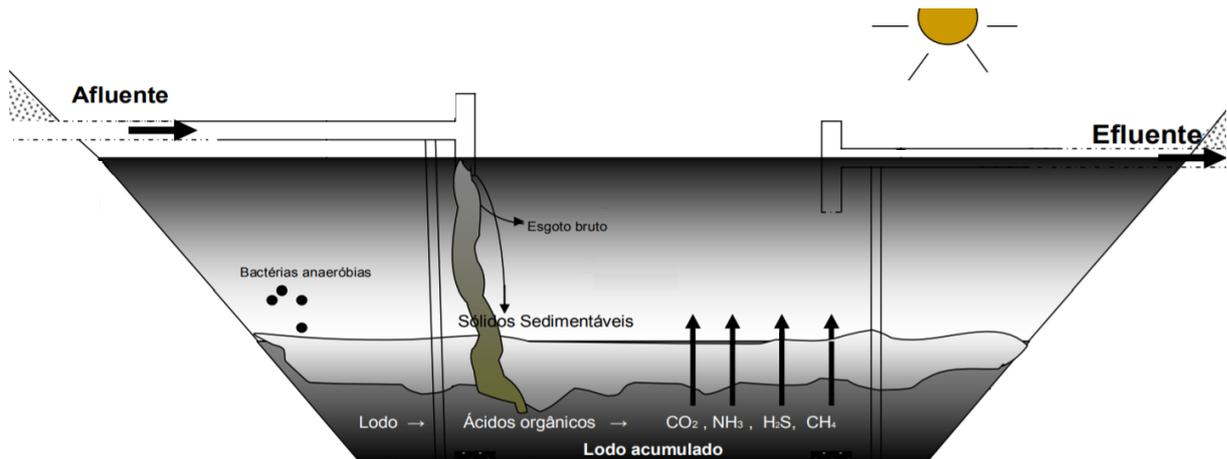


Figura 2.3 - Lagoa Anaeróbica.
Fonte: Silva Filho, 2007.

2.3.3 Reatores Anaeróbicos

É possível citar o Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA) ou *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), e o Reator de Manta de Lodo Granular, ou *Expanded Granular Sludge Blanket* (ESGB), como reatores que suportam altas taxas de cargas orgânica (PROBIOGÁS, 2015a; CHERNICHARO, 2016; ARAUJO, 2017). Esses reatores são empregados na fermentação úmida e alimentação constante, como é o caso de resíduos industriais, agroindustriais e estações de tratamentos de esgoto (SOUSA, 2014; SENAI, 2016).

O volume desses modelos é sensivelmente menor quando comparado a outros modelos. Apresenta grande eficiência devido a retenção do lodo ser por períodos longos (semanas, meses ou até mesmo anos), e o tempo de retenção hidráulica ser curto (horas) (PECORA, 2006; PROBIOGÁS, 2015b).

Com relação a agitação, esta pode ocorrer mediante a recirculação de gás e de lodo ou por meio de agitadores mecânicos (SENAI, 2016). A Figura 2.4 apresenta o desenho esquemático do reator UASB, reator mais adequado ao processo de biodigestão anaeróbica da vinhaça (SOUSA, 2014).

Observando a Figura 2.4 nota-se que o afluente entra pelo fundo do reator, por meio de tubos de alimentação, e passa em fluxo ascendente pela manta de lodo, onde ocorre o processo de biodigestão anaeróbica que produzirá o biogás. Um separador trifásico é instalado na parte superior do reator com o intuito de captar o biogás e reter os sólidos (SOUSA, 2014; CHERNICHARO, 2016).

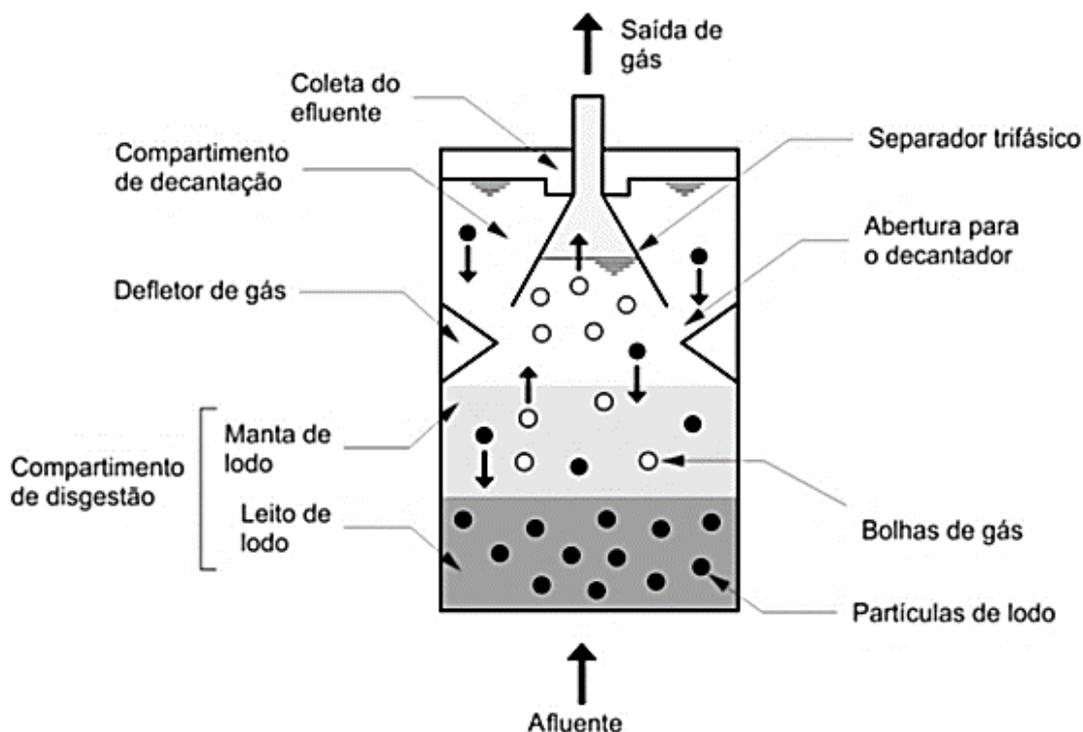


Figura 2.4 - Desenho esquemático do reator UASB.
Fonte: Sousa, p.25, 2014.

As principais vantagens do reator UASB é baixo custo de implantação e operação, baixo consumo de energia, maior estabilidade do processo, capacidade de remover de 60 a 80% da carga orgânica sem o uso de energia, produção de biogás, rápida partida e elevada concentração de lodo excedente (SALOMON, 2007; PROBIOGÁS, 2015b).

2.4 Tecnologias de Aproveitamento do Biogás

A energia química contida no biogás é convertida em energia mecânica através de um processo de combustão controlada, a qual posteriormente ativa um gerador que a converte em energia elétrica (PECORA, 2006; CENBIO, 2007; PROBIOGÁS, 2015a).

O Grupo Motor Gerador é composto por um motor de combustão interna acoplado a um gerador elétrico. Os motores mais empregados são de Ciclo Otto e os motores *Stirling*. O primeiro aceita biogás composto por mais de 45% de metano. A potência elétrica pode chegar a 2 MW com grau de eficiência de 18 a 45%. Já os motores *Stirling* operam com um gás de qualidade inferior e a potência elétrica pode chegar a 1,4 MW com eficiência de 15 a 35% (PROBIOGÁS, 2015a; TOLMASQUIM, 2016).

As principais tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás são as microturbinas e turbinas a gás, turbinas a vapor, motores *Stirling* e motores de Ciclo Otto, as quais serão descritas nas seções a seguir.

2.4.1 Microturbinas e Turbinas a Gás

As microturbinas e as turbinas a gás são compostas por um compressor de ar, uma câmara de combustão e a turbina, sendo que o compressor é acionado pela própria turbina. As eficiências dessa tecnologia podem chegar a 30% (STACH e MEDEIROS, 2017; ARAUJO, 2017).

A principal diferença entre as microturbinas e as turbinas a gás é a capacidade elétrica, sendo que nas microturbinas as turbinas à gás possuem capacidade elétrica entre 25 e 200 kW, e as turbinas à gás apresentam capacidade elétrica superior a 200 kW (SALOMON, 2007; PROBIOGÁS, 2010).

As microturbinas são caracterizadas como pequenas turbinas de combustão com elevadas velocidades de rotação e aceitam diversos tipos de combustível, como gás natural, biogás, GLP (gás liquefeito de petróleo), gás de poços de petróleo e plataformas offshore, diesel e querosene, sendo que esses podem apresentar baixo conteúdo de metano sem afetar a eficiência do processo (SALES, ANDRADE e LORA, 2005; STACH e MEDEIROS, 2017).

As microturbinas são do tipo radial, operam com velocidade de rotação nominal e possuem mancais suspensos a ar. O princípio de funcionamento da microturbina é baseado no ciclo *Brayton*⁵, o ar nesse modelo de tecnologia é aspirado e forçado para o interior da turbina a alta velocidade e alta pressão, o qual é misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão, processo este controlado para que seja obtida a máxima eficiência e baixos níveis de emissão (SALES, ANDRADE e LORA, 2005; PECORA, 2006).

2.4.2 Turbinas a Vapor

As turbinas a vapor são baseadas no Ciclo de *Rankine* e classificadas como motores de combustão externa, ou seja, a combustão não ocorre onde a energia mecânica é gerada. A combustão ocorre dentro de uma caldeira aquecendo o fluido nas tubulações até que este se transforme em

⁵ É um ciclo termodinâmico no qual a adição de calor ocorre à pressão constante nas turbinas a gás. Trata-se de um ciclo ideal, uma aproximação dos processos térmicos descrevendo variações de estado (pressão e temperatura) dos gases.

vapor. Tal vapor em alta pressão e alta temperatura faz com que as palhetas da turbina se movimentem transformando esta energia em energia mecânica (GEHRING, 2014; ARAUJO, 2017).

A potência elétrica desta tecnologia pode chegar a 1200 MW. A eficiência elétrica é de aproximadamente 35%. Entre as vantagens deste tipo de tecnologia é possível citar o emprego de vapor a alta pressão e alta temperatura; alta velocidade de rotação, alta relação potência/tamanho e opera com pouca vibração (CTGÁS, 2009).

2.4.3 Motor *Stirling*

O motor *Stirling*⁶ é classificado como motor de ar quente ou expansão, ou seja, o pistão é movido pela expansão de um gás encapsulado, o qual é dilatado através da entrada de calor de uma fonte externa. A eficiência desta tecnologia depende da temperatura do gás, variando entre 15% e 35% (SALES, ANDRADE e LORA, 2005).

A vantagem deste motor é a baixa emissão de ruídos e poluente, pouca manutenção e baixo custo. Aceita qualquer fonte que forneça calor para seu acionamento, desde combustíveis fósseis até biogás de qualidade inferior (baixa concentração de metano), sem a necessidade de resfriar e tratar o gás. Porém, a potência do motor *Stirling* é abaixo de 100 kW (PROBIOGÁS, 2010; ARAUJO, 2017).

2.4.4 Motores de Ciclo Otto

Os motores de Ciclo Otto⁷ aceitam combustíveis gasosos, como gás natural, propano e biogás, e combustíveis líquidos, como gasolina, álcool, etc., porém, exigem que o gás possua um teor mínimo de metano de 45%, sendo que teores menores podem levar a parada do motor (SALOMON, 2007; GEHRING, 2014).

⁶ É um ciclo termodinâmico reversível que funciona convertendo calor em trabalho. O calor é fornecido à caldeira por uma fonte de calor externa, geralmente com água como fluido operante.

⁷ É um ciclo termodinâmico idealizado que descreve o funcionamento de um típico motor de pistão de ignição com faísca.

O rendimento desses motores é função apenas da relação de compressão. Sua eficiência está entre 18 e 45%, sendo que tal eficiência não possui grande sensibilidade em condições a temperatura, pressão e umidade, quando comparado com as turbinas a gás (SALOMON, 2007).

Podem ser empregados para pequenas e médias demandas elétricas, variando de centenas de kW até dezenas de MW. São usados para geração de energia elétrica, pelo acoplamento de um gerador ao motor, e também para gerar energia mecânica, por meio do acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo (PECORA, 2006).

O motor de Ciclo Otto, devido o rendimento elétrico e custo baixo é o mais empregado em sistemas onde combustível é o biogás (STACH e MEDEIROS, 2017; ARAUJO, 2017).

2.5 Mercado de Energia Elétrica Brasileiro

Existem diferentes formas de amortizar os investimentos empregados para o tratamento de resíduos e a geração de energia elétrica a partir do biogás. Uma delas é o suprimento da demanda própria, ou seja, o auto abastecimento minimizando os gastos com a compra de energia elétrica da concessionária. Outra possibilidade é por meio das receitas obtidas pela venda da energia elétrica excedente através da conexão com a rede de distribuição (BLEY JR., 2015).

A Resolução Normativa nº 482/2012, alterada pela Resolução Normativa nº 687/2015, estabelece as condições gerais para o acesso de micro⁸ e minigeração⁹ distribuída aos sistemas de distribuição, e o sistema de compensação de energia elétrica¹⁰. No qual a diferença positiva entre a energia injetada e a consumida é injetada na rede de distribuição gerando um crédito com validade de 60 meses.

No Brasil, em 2004, foi criado pelo Governo Federal o Novo Modelo do Setor Elétrico, passando a vigorar a comercialização de energia elétrica em dois ambientes, o Ambiente de Contratação Livre (ACL) composto pelos consumidores livres e especiais, e o Ambiente de

⁸ Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

⁹ Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

¹⁰ Sistema no qual a energia injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica nesta mesma unidade consumidora.

Contratação Regulado (ACR), que compreende consumidores cativos (CCEE, 2017). A Figura 2.5 apresenta o modelo do mercado de Energia Elétrica Brasileiro.

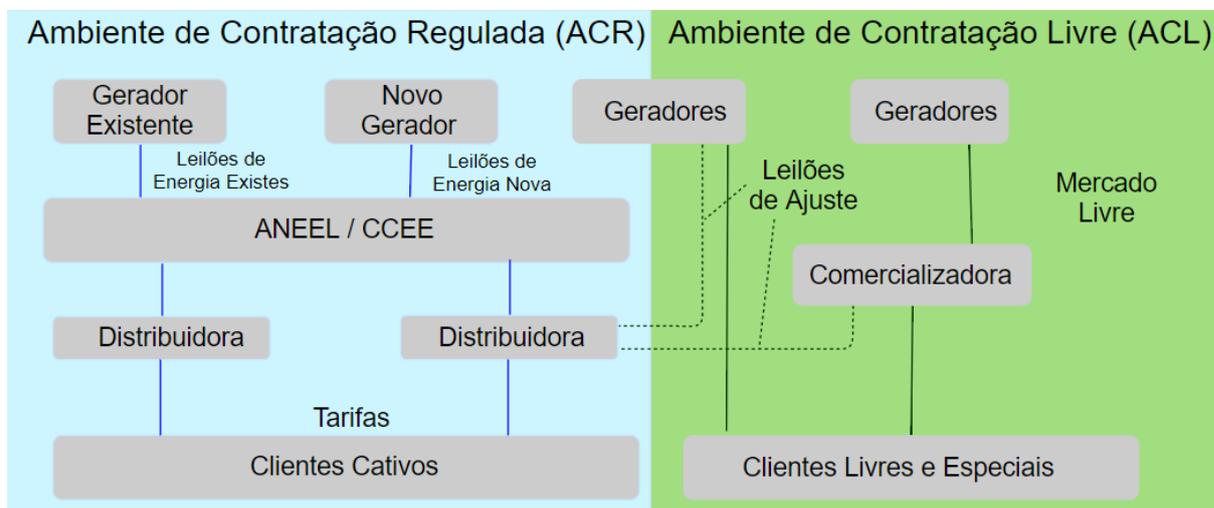


Figura 2.5 - Mercado de energia elétrica brasileiro.

Em ambos os ambientes, os contratos de compra e venda de energia elétrica devem ser registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Esse procedimento é necessário para contabilizar as diferenças entre os montantes gerados e os montantes contratados pelos agentes e consumidores de energia elétrica para posteriormente determinar a liquidação financeira no Mercado de Curto Prazo e valorar ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) (CCEE, 2017).

O Ministério de Minas e Energia (MME) publicou no final de fevereiro de 2018, por intermédio da Portaria N° 65, a atualização dos Valores Anuais de Referência Específicos (VRES) para os sistemas de geração distribuída, na qual é acrescentado o valor da energia proveniente do biogás, sendo o valor máximo permitido igual a 390 R\$/MWh. Tal portaria incluiu nas chamadas públicas de geração distribuída as usinas com cogeração de energia elétrica proveniente de biomassa. Para o setor sucroalcooleiro a inclusão desta forma de comercialização se mostra vantajosa, pois permite a venda direta às distribuidoras.

2.5.1 Ambiente de Contratação Regulado

No Ambiente de Contratação Regulado (ACR) a venda de energia elétrica ocorre por meio de contratos decorrentes de leilões de energia elétrica realizados pela Câmara de Comercialização da Energia Elétrica (CCEE). Os consumidores deste ambiente são denominados consumidores

cativos, aqueles que compram a energia das concessionárias de distribuição às quais estão ligados. Esses clientes são protegidos por tarifas reguladas, ou seja, não são expostos a variações e altas tarifas. (CCEE, 2017).

A forma de contratação neste ambiente é mediante contrato bilateral denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR), sendo que os agentes vendedores e compradores devem participar de leilões de compra e venda de energia elétrica (CCEE, 2017).

2.5.2 Ambiente de Contratação Livre

O Ambiente de Contratação Livre (ACL) é composto por geradores, comercializadores e os consumidores livres e especiais, os quais possuem liberdade para negociar a compra de energia, estabelecendo volumes, preços e prazos de suprimento através de contratos bilaterais denominados de Contrato de Compra e Venda de Energia Elétrica no Ambiente de Contratação Livre (CCEAL), sendo que esses podem ser de longo prazo ou de curto prazo (CCEE, 2017).

Os consumidores livres podem comprar energia elétrica de qualquer fonte de energia, inclusive grandes hidrelétricas. Já os consumidores especiais devem possuir demanda de no mínimo 0,5 MW e podem comprar energia elétrica somente de fontes incentivadas, sendo elas solar, eólica e biomassa (CCEE, 2017).

No Brasil para valorar os montantes liquidados no mercado de curto prazo é aplicado o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). Este preço é calculado pela CCEE e tem como base o Custo Marginal de Operação (CMO), o qual representa o custo variável do recurso de geração mais caro despachado, quando esse ainda tem disponibilidade para abastecer o próximo aumento de carga (CCEE, 2018).

É importante ressaltar que o PLD apresenta características específicas, como: reversão a média a longo prazo, tendência de crescimento, volatilidade, sazonalidade, picos, imprevisibilidade, dentre outros (PINHEIRO NETO, 2017).

O PLD é determinado semanalmente considerando os limites máximos e mínimos determinados pela ANEEL, para cada um dos submercados (Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste, Norte).

2.6 Processos Estocásticos

Grande parte dos métodos de previsão estatística são baseados em dados históricos a partir de uma série temporal¹¹ que descreve o passado. Esses dados históricos apresentam traços que indicam como representar um modelo futuro (MORETTIN e TOLOI, 2006).

As séries podem apresentar componentes sazonais, as quais são notadas através de oscilações de subida e de queda e sempre ocorrem em um determinado período do ano, do mês, da semana, do dia ou horário (SILVA, 2010).

Os processos estocásticos são aplicados para modelar, com base em séries temporais, variáveis aleatórias. Esses processos buscam descrever a evolução probabilística do valor de uma variável no tempo (DOMINGUES, 2003; HILLIER e LIEBERMAN, 2006; MONTEIRO, 2013).

Definição: *Seja T um conjunto arbitrário. Um processo estocástico é uma família $Z = \{Z(t), t \in T\}$, tal que, para cada $t \in T$, $Z(t)$ é uma variável aleatória (MORETTIN e TOLOI, 2006).*

Um processo estocástico pode ser visto como uma família de variáveis aleatórias ou como uma família de séries temporais. A Figura 2.6 apresenta um exemplo de processo estocástico visto como uma família de variáveis aleatórias. Trata-se da evolução da função de densidade de probabilidade (FDP) da variável no tempo.

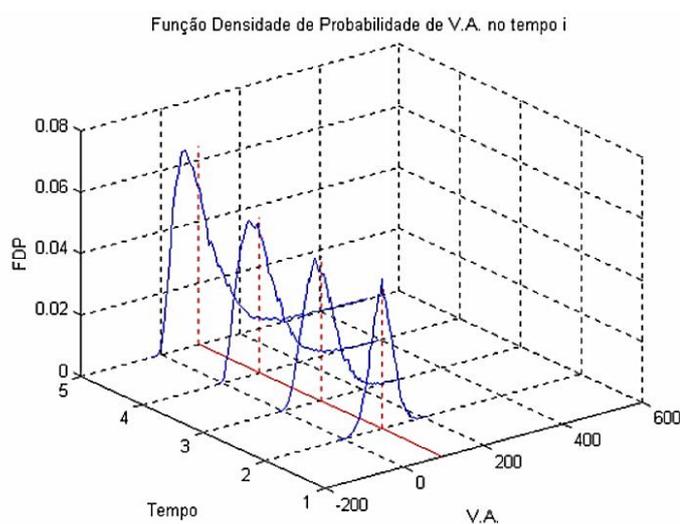


Figura 2.6 - Processo estocástico de uma família de variáveis aleatórias.
Fonte: Domingues, 2003, p.30.

¹¹ É uma sequência de realizações (observações) de uma variável ao longo do tempo.

2.6.1 Processo de Wiener

O processo de Wiener é descrito como um processo estocástico de tempo contínuo, conforme apresentado em (2.1) (DIXIT e PINDICK, 1994).

$$dz = \varepsilon \cdot \sqrt{dt} \quad (2.1)$$

Em (2.1), ε representa a variável aleatória com distribuição normal padronizada, $N(0,1)$, e dt o incremento de tempo. Tal processo possui três propriedades importantes:

- É um processo de *Markov*, e as incertezas futuras dependem somente do seu valor atual;
- Possui incrementos independentes, ou seja, a distribuição de probabilidade é independente das distribuições em outros intervalos de tempo.
- As mudanças no processo seguem uma distribuição normal, em qualquer intervalo de tempo.

Desta forma, pode-se concluir que dz possui distribuição normal com média zero, desvio padrão igual a \sqrt{dt} e variância igual a dt . Além de se tratar de um processo estocástico não estacionário devido sua variância crescer com o decorrer do tempo.

2.6.2 Movimento Aritmético Browniano

O Movimento Aritmético Browniano (MAB), também denominado como Processo de Wiener Generalizado, para uma variável x é definido por meio de (2.2):

$$dx = \alpha \cdot dt + \sigma \cdot dz \quad (2.2)$$

Em (2.2), α é o parâmetro de *drift*¹², σ é o parâmetro de variância e dz é o processo de Wiener. Onde, α e σ são valores constantes, e a variação de dx possui distribuição normal com média igual a $\alpha \cdot dt$, desvio padrão igual a $\sigma \cdot \sqrt{dt}$ e variância igual $\sigma^2 \cdot dt$.

Trata-se de um modelo que a longo prazo a tendência de crescimento (α) é dominante, porém a curto prazo a volatilidade (σ) passa dominar (PESSOA, 2011).

¹² Parâmetro de deslocamento. O sinal deste parâmetro faz com que a série deslize sobre as curvas, para cima, se positivo, e para baixo, se negativo. O seu valor absoluto afeta a inclinação da série.

A Figura 2.7 apresenta o comportamento dos processos de Wiener (curva vermelha), Wiener Generalizado (curva azul) e *drift* (curva preta), com $\alpha = 2,0$ e $\sigma=1,0$.

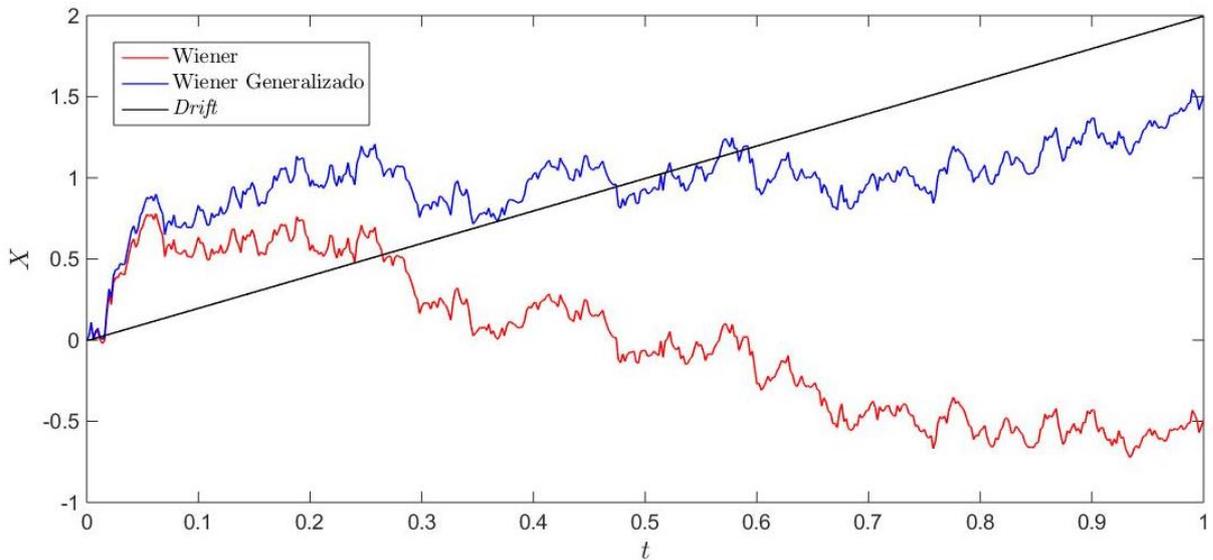


Figura 2.7 - Comportamento dos processos de Wiener, Wiener Generalizado e *drift*.

2.6.3 Movimento Geométrico Browniano

O Movimento Geométrico Browniano (MGB) é muito empregado quando existe a necessidade de modelar preços de ações, *commodities* e ativos financeiros (PINHEIRO NETO, 2017). A representação do modelo para uma variável x é dada por (2.3).

$$d[\ln(x)] = \alpha \cdot dt + \sigma \cdot dz \quad (2.3)$$

Em (2.3), a variação de $\ln(x)$ tem distribuição normal, conseqüentemente x tem uma distribuição log-normal. Tal modelo cresce de forma exponencial e desta forma pode levar seu valor para o infinito, não descrevendo a realidade da variável em análise (PESSOA, 2011).

A Figura 2.8 apresenta o comportamento do movimento geométrico (curva vermelha) e do *drift* (curva preta), no qual adotou-se $\alpha = 0,08$ e $\sigma = 0,30$.

2.6.4 Movimento de Reversão a Média

Quando o modelo com base no MGB não descreve de forma confiável a variável aleatória em análise, implicando com que esta tenda ao infinito, ou seja, transformando-a em um modelo não realista, aplica-se o Movimento de Reversão a Média (MRM). O MRM pode ser modelado

com base no modelo aritmético de reversão à média ou o modelo geométrico de reversão à média.

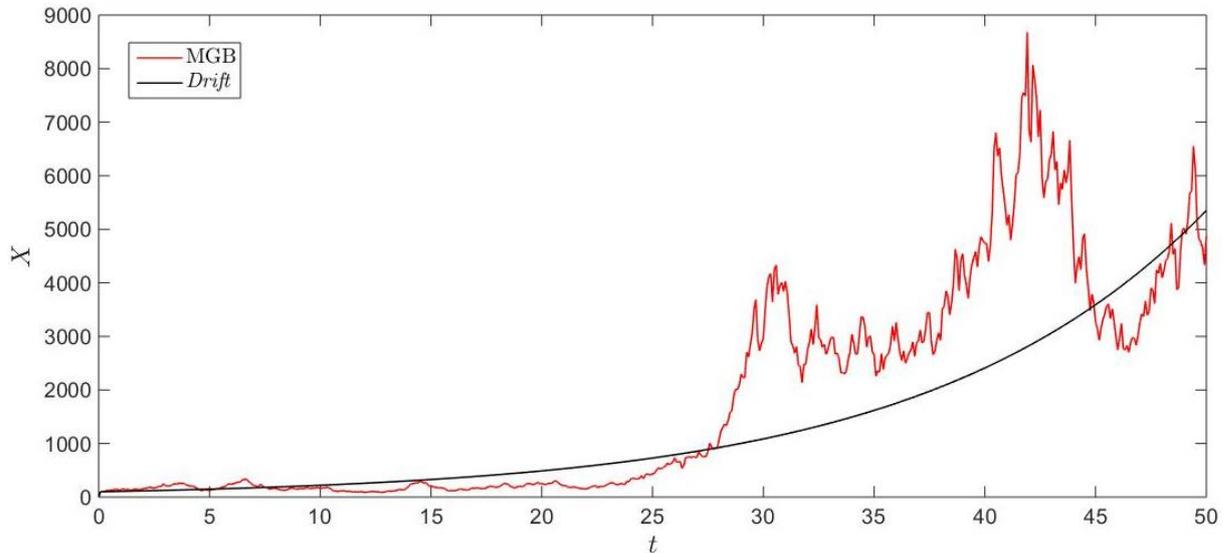


Figura 2.8 - Comportamento do MGB e *drift*.

Nesses modelos, o sentido e a intensidade do desvio são dependentes da variável aleatória x , como é o caso das *commodities* não financeiras, o que não ocorre com o MGB (PESSOA, 2011).

2.6.4.1 Modelo Aritmético de Reversão à Média

O modelo aritmético de reversão à média consegue modelar variáveis que dependem de um valor de equilíbrio de longo prazo (DIXIT e PINDICK, 1994). O modelo para uma variável x é dado por (2.4).

$$dx = \eta \cdot (\bar{x} - x)dt + \sigma \cdot dz \quad (2.4)$$

Em (2.4), η representa a velocidade de reversão ao valor médio de longo prazo \bar{x} , σ é o desvio padrão e dz o incremento de Wiener. Os parâmetros η , \bar{x} e σ podem ser estimados a partir dos dados históricos da variável por meio da metodologia apresentada no Anexo A.

2.6.4.2 Modelo Geométrico de Reversão à Média

O modelo aritmético de reversão a média pode gerar valores negativos, o que acaba limitando a modelagem de algumas variáveis (PINTO, 2009). Nestes casos é necessário aplicar o modelo geométrico de reversão a média. Desta forma, utiliza-se o logaritmo natural da variável x no

lugar da própria variável x , conservando-se a natureza não-negativa da variável. Realizando a mudança de variável $y = \ln(x)$, chega-se ao modelo aritmético de reversão à média, conforme apresentado na equação (2.5).

$$dx = \left[\eta \cdot (\ln(\bar{x}) - \ln(x)) - \frac{\sigma^2}{2} \right] dt + \sigma \cdot \varepsilon \cdot dz \quad (2.5)$$

Os parâmetros η , \bar{x} e σ podem ser estimados a partir dos dados históricos da variável através da metodologia apresentada no Anexo B.

O comportamento do MRM para uma variável aleatória x é apresentado na Figura 2.9 para três valores diferentes do parâmetro η , com $x = 2,0$ e $\sigma = 0,50$.

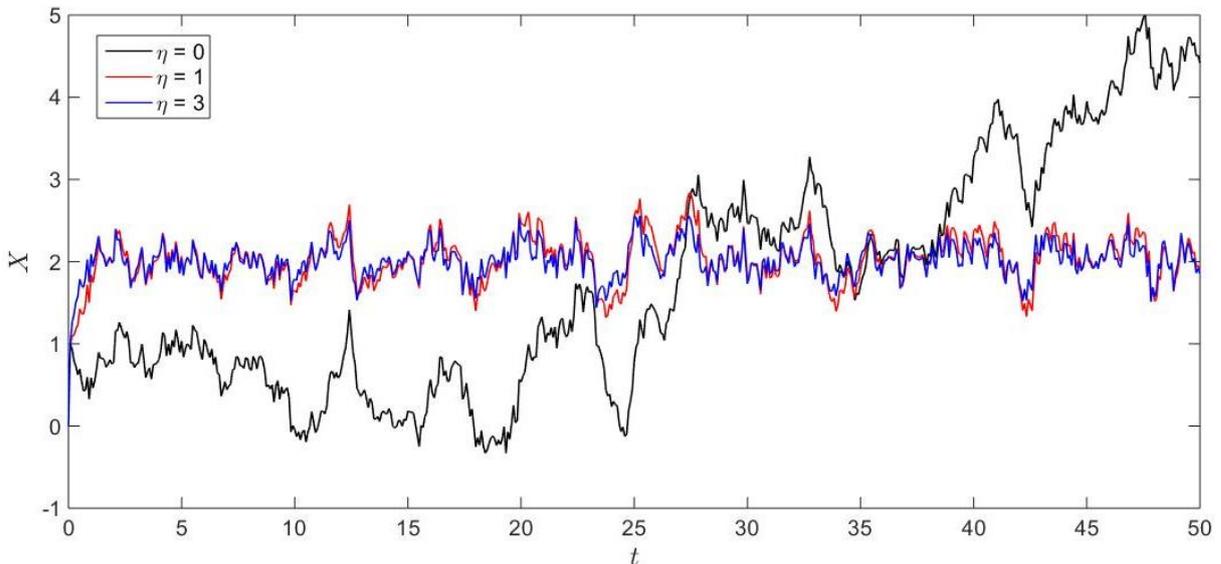


Figura 2.9 - Processo de Reversão à Média.

É importante ressaltar que algumas variáveis aleatórias podem ser voláteis quando analisadas no curto prazo, porém elas tendem a reverter a determinado valor quando considerado um período de longo prazo.

2.7 Modelo Geométrico de Reversão à Média com Saltos de Poisson

Para modelar variáveis econômicas que apresentam, com pouca frequência, grandes saltos irregulares é acrescentado ao modelo os saltos de Poisson. Tal processo está sujeito a acontecimentos, que podem apresentar tamanho fixo ou aleatório, com base em uma frequência que segue uma distribuição de Poisson (PESSOA, 2011).

Desta forma, para esses casos é necessário aplicar o modelo geométrico de reversão a média com saltos de Poisson. Tal modelo para uma variável x é dado por (2.6).

$$dx = \left[\eta \cdot (\ln(\bar{x}) - \ln(x)) - \frac{\sigma^2}{2} \right] dt + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{dt} + \varepsilon_k (\mu < \emptyset dt) \quad (2.6)$$

Em (2.6), ε_k é a variável randômica com distribuição lognormal de média \bar{k} e desvio padrão γ ; μ variável randômica com distribuição uniforme (0,1); e \emptyset a frequência dos saltos.

2.8 Determinação do Processo Estocástico

Os testes de Dickey-Fuller (DF) e Razão da Variância são aplicados nas séries históricas para verificar se o comportamento de estacionariedade está presente nas mesmas (DIXIT e PINDICK, 1994; PINTO, 2009). Eles têm como intuito auxiliar na escolha entre os modelos MGB, quando a série histórica da variável apresenta características não estacionárias, e MRM quando se trata de uma variável com série histórica estacionária.

2.8.1 Teste de Dickey-Fuller

Para verificar a rejeição da hipótese nula (H_0), a qual aponta que as séries são descritas por um MGB, é realizado o teste de raiz unitária de Dickey-Fuller (DF). Se na resposta do teste existir uma ou mais raízes unitárias, os valores assumem diferentes padrões e tendem aumentar com o decorrer do tempo, indicando a não-estacionariedade (PESSOA, 2011).

Neste teste são verificados três modelos de séries temporais: i) autoregressivo sem deslocamento (AR), representado pela equação (2.7); ii) autoregressivo com deslocamento (ARD), representado pela equação (2.8); e iii) autoregressivo com deslocamento e tendência determinística (ARDT), representado pela equação (2.9) (PINTO, 2009; DIXIT e PINDICK, 1994).

Considerando as equações estocásticas apresentadas em (2.7), (2.8) e (2.9): i) se $H_0: \emptyset = 0$, existem raízes unitárias, o MGB é rejeitado, caracterizando o processo como não estacionário; ii) se $H_0: \emptyset \neq 0$, não existe raízes unitárias, caracterizando o processo como estacionário.

$$\mathbf{AR:} \quad x_t - x_{t-1} = \emptyset \cdot x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

$$\mathbf{ARD:} \quad x_t - x_{t-1} = a + \emptyset \cdot x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.8)$$

$$\mathbf{ARDT:} \quad x_t - x_{t-1} = a + \emptyset \cdot x_{t-1} + c \cdot t + \varepsilon_t \quad (2.9)$$

É possível testar as hipóteses realizando várias simulações e encontrando a distribuição de probabilidade do estimador $\hat{\phi}$ quando $\phi = 0$, estabelecendo os valores críticos da estatística t empregados para aplicar o teste (PINTO, 2009).

Para que a hipótese nula (H_0) seja rejeitada é necessário que a estatística t do teste seja menor que a estatística t dos valores críticos de acordo com os níveis de significância apresentados na Tabela 2.3. Desta forma, para um nível de significância de 5% é necessário que os modelos atendam as seguintes limitações: $AR < -1,95$; $ARD < -2,86$ e $ARDT < -3,41$.

Tabela 2.3 - Valores críticos do teste de DF.

Nível de Significância	1 %	2,5 %	5 %	10 %
AR	- 2,58	- 2,23	-1,95	-1,62
ARD	- 3,42	- 3,12	- 2,86	- 2,57
ARDT	- 3,96	- 3,67	- 3,41	- 3,13

Fonte: Pinto, p. 29, 2009.

Sobre a aceitação ou rejeição da hipótese nula, tem-se que quando $H_0 = 1$ indica rejeição da hipótese nula de não-estacionariedade, ou seja, a série é estacionária.

2.8.2 Teste da Razão da Variância

O teste da razão da variância (R_w) aplicado nas séries históricas é dado por (2.10). Este teste é realizado para reforçar a escolha do modelo estocástico, e tem como intuito verificar a extensão dos choques¹³ nos valores das séries buscando constatar se esses são temporários ou explosivos (DIXIT e PINDICK, 1994; PINTO, 2009).

$$R_w = \frac{1}{w} \cdot \frac{Var(x_{t+w} - x_t)}{Var(x_{t+1} - x_t)} \quad (2.10)$$

Em (2.10), $Var(x_{t+w} - x_t)$ é a variância das séries de diferenças entre os valores da série histórica x , com lag (atraso) de w períodos e $Var(x_{t+1} - x_t)$ é a variância das séries de diferenças entre os valores da série histórica x_{t+1} e x_t .

¹³ Distúrbios/erros.

Se a série histórica segue o processo estacionário, como o de reversão a média, a variação das diferenças do período w estagna a um valor máximo com o crescimento de w , consequentemente $R_w \rightarrow 0$. No caso de não-estacionariedade, na medida que w cresce, $R_w \rightarrow 1$ (DIXIT e PINDICK, 1994; PESSOA, 2011).

2.9 Correlação entre Variáveis

Na prática, muitos projetos são compostos por mais de uma fonte de risco. Para descrever o comportamento destes fatores de risco é preciso levar em consideração a correlação entre eles. Para que essa correlação seja vinculada aos números aleatórios de Monte Carlo é aplicada a decomposição de *Cholesky*. Este é um método conhecido para a inclusão da correlação na geração de séries aleatórias (DOMINGUES, 2003; MALETTA, 2005; PINHEIRO NETO, 2017).

Para gerar sequências multivariadas a partir da decomposição de *Cholesky*, os números precisam ser correlacionados de acordo com a matriz de covariância entre as variáveis. Primeiramente, gera-se os sorteios para as variáveis de forma independente, e após, aplica-se a transformação aos números sorteados para que os novos números criados tenham a estrutura da correlação esperada (DOMINGUES, 2003). A transformação dos números sorteados segue o seguinte cálculo:

$$\varepsilon = M^T \cdot \eta \quad (2.11)$$

Em (2.11), ε é o vetor de sequencias aleatórias com a correlação desejada, M é a uma matriz triangular superior, sendo $M \cdot M^T$ a matriz de correlação entre as variáveis, e η é o vetor formando por variáveis independentes com distribuição normal $N(0, I)$.

Em estatística, o coeficiente de correlação indica o grau de associação linear entre duas variáveis, e seu valor pode ser obtido por meio de (2.12).

$$\rho_{i,z} = \frac{\sigma_{i,z}}{\sigma_i \cdot \sigma_z} \quad (2.12)$$

Em (2.12), $\rho_{i,z}$ é o coeficiente de correlação entre as variáveis i e z , $\sigma_{i,z}$ é a covariância entre as variáveis i e z , σ_i é o desvio padrão da variável i , e σ_z é o desvio padrão da variável z .

O coeficiente de correlação apresenta valores que variam entre -1 e +1, quanto mais próximo dos extremos mais forte é a correlação entre as variáveis, já quanto mais próximo de zero mais fraca é a relação. Tal coeficiente pode ser classificado das seguintes formas:

- Correlação negativa (-1): indica que os valores estão perfeitamente correlacionados, mas em sentido contrário;
- Correlação nula (0): indica que não existe relação entre as variáveis, ou seja, quando os valores das variáveis ocorrem independentemente;
- Correlação positiva (+1): indica que os valores estão perfeitamente correlacionados.

A correlação é associada ao modelo de previsão por meio de sorteios correlacionados. Para modelar tal correlação utiliza-se um conjunto de variáveis independentes com distribuição normal padronizada, η (dado por n_1 e n_2), que com o auxílio da decomposição de *Cholesky* pode ser transformada em um conjunto de variáveis correlacionadas, ε , que para este caso de correlação de duas variáveis é dado por (2.13) e (2.14).

$$\varepsilon_1 = n_1 \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_2 = \rho_{i,z} n_1 + \sqrt{1 - \rho_{i,z}^2} n_2 \quad (2.14)$$

Em (2.13) e (2.14), ε_1 e ε_2 representam os sorteios aleatórios para as variáveis aleatórias correlacionadas. O vetor ε é composto por sorteios correlacionados que serão empregados no processo de Wiener da modelagem de cada variável aleatória.

3 METODOLOGIA

A metodologia de análise de risco é desenvolvida aplicando o Método de Monte Carlo, o qual é aplicado aos modelos estocásticos das variáveis aleatórias com o objetivo de gerar as séries sintéticas. As simulações são realizadas no *software* Scilab considerando 2.000 cenários, e a quantidade de períodos mensais igual a vida útil do projeto, o qual é de 25 anos.

Os números aleatórios são calculados a partir da decomposição de *Cholesky*, considerando a correlação entre as variáveis produção de etanol e PLD entre os meses de abril e novembro de cada ano, pois nos demais meses não existe produção de etanol, conseqüentemente não existem valores para realizar a correlação. Desta forma, para os meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro é aplicado sorteio aleatório simples para a variável PLD, ou seja, sem correlação com a variável produção de etanol.

A análise de viabilidade financeira do investimento é realizada com base na distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido (VPL), da Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM) e do *Payback* Descontado.

São empregados modelos econométricos para as variáveis aleatórias produção de etanol e PLD. Os parâmetros dos modelos são estimados a partir dos dados históricos por meio as metodologias dispostas no Anexo A e Anexo B.

O fluxograma geral da metodologia é apresentado na Figura 3.1, o qual tem como base a variável aleatória produção de etanol. Para obter as séries sintéticas do fluxo de caixa na opção de venda de energia no ACL, é necessária a modelagem da variável aleatória PLD, a qual apresenta algumas particularidades. O fluxograma desta modelagem é apresentado na Figura 3.2.

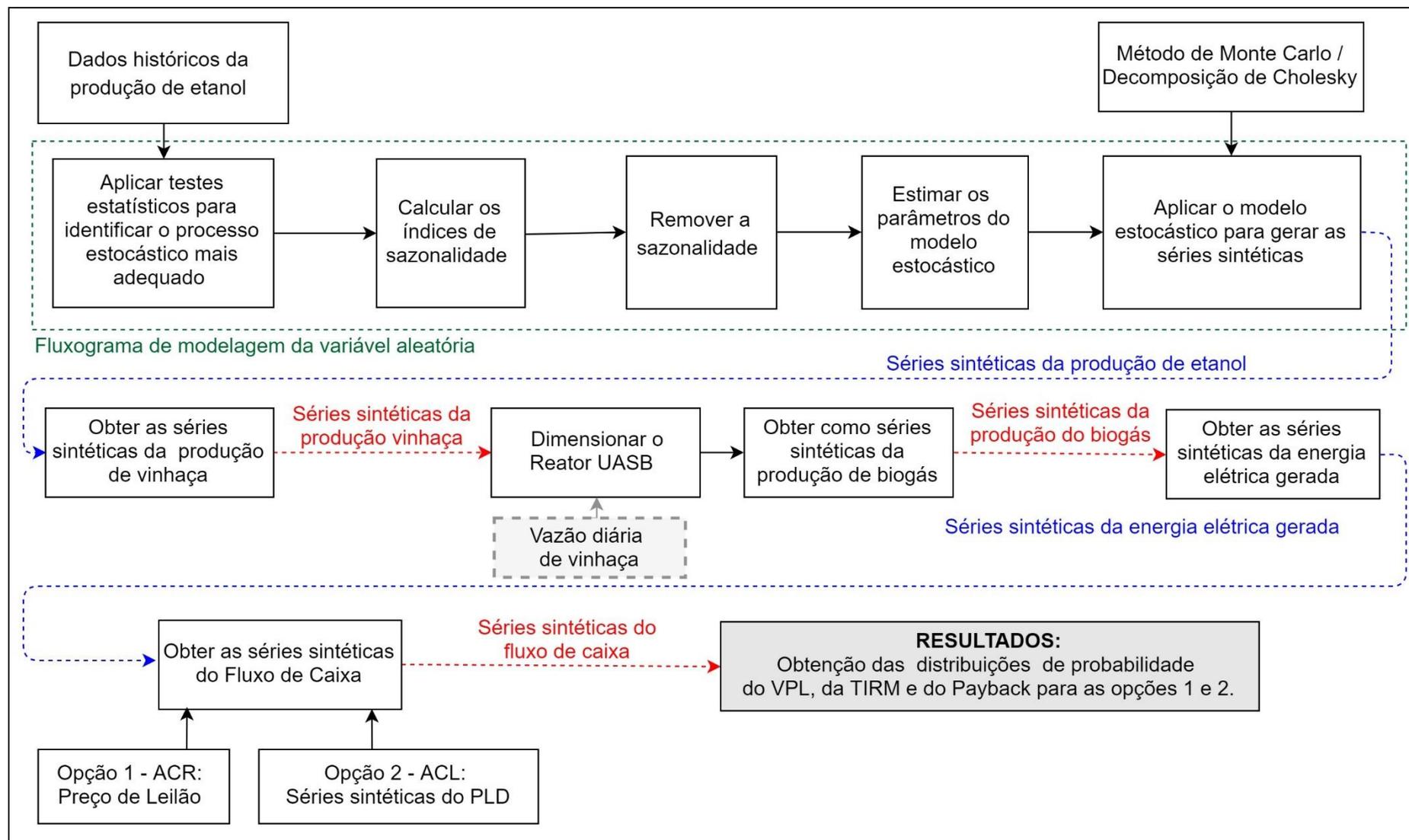


Figura 3.1 - Fluxograma geral de análise de risco.

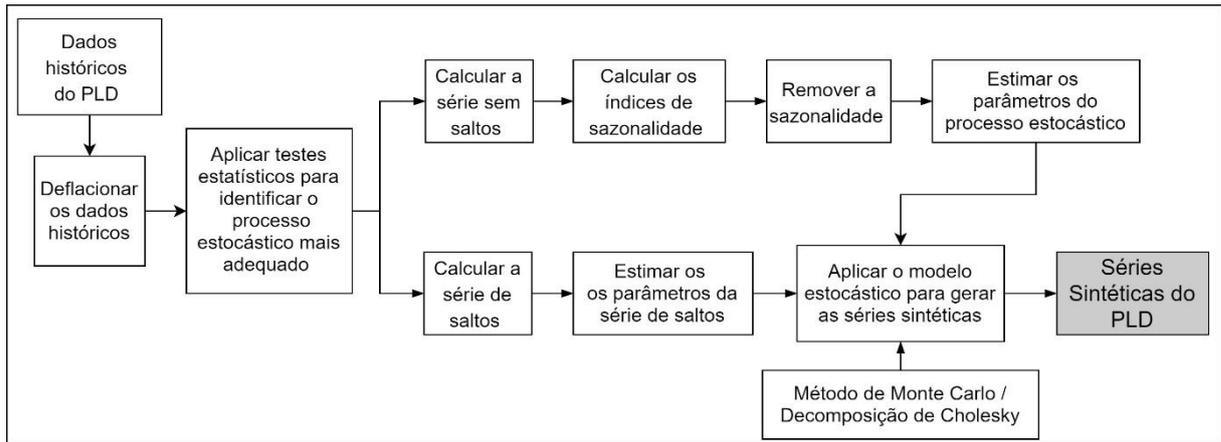


Figura 3.2 - Fluxograma da modelagem da variável PLD.

Primeiramente, através dos testes de Dickey-Fuller¹ e razão da variância², é realizada a verificação da adequabilidade do modelo de reversão a média para as duas variáveis aleatórias em análise. Para estimar os parâmetros dos modelos é necessário que a sazonalidade seja removida. Este procedimento é realizado dividindo os dados históricos pelo índice sazonal do mês correspondente, sendo que para o PLD é necessário realizar o deflacionamento (Anexo C) da série histórica antes da remoção da sazonalidade. O índice de inflação adotado é o Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI)³.

A Seção 3.2 apresenta o método para determinar os índices de sazonalidade correspondente a cada uma das variáveis; a Seção 3.3 apresenta o modelo estocástico da variável aleatória produção de etanol; a Seção 3.4 apresenta o modelo estocástico da variável aleatória PLD; a Seção 3.5 apresenta o modelo para estimar a produção de vinhaça; a Seção 3.6 apresenta o método para dimensionar o reator UASB; a Seção 3.7 apresenta o método para estimar a produção de biogás; a Seção 3.8 apresenta a estimativa do potencial de geração de energia elétrica gerada; a Seção 3.9 apresenta a modelagem econômica abrangendo o método do cálculo da receita bruta e o modelo de fluxo de caixa; a Seção 3.10 apresenta os indicadores econômicos empregados para analisar a viabilidade econômica do projeto; e a Seção 3.11 apresenta o método de análise de sensibilidade, o qual é realizado com base no mapeamento do valor esperado e do desvio padrão (risco) da distribuição de probabilidade do VLP.

¹ Verifica se o modelo autorregressivo tem ou não raiz unitária (DICKEY; FULLER, 1979).

² Analisa se a variância dos incrementos no passeio aleatório é linear no intervalo de tempo observado (DIXIT e PINDICK, 1994)

³ Aplicado para medir o comportamento de preços em geral na economia brasileira.

3.1 Índices de Sazonalidade

Para a estimativa dos parâmetros dos modelos estocásticos é necessário que a sazonalidade seja removida. Isto pode ser feito a partir de um fator sazonal, denominado índice de sazonalidade (DOMINGUES, 2003).

Para determinar os índices de sazonalidade mensal (I_{x_m}) das variáveis aleatórias (x) ao longo do tempo deve-se encontrar a relação entre a média dos valores históricos de um determinado mês $\overline{x_m}$ e a média de todos os valores históricos $\overline{x_{hist}}$, conforme (3.1):

$$I_{x_m} = \frac{\overline{x_m}}{\overline{x_{hist}}} ; \quad m = 1, 2, 3, \dots, 12. \quad (3.1)$$

3.2 Modelo da Variável Aleatória Produção de Etanol

Inicialmente, é necessário realizar a análise dos dados históricos da variável aleatória produção de etanol. Por meio desta análise, é possível observar a presença de sazonalidade e também o comportamento de reversão à média nos dados históricos coletados, o que sugere o uso de processos auto-regressivos na modelagem.

Desta forma, este trabalho adota o modelo aritmético de reversão à média modificado, devido a inclusão de índice de sazonalidade determinístico (PINHEIRO NETO, *et al.*, 2017) dado por (3.2).

$$E_{S_{t+1}} = \{E_t + \eta_E(\bar{E} - E_t)dt + \sigma_E \cdot \varepsilon_E \cdot \sqrt{dt}\} \cdot I_{E_m}. \quad (3.2)$$

Em (3.2), $E_{S_{t+1}}$ é a produção de etanol no período $t + 1$, com sazonalidade; E_t é a produção de etanol no instante t , sem sazonalidade; η_E é a velocidade de reversão a produção de etanol de longo prazo; \bar{E} é o valor médio de produção de etanol de longo prazo σ_E é a volatilidade da produção de etanol; $\varepsilon_E \cdot \sqrt{dt}$ é o processo de Wiener da produção de etanol, onde $\varepsilon_E \sim N(0,1)$, e I_{E_m} é o índice de sazonalidade da produção de etanol, calculado por (3.1). A metodologia de estimação dos parâmetros η_E , \bar{E} e σ_E é apresentada no Anexo A.

3.3 Modelo da Variável Aleatória Preço de Liquidação das Diferenças

Para modelar a variável PLD é aplicada a modelagem desenvolvida por Domingues (2003) e aprimorada por Pinheiro Neto (2017), o qual analisou o comportamento dos dados históricos do PLD médio mensal e elaborou um modelo geométrico de reversão a média com saltos e inseriu índices de sazonalidades determinísticos, sendo o modelo dado por (3.3).

$$P_{S_{t+1}} = \left\{ P_t \cdot e^{\left\{ \left[\eta_P (\ln(\bar{P}) - \ln(P_t)) - \frac{\sigma_P^2}{2} \right] dt + \sigma_P \cdot \varepsilon_P \cdot \sqrt{dt} \right\}} \right\} \cdot I_{P_m} + \varepsilon_k (\mu < \emptyset dt). \quad (3.3)$$

Em (3.3), $P_{S_{t+1}}$ é o PLD no período $t + 1$, com sazonalidade; P_t é PLD no instante t , sem sazonalidade; η_P é a velocidade de reversão ao preço de equilíbrio de longo prazo; \bar{P} é o preço de equilíbrio de longo prazo; σ_P é a volatilidade do PLD; $\varepsilon_P \cdot \sqrt{dt}$ é o processo de Wiener; I_{P_m} é o índice de sazonalidade do PLD, calculado por (3.1); ε_k é a variável randômica com distribuição lognormal de média \bar{k} e desvio padrão γ ; e μ variável randômica com distribuição uniforme (0,1).

Pinheiro Neto (2017) propõe que sejam adotados os seguintes passos para estimar os parâmetros do modelo:

- a) Após deflacionar e dessazonalizar a série histórica deve-se considerar todo valor acima do limite de 1 desvio padrão⁴ como salto;
- b) Identificar os saltos nessa série e substituí-los pelo valor limite de salto (1 desvio padrão), formando assim a série sem saltos;
- c) Estimar os parâmetros η_P , \bar{P} e σ_P , a partir da série sem saltos, por meio da metodologia descrita no Anexo B;
- d) Formar a série de saltos composta pela diferença entre os valores nominais dos saltos, identificados no item anterior, e o valor limite, ou seja, a série conterà apenas os valores que excedem o limite de 1 desvio padrão;

⁴ O limite de 1 desvio padrão foi adotado porque resulta no melhor ajuste entre a média do histórico e o valor esperado das séries sintéticas do PLD.

e) Calcular:

- \bar{k} = média da série de saltos;
- γ = desvio padrão da série de saltos;
- $\emptyset = \frac{\text{quantidade de saltos}}{\text{quantidade de dados da série histórica}}$

3.4 Estimativa da Produção de Vinhaça

A série sintética do potencial de produção de vinhaça é obtida por (3.4).

$$V_{t+1} = k_{VE} \cdot E_{S_{t+1}} \quad (3.4)$$

Em (3.4), V_{t+1} é a quantidade de vinhaça produzida no processo de fabricação do etanol no período $t + 1$, em $m^3/mês$; k_{VE} é constante e mede a relação entre a quantidade de vinhaça gerada pela quantidade de etanol produzida.

Para cada litro de etanol produzido é gerado de 7 a 15 litros de vinhaça (CORTEZ, MAGALHÃES e HAPPI, 1992). Com base nos dados históricos anuais de produção de etanol e de vinhaça pode-se obter a constante k_{VE} . Para isto, divide-se a quantidade de vinhaça gerada pela quantidade de etanol produzido em cada ano do histórico. A constante k_{VE} é a média anual dos valores de k_{VE} obtidos do histórico.

3.5 Dimensionamento do Reator UASB

Os biodigestores são dimensionados com base da quantidade diária das biomassas residuais a tratar e do tempo de duração previsto para a biodigestão (BLEY JR., 2015).

O dimensionamento e projeto do Reator UASB, também conhecido como Reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), é realizado conforme os passos descritos por Chernicharo (2016). Para determinar o volume do reator é importante conhecer os índices de carga hidráulica volumétrica, o tempo de retenção hidráulica e a carga orgânica volumétrica.

A carga hidráulica volumétrica é o volume de resíduo despejado diariamente no reator, por unidade de volume do reator. O tempo de detenção hidráulica é o inverso da carga hidráulica volumétrica (CHERNICHARO, 2016).

A carga orgânica volumétrica (*COV*) é a carga orgânica que o reator deve receber por unidade de volume e de tempo, a qual é dada em $kg \cdot DQO/m^3 dia$, sendo DQO a demanda química de oxigênio. É a *COV* que define o volume do reator, e quanto maior seu valor menor será o volume do reator (CHERNICHARO, 2016, p. 219). O volume do reator pode ser obtido conforme (3.5).

$$VR = \frac{V \cdot S_0}{COV}, \quad (3.5)$$

Em (3.5), *VR* é o volume total do reator em m^3 , *V* é a vazão diária da vinhaça em m^3/dia , S_0 é concentração do substrato afluente em $kg \cdot DQO/m^3$.

O tempo de retenção hidráulico (*TRH*) em dias, é a relação entre o volume total do reator e a vazão diária da vinhaça (*Q*) por dia, dado por (3.6) (CHERNICHARO, 2016, p. 217).

$$TRH = \frac{VR}{Q} \quad (3.6)$$

3.6 Estimativa da Produção de Biogás

Para estimar a produção de biogás é necessário conhecer também a eficiência da remoção da matéria orgânica e concentração do substrato efluente, sendo que ambos parâmetros dependem do volume do reator.

A eficiência da remoção da matéria orgânica (E_{DQO}) e redução da DQO é calculada por meio do método matemático apresentado por Chernicharo (2016, p.237) dado por (3.7).

$$E_{DQO} = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot TRH^{-0,35}) \quad (3.7)$$

Em (3.7), 0,68 e 0,35 são consideradas constantes empíricas.

Estima-se a concentração do substrato efluente (*S*) em $kg \cdot DQO/m^3$ por meio de (3.8).

$$S = S_0 - \frac{S_0 - E_{DQO}}{100} \quad (3.8)$$

Em (3.8), S_0 a estimativa de DQO afluente ($kg\ DQO/m^3$).

Com a eficiência da remoção da matéria orgânica e a concentração do substrato efluente determinados é necessário encontrar a carga orgânica, em função da DQO, que será convertida em metano no período $t + 1$ ($DQO_{CH_{4t+1}}$), conforme (3.9) (GEHRING, 2014; SOUSA, 2014; CHERNICHARO, 2016).

$$DQO_{CH_{4t+1}} = V_{t+1} \cdot (S_0 - S) - Y_{abs} \cdot V_{t+1} \cdot S_0 \quad (3.9)$$

Em (3.9), Y_{abs} o coeficiente de produção de sólidos.

Para sistemas de tratamento anaeróbico, o coeficiente de produção de sólidos é adotado como sendo $0,23\ kg\ DQO_{lodo}/kgDQO_{apl}$ (GEHRING, 2014; SOUSA, 2014).

Após a estimativa de $DQO_{CH_{4t+1}}$ pode-se obter a produção volumétrica de metano, dado por (3.10), a qual é a relação entre a produção volumétrica de metano, denotada por $Q_{CH_{4t+1}}$, no período $t + 1$, em m^3/dia , e o fator de correção para a temperatura operacional do reator $K(T)$ calculado por (3.11).

$$Q_{CH_{4t+1}} = \frac{DQO_{CH_{4t+1}}}{K(T)} \quad (3.10)$$

$$K(T) = \frac{P \cdot K}{R \cdot (273 + T)} \quad (3.11)$$

Em (3.11), P a pressão atmosférica ($1\ atm$); K é o DQO correspondente a um mol de CH_4 ($64\ g\ DQO/mol$); R é a constante dos gases ($Atm.L/mol.^{\circ}K$) e T a temperatura operacional do reator.

A estimativa da produção de biogás ($m^3/mês$), denotada por $P_{biogás_{t+1}}$, no período $t + 1$, é obtida a partir da relação entre a produção volumétrica de metano em m^3 ($Q_{CH_{4t+1}}$) e a concentração de metano (C_{CH_4}) existente na mesma conforme (3.12) (SOUSA, 2014; CHERNICHARO, 2016).

$$P_{biogás_{t+1}} = \frac{Q_{CH_4_{t+1}}}{C_{CH_4}} \quad (3.12)$$

Sousa (2014) e Chernicharo (2016) adotam como sendo 60% a proporção de metano no biogás proveniente da vinhaça.

3.7 Potência Elétrica Disponível e Energia Elétrica Gerada

Para este trabalho é empregado o Grupo Motor Gerador de Ciclo Otto como a tecnologia de geração de energia elétrica devido aos seguintes fatores: eficiência elevada para geração de energia elétrica, baixo custo de manutenção, arranque rápido, trabalho em rotações relativamente baixas e pequeno tamanho o que facilita a manutenção.

A potência instalada da usina deve ter um único valor (determinístico), sendo necessário definir esse valor a partir dos cenários de potência elétrica disponível. Para isso, define-se um parâmetro auxiliar chamado de “potência limite”. Primeiramente são encontrados os valores máximos de cada um dos cenários. A título de ilustração, a Figura 3.3 ilustra os 10 valores máximos para o caso de dez cenários. Posteriormente é encontrada a média aritmética desses valores, apresentada na Figura 3.3 pela linha preta pontilhada, a qual refere-se ao parâmetro potência limite descrito.

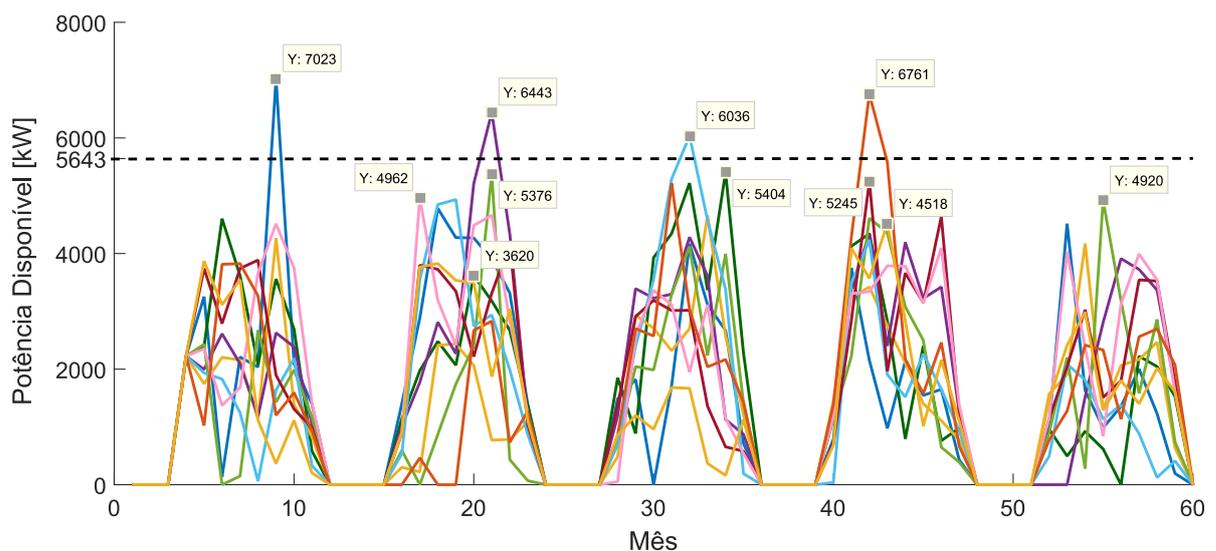


Figura 3.3 - Ilustração do cálculo da potência limite.

A combinação dos GMGs é realizada de forma automática com base no custo de aquisição dos mesmos, priorizando sempre o menor custo⁵, de forma a não ultrapassar o valor da potência limite. Para isso são consideradas as seguintes potências: 20 kW, 32 kW, 55 kW, 77 kW e 160 kW. Tal combinação define o valor da potência instalada, que é realizada tendo como referência a potência limite.

A potência elétrica disponível ($P_{E_{t+1}}$) mensal é dada por (3.13) (CHERNICHARO, 2016).

$$P_{E_{t+1}} = (P_{biogás_{t+1}} \cdot PCI_{biogás} \cdot \eta_{GMG})/720 \quad (3.13)$$

Em (3.13), $PCI_{biogás}$ é o poder calorífico inferior do biogás (kWh/m^3); η_{GMG} é a eficiência da tecnologia (%), e a constante 720 representa o número de horas em 1 mês.

A partir da potência elétrica disponível pode-se determinar a geração mensal de energia elétrica por meio de (3.14).

$$E_{E_{t+1}} = P_{E_{t+1}} \cdot N_H \quad (3.14)$$

Em (3.14), $E_{E_{t+1}}$ é a energia elétrica gerada no período $t + 1$ ($kWh/mês$) e N_H é o número de horas de funcionamento dos geradores no mês.

3.8 Análise de Viabilidade Econômica

A modelagem de viabilidade econômica visa obter o fluxo de caixa mediante a aplicação de um determinado modelo, para o período referente a vida útil do projeto. Por se tratar de uma análise de risco serão apresentadas informações, por meio da distribuição de probabilidade, dos indicadores econômicos de viabilidade VPL, TIRM e *Payback* Descontado, os quais têm como principal intuito de auxiliar no processo de tomada de decisão.

3.8.1 Fluxo de Caixa

Existem vários métodos para mensurar o valor econômico das empresas, os quais podem partir de diferentes pressupostos sobre a determinação do valor, porém eles compartilham características semelhantes (DAMODARAN, 2010; SOUTE, SCHVIRCK, *et al.*, 2008).

⁵ GMGs maiores possuem custo menor.

Segundo Damodaran (2010, p. 11) “o método de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) relaciona o valor de um ativo ao valor presente dos fluxos de caixas futuros esperados relativos àquele ativo”. Este modelo é um dos mais empregados em avaliação de empresas, pois trata-se de um método que exige informações detalhadas do projeto.

O FCD pode ser avaliado de duas maneiras, uma que avalia a empresa como um todo, ou seja, avalia-se o Fluxo de Caixa Livre para a Empresa (FCLE), e outra que avalia com a participação do acionista, isto é, avalia-se o Fluxo de Caixa Livre para os Acionistas (FCLA). Se tomarem o mesmo conjunto de premissas, ambas maneiras apresentarão estimativas consistentes de valor, mesmo que eles adotem modelos de fluxo de caixa e taxas de desconto diferentes (DAMODARAN, 2010).

Este estudo adota o método FCLE para avaliação do investimento. O modelo empregado segue a estrutura básica definida por (DAMODARAN, 2010) e é apresentado na Tabela 3.1. É importante ressaltar que o mesmo é modificado para considerar as particularidades da tributação do mercado brasileiro.

Tabela 3.1 - Modelo de fluxo de caixa adotado.

(+) Receita Bruta
Venda de energia elétrica
(-) Tributos sobre a Receita Bruta
PIS/PASEP
COFINS
(=) Receita Líquida
(-) Despesas Operacionais
Custo de Operação e Manutenção (O&M)
Depreciação dos equipamentos
Transporte de energia (TUST)
Encargos setoriais
(=) Lucro antes do Imposto de Renda (LAIR)
(-) Impostos
Imposto de Renda (IR)
Contribuição Social sobre Lucro Líquido (CSLL)
(=) Lucro Líquido após o Imposto de Renda
(+) Depreciação dos equipamentos
(-) Investimento
(=) FCLE

O método para determinar a receita bruta obtida por meio da venda da energia elétrica será apresentado na Seção 3.9.2. Os demais itens serão descritos na listagem a seguir:

- **Tributos sobre a Receita Bruta (RB):** são os impostos diretos que incidem sobre a receita bruta, neste caso o PIS (Programa de Integração Social), com base na Lei Complementar nº 7/1970, PASEP (Programa de Formação do Patrimônio Público), regido pela lei nº 8/1970, e o COFINS (Contribuição para Financiamento da Seguridade Social), por meio da Lei Complementar nº 70 de 20/12/1991;
- **Receita Líquida:** é a diferença entre a receita bruta e os tributos aplicados sobre a mesma;
- **Despesas Operacionais:** as despesas operacionais abrangem os custos com operação e manutenção do projeto durante sua vida útil, a depreciação dos equipamentos, o transporte da energia e os encargos setoriais;
- **Lucro antes do Imposto de Renda (LAIR):** é a diferença entre receita líquida e as despesas operacionais, antes de aplicar o imposto de renda IR;
- **Imposto sobre o Lucro Líquido:** engloba o IR e a Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido (CSLL). Ambos os impostos incidem sobre a receita bruta, pois é adotado o sistema de tributação Lucro Presumido⁶;
- **Lucro Líquido após o Imposto de Renda:** é a diferença entre o lucro líquido antes do IR e os impostos sobre o lucro líquido, ou seja, é o lucro líquido do projeto;
- **Depreciação dos Equipamentos:** é a desvalorização dos equipamentos ao longo da vida útil do projeto. Nota-se que a mesma é contabilizada apenas para abatimento de impostos por não se tratar de um valor de saída de caixa real, e por isso deve ser retornado ao fluxo de caixa;
- **Investimento:** é o investimento inicial necessário para que o projeto seja implementado.

3.8.1.1 Receita Bruta da Venda de Energia Elétrica

São consideradas duas formas para comercialização da energia elétrica com o intuito de auxiliar na tomada de decisão. No primeiro caso, para a comercialização da energia no ACR, considera-

⁶ Forma de tributação simplificada do Imposto de Renda das Pessoas Jurídicas (IRPJ) e da Contribuição Social sobre o Lucro (CSLL).

se que a toda energia produzida é vendida por preço fixo (preço de leilão). Já no segundo caso, toda a energia gerada é negociada no ACL considerando o preço do PLD.

Desta forma, com base na estimativa de energia elétrica gerada é possível calcular a receita bruta proveniente da venda de energia elétrica no ACR por meio de (3.15).

$$RB_{ACR_{t+1}} = E_{E_{t+1}} \cdot P_L \quad (3.15)$$

Em (3.15), RB_{t+1} representa a receita bruta da venda de energia elétrica no período $t + 1$, P_L o preço da energia, o qual é considerado como constante, pois é proveniente do leilão de energia.

Já na segunda opção, a energia elétrica gerada é comercializada no ACL, onde considera-se que a venda de energia é realizada por contrato bilateral, no qual o agente gerador se compromete a entregar o montante de energia contratado (M) pelo preço definido no contrato P_C . Nesta modalidade o agente deve liquidar no mercado de curto prazo, ao valor do PLD, a diferença entre sua potência gerada ($E_{E_{t+1}}$) e o montante contratado M , conforme dado por (3.16) (CCEE, 2018).

$$RB_{ACL_{t+1}} = M \cdot P_C \cdot t + [E_{E_{t+1}} - M] \cdot PLD \cdot t; \quad t = 729h. \quad (3.16)$$

Sendo que, quando $E_{E_{t+1}} > M$, a diferença é vendida no mercado de curto prazo, já quando $E_{E_{t+1}} < M$, a diferença deve ser comprada no mercado de curto prazo para que o agente gerador consiga honrar o contrato.

3.9 Indicadores Econômicos

Para realizar a análise de viabilidade econômica do investimento são empregados indicadores econômicos, os quais refletem o comportamento do fluxo de caixa durante a vida útil do projeto. Os indicadores, VPL, TIRM e *Payback* Descontado, são simulados para 2.000 cenários durante um período e 300 meses, vida útil do projeto. Esta técnica de análise de risco examina diversos possíveis cenários sobre o empreendimento, onde cada um deles considera uma dada combinação de fatores. Esses indicadores são apresentados em forma de distribuição de probabilidade, das quais são calculados o valor esperado e o desvio padrão de cada um deles.

3.9.1 Custo de Capital

O custo de capital é o retorno mínimo esperado para obter recursos, os quais podem ser próprios e/ou de terceiros, para a execução de um projeto. Para calcular o VPL é adotado como Taxa Mínima de Atratividade o custo de capital próprio. Para calcular a TIRM é adotado como taxa de financiamento o custo de capital de terceiros, e como taxa de investimento o custo de capital próprio (BRASIL, 2014).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Nota Técnica nº 89/2014, utiliza o CAPM (*Capital Asset Pricing Model*) para o calcular o custo de capital próprio (r_{CAPM}) para ativos de geração no Brasil, dado por (3.16).

$$r_{CAPM} = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) + r_B, \quad (3.16)$$

Em (3.16), r_f é a taxa de retorno do ativo livre de risco, r_m é o risco do mercado de referência, β é o beta alavancado de acordo com o setor regulado, $r_m - r_f$ é o prêmio de risco do mercado de referência e r_B o prêmio de risco do Brasil.

O beta mede a volatilidade e indica a variação do retorno da ação de uma determinada empresa em relação ao comportamento do mercado acionário, sendo que o beta do mercado norte-americano deve ser adaptado considerando a estrutura de capital e carga tributária brasileiros (BRASIL, 2014).

O retorno que os credores da dívida da empresa demandam ao realizar novos empréstimos a esta é dado pelo custo do capital de terceiros (r_d), o qual também é calculado conforme da Nota Técnica nº 89/2014, através de (3.17).

$$r_d = r_f + r_C + r_B \quad (3.17)$$

Em (3.17), r_C é o prêmio de risco de crédito.

3.9.2 Valor Presente Líquido

Um dos métodos mais conhecido e aplicado na análise de projetos de investimento é o Valor Presente Líquido (VPL), dado por (3.18), baseado do FCLE. O VPL determina o impacto de eventos futuros ligados ao investimento em termos de valor presente. Quando positivo indica

que o investimento é viável (DAMODARAN, 2010). Por se tratar de análise de risco, a quantidade de valores de VPL é igual à quantidade de cenários k gerados.

$$VPL_{(k)} = \sum_{i=0}^n \frac{FC_{i(k)}}{(1 + r_{desc})^i} \quad (3.18)$$

Em (3.18), $VPL_{(k)}$ é o valor presente líquido para o cenário k , $FC_{i(k)}$ é o fluxo de caixa no período i e cenário k , n é o número de períodos mensais durante o período de vida do projeto, e r_{desc} é a taxa de desconto aplicada ao fluxo de caixa, que representa a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TMA é considerada como sendo a taxa mínima de retorno que o investidor está disposto a aceitar antes de iniciar o novo projeto, considerando seu risco.

A partir da distribuição de probabilidade do VPL é possível obter informações valiosas, como o valor esperado, desvio padrão (Anexo D) e a probabilidade de não retorno do investimento (PNRI), que representa a probabilidade dos valores de VPL serem menores que zero.

3.9.3 Taxa Interna de Retorno Modificada

A taxa interna de retorno (TIR) é um método de análise de investimento referente a taxa para a qual o valor presente líquido do fluxo de caixa é nulo, isto é, a taxa na qual os valores das receitas são iguais às despesas (CASAROTTO FILHO e KOPITTKKE, 2007).

Porém, mais de um valor pode ser encontrado para TIR quando o fluxo de caixa do projeto apresenta mais de uma inversão de sinal, impossibilitando seu uso para avaliar o investimento (BRASIL, 2002). Desta forma, é necessário aplicar a Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM), dada por (3.19), a qual busca corrigir problemas estruturais, relacionados a múltiplas raízes. A TIRM trabalha com as taxas de financiamento e de investimento (DAMODARAN, 2010).

$$TIRM_k = \left[\frac{\sum_{i=0}^n FCP_{i(k)} (1 + R_{CAPM})^{n-i}}{\frac{\sum_{i=0}^n |FCN_{i(k)}|}{(1 + r_d)^i}} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (3.19)$$

Em (3.19), $FCP_{i(k)}$ são os fluxos de caixa positivos para o cenário k e período i ; $FCN_{i(k)}$ são os fluxos de caixa negativos para o cenário k e período i ; r_{CAPM} , custo de capital próprio, é

considerado como a taxa de investimento; r_d , custo de capital de terceiros, é a taxa de financiamento; e n é o número de períodos mensais durante o período de vida do projeto. A quantidade de valores da TIRM é igual ao número de cenários k .

A atratividade do projeto é determinada mediante a comparação entre a TIRM e a TMA. Se a TIRM for maior que a TMA, o projeto é atrativo. Caso contrário, se a TIRM for menor que a TMA, o projeto passa a não ser interessante para o investidor. A partir da distribuição de probabilidade da TIRM pode-se obter o valor esperado e desvio padrão da mesma, bem como a probabilidade da TIRM ser menor que a TMA.

3.9.4 *Payback* Descontado

Um projeto é viável economicamente somente se o investimento puder ser recuperado antes do final da vida útil do mesmo (BRASIL, 2002). Para encontrar o tempo de retorno de investimento tem-se o método do *Payback* Descontado. Este método indica o momento exato em que o valor da diferença entre entradas de caixa e o investimento inicial se torna positiva, ou seja, apresenta o tempo de recuperação do capital investido, considerando-se o valor do dinheiro no tempo, conforme (3.20). A quantidade de valores do *Payback* Descontado é igual ao número de cenários k .

$$Payback_{(k)} = \frac{|FCN_{(k)}|}{|FCN_{(k)}| + |FCP_{(k)}|} \cdot (MP_{(k)} - MN_{(k)}) + MN_{(k)} \quad (3.20)$$

Em (3.20), $MN_{(k)}$ é o mês do cenário k em que o valor do fluxo de caixa acumulado é negativo ($FCN_{(k)}$); $MP_{(k)}$ é o mês do cenário k em que o valor do fluxo de caixa acumulado passa a ser positivo ($FCP_{(k)}$). A partir da distribuição de probabilidade do *Payback* pode-se obter o valor esperado, desvio padrão, bem como a probabilidade do *Payback* ser maior que a vida útil do projeto.

3.10 Análise de Sensibilidade

Para analisar o impacto no indicador econômico VPL, devido a variação de um ou mais parâmetros que afetam o fluxo de caixa do mesmo, é realizada a análise de sensibilidade. Esta análise tem como intuito apresentar quais parâmetros são mais sensíveis no projeto e devem ser estimados com maior precisão (SALLES, 2004).

Este trabalho é com base na análise de sensibilidade univariada, ou seja, varia-se um parâmetro por vez mantendo-se os demais parâmetros constantes e analisa-se os efeitos desta variação nos indicadores financeiros (PINHEIRO NETO, 2017). Trata-se de uma suposição simplificada devido a dependência entre as variáveis apresentar dificuldade de ser contabilizada de maneira mais acurada.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização da Agroindústria Sucroenergética

Para validar a metodologia apresentada é realizado um estudo de caso na agroindústria sucroenergética Jalles Machado, localizada na cidade de Goianésia, no estado de Goiás. A média anual de cana moída na usina, matéria prima, é de 2.336.982 toneladas, quantidade esta que produz uma média de 80.101.217 litros de etanol e 3.336.477 sacas de açúcar. A Figura 4.1 apresenta a vista por satélite do local, com suas respectivas referências de longitude e latitude.

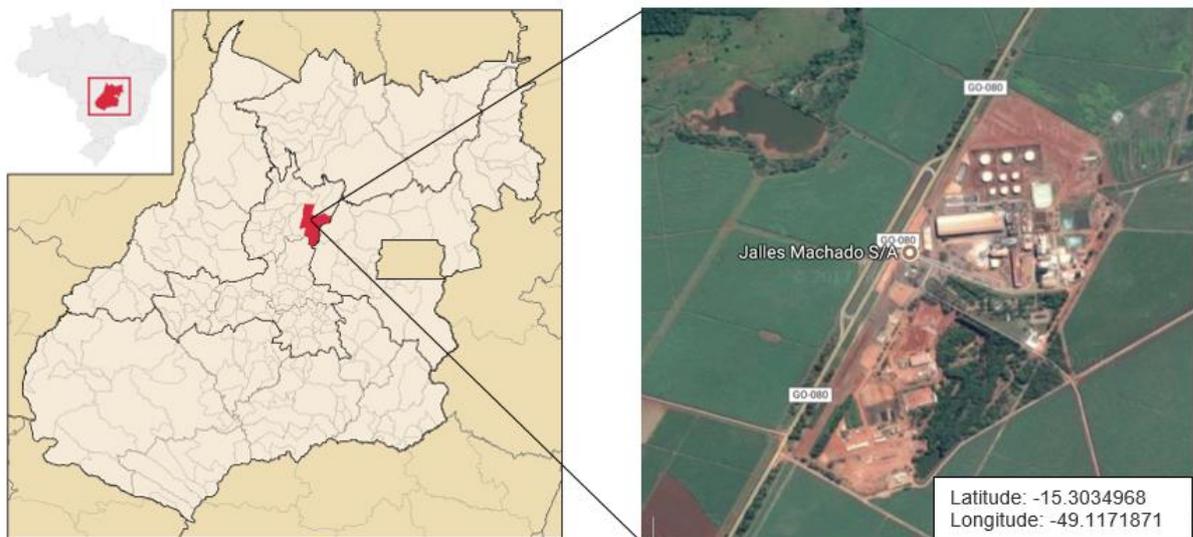


Figura 4.1 - Localização da Agroindústria Jalles Machado.

O período de safra na usina ocorre entre o final do mês de março até segunda quinzena de novembro de cada ano. Já o período de entre safra corresponde ao restante do ano, final do mês de novembro até o início do mês de março, período este destinado a manutenção das instalações da usina.

Atualmente a Jalles Machado produz energia elétrica através da cogeração a partir do bagaço da cana. A central termoelétrica tem capacidade para gerar 40 MWh, porém ela gera cerca de 29,6 MWh, dos quais ela consome cerca de 10,9 MWh. O excedente de 18,7 MWh é vendido no ACL.

4.2 Obtenção dos Cenários da Variável Aleatória Produção de Etanol

Nesta seção, são apresentados os dados históricos, os resultados dos testes estatísticos, os índices de sazonalidade, e a validação do modelo estocástico da variável aleatória produção de etanol.

4.2.1 Dados Históricos

A Figura 4.2 apresenta o histórico da variável aleatória etanol. Esses dados são mensais e abrangem o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2016.

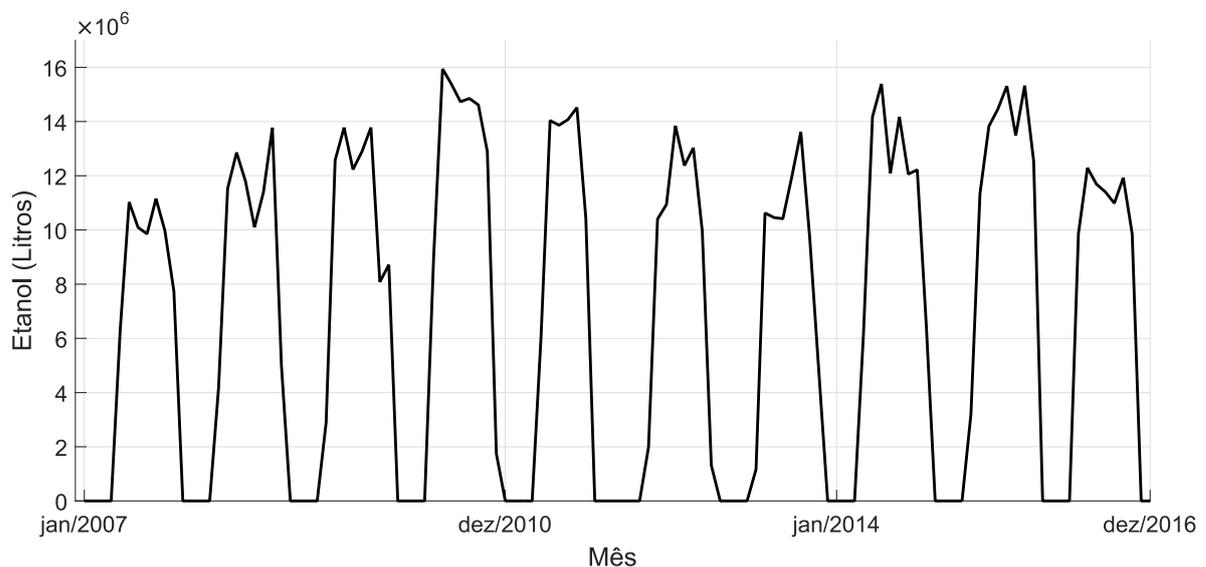


Figura 4.2 - Histórico da variável aleatória produção de etanol.

Nota-se na Figura 4.2 que o histórico da variável produção de etanol apresenta sazonalidade, a qual está diretamente relacionada com o período de safra e entre safra da agroindústria, além de apresentar tendência de reversão para o valor médio, o qual é igual a 6.839.486,33 litros.

4.2.2 Testes Estatísticos

A Tabela 4.1 apresenta o resultado do teste estatístico de Dickey-Fuller referente a variável aleatória produção de etanol considerando o nível de confiança igual a 95%. Desta forma, para a aceitação da hipótese nula (H_0) de não-estacionariedade, a estatística t do teste deve apresentar valores menores que os valores críticos apresentados na Tabela 2.3, ou seja, $AR < -1,95$; $ARD < -2,86$ e $ARDT < -3,41$. Quando $H_0 = 1$, tem-se a rejeição da hipótese nula indicando que a série é estacionária.

Tabela 4.1 - Resultado do Teste de Dickey-Fuller para variável aleatória produção de etanol.

	AR	ARD	ARDT
Produção de Etanol	-1.6830	-5.1209	-4.9799
H_0	0	1	1

Pelos resultados apresentados na Tabela 4.1 constata-se a rejeição de H_0 ($H_0 = 1$). Desta forma a variável aleatória produção de etanol pode ser modelada como uma série estacionária (modelo de reversão a média). Nota-se que ocorrem apenas duas rejeições da hipótese nula, sendo importante ressaltar que mesmo quando não ocorre a rejeição da hipótese nula ainda pode existir níveis de reversão a média da variável analisada. Desta forma, o modelo deve ser escolhido com base tanto na ponderação estatística como teórica, levando em consideração também a intuição sobre o comportamento da série (PINTO, 2009; PINHEIRO NETO, DOMINGUES, *et al.*, 2017).

A Figura 4.3 apresenta o resultado do teste da razão da variância, usando a equação (2.10).

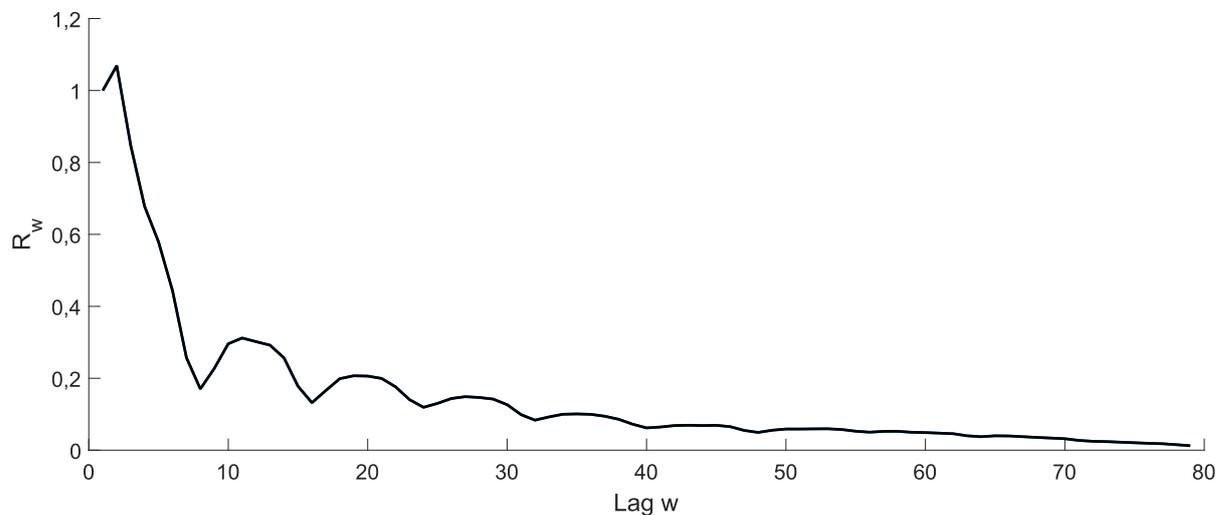


Figura 4.3 - Resultado do teste da Razão da Variância.

Nota-se na Figura 4.3 que a série da razão da variância tende a *zero*, o que indica que a série histórica da produção de etanol segue um processo estacionário, e possui comportamento de reversão a média, o que confirma que para essa variável a modelagem por MRM é mais adequada do que por MGB.

4.2.3 Índices de Sazonalidade

Os índices de sazonalidade são calculados a partir dos dados históricos por meio da equação (3.1). São determinados em função do histórico da variável produção de etanol, a qual apresenta valores que seguem uma média devido ao período das safras se repetirem anualmente.

A Tabela 4.2 apresenta os índices de sazonalidades, sendo que os meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro não são expostos por representarem o período de entre safra, período que a usina não opera.

Tabela 4.2 - Índices de sazonalidade da variável produção de etanol.

Mês	Índice de Sazonalidade
Abril	0,438
Maio	1,162
Junho	1,259
Julho	1,219
Agosto	1,238
Setembro	1,223
Outubro	0,992
Novembro	0,472

4.2.4 Validação do Modelo Estocástico

Para a validação do modelo estocástico da produção de etanol, os dados históricos de janeiro de 2006 a dezembro de 2014 (9 anos) são empregues para estimação dos parâmetros da equação (3.2), e os dados históricos de janeiro de 2015 a dezembro de 2017 (3 anos) para validação do modelo proposto.

A Figura 4.4 apresenta a regressão linear como suporte para estimar os parâmetros do modelo com base na série histórica mensal dessazonalizada da variável produção de etanol. A estimação dos parâmetros da modelagem adotou a metodologia apresentada no Anexo A e são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros estimados.

Produção de Etanol	
a	4.909.578,8554
b	0,5274
Erro padrão	3.587.616,10
\bar{E} [L]	10.389.093,16
η_E	0,6397
σ_E [L]	4.776.489,71

Na Tabela 4.3, \bar{E} é o valor médio de produção de etanol de longo prazo, indicando o nível de equilíbrio de longo prazo da variável; η_E representa a velocidade de reversão da produção de etanol de longo prazo, sendo que quanto mais próximo de 1 mais rápido a série tende a reverter ao valor de longo prazo; e σ_E é a volatilidade da produção de etanol, a qual busca apresentar a medida de intensidade das perturbações estocásticas da variável.

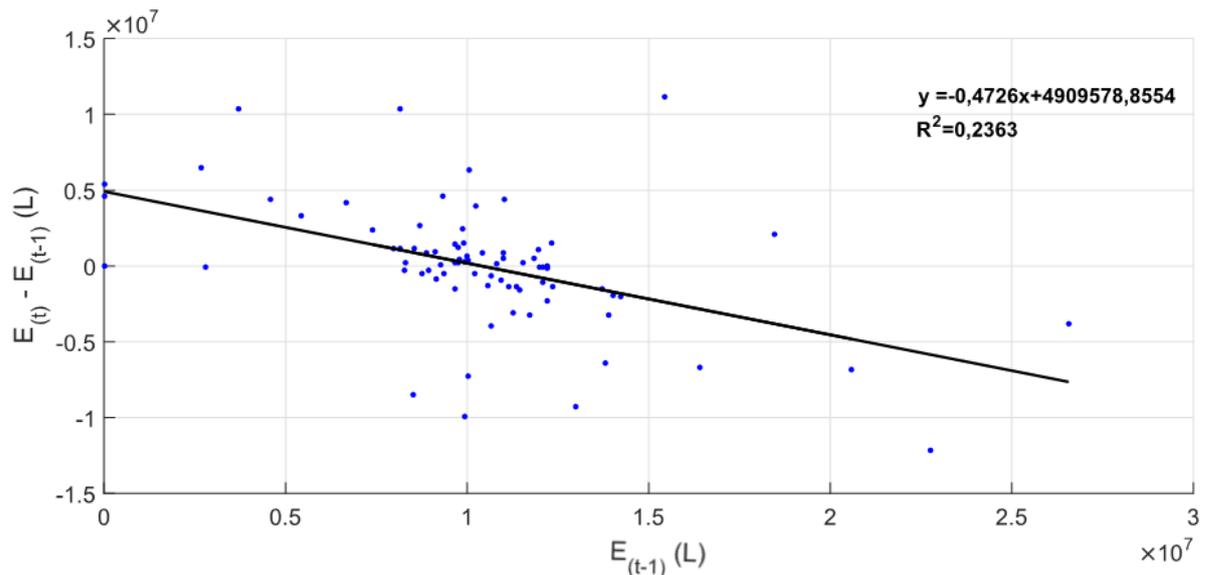


Figura 4.4 - Regressão linear para a série produção de etanol.

A equação da regressão linear apresentada na Figura 4.4 indica que o coeficiente angular da reta é igual a -0,4726, e que o coeficiente linear é igual a 4.909.578,8554, o qual representa a interceptação da reta com o eixo vertical. Além disso, apresenta-se coeficiente de determinação (R^2), que representa a qualidade do ajuste do modelo, sendo igual a 0,2363. Com relação a reta obtida na Figura 4.4, nota-se que à medida que $E_{(t-1)}$ aumenta, $E_{(t)} - E_{(t-1)}$ apresenta um leve declínio, o qual indica o comportamento de reversão à média.

A Figura 4.5 apresenta a simulação de validação, considerando o histórico de produção de etanol. A linha em vermelho, referente ao valor médio das séries sintéticas geradas, está bem próxima da linha em preto, que representa o histórico de validação.

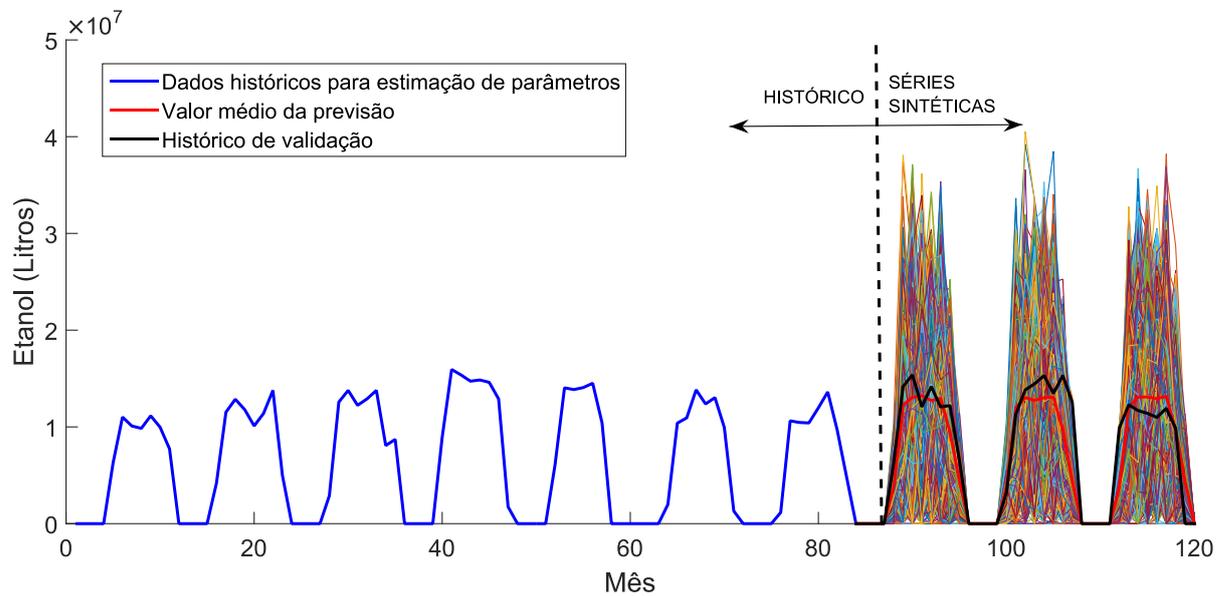


Figura 4.5 - Simulação de validação da variável aleatória produção de etanol.

Observa-se na Figura 4.5 que o modelo representa de forma confiável o comportamento da variável produção de etanol, pois as características de reversão a média e sazonalidade são preservadas.

Com o objetivo de comparação, a Tabela 4.4 apresenta a média aritmética simples dos dados históricos da produção de etanol, e a média das 2000 séries sintéticas geradas. Além do desvio padrão de ambos. Este fato confirma que o modelo estocástico empregado para previsão da produção do etanol é eficiente, pois as médias encontradas possuem valores bem próximos.

Tabela 4.4 - Comparação entre os dados históricos e simulação da variável aleatória produção de etanol.

	Média	Desvio Padrão
Histórico	6.839.486,33 [L]	4.315.065,88 [L]
Simulação	6.883.583,79 [L]	6.254.624,84 [L]

A Figura 4.6 apresenta as séries sintéticas da variável aleatória ao longo do período de análise, que compreende a vida útil do projeto.

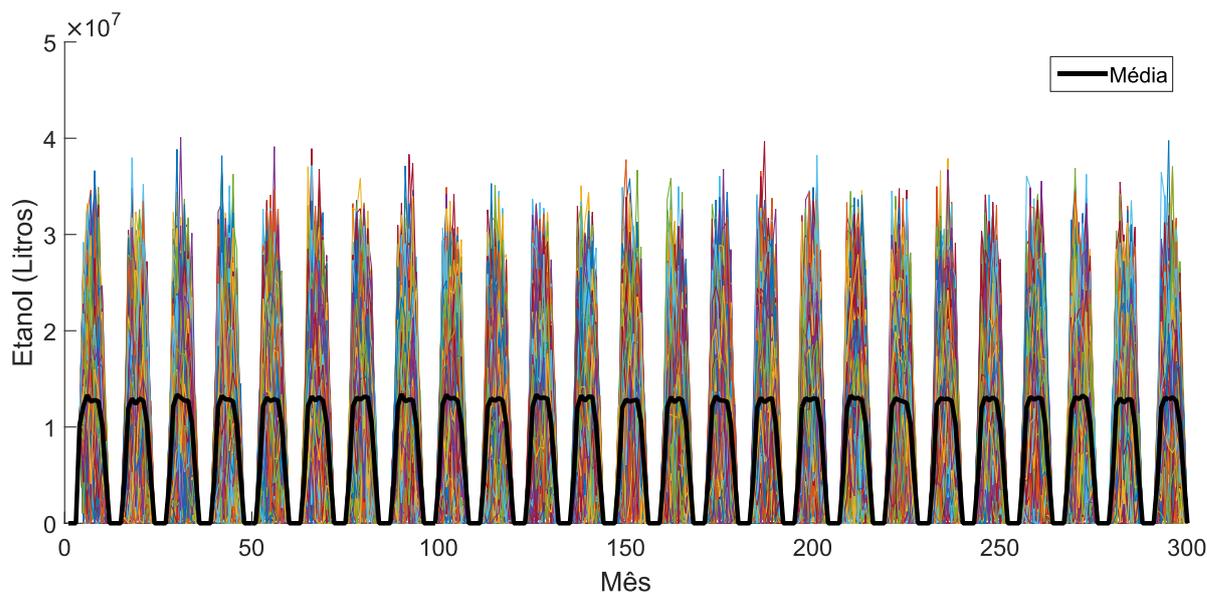


Figura 4.6 - Séries sintéticas da variável aleatória produção de etanol.

4.3 Modelo Estocástico da Variável Aleatória PLD

Nesta Seção são apresentados os dados históricos, os resultados dos testes estatísticos, os índices de sazonalidade e a validação do modelo estocástico da variável aleatória PLD.

4.3.1 Dados Históricos do PLD

A Figura 4.7 apresenta o histórico da variável aleatória PLD nominal²⁰ e deflacionado²¹. Tais dados foram coletado a partir dos valores médios mensais do patamar de carga média para o submercado Sudeste/Centro-Oeste. Esses dados são disponibilizados pela CCEE e abrangem o período de janeiro de 2006 a dezembro de 2017.

Nota-se na Figura 4.7 que o PLD apresenta períodos com o preço baixo e períodos com o preço alto. Tal variação de preço ocorre devido o preço da energia no sistema elétrico brasileiro estar diretamente relacionada com a afluência dos reservatórios, ou seja, no período úmido o preço tende a cair e no período seco o preço tende a aumentar, devido a necessidade de despacho de termelétricas para complementar a geração.

²⁰ É o valor tal e qual se apresenta.

²¹ Não apresenta os efeitos da inflação. Ele é aplicado para comparar valores ao longo do tempo, tomando-se uma determinada data como base. Conforme metodologia apresentada no Anexo C.

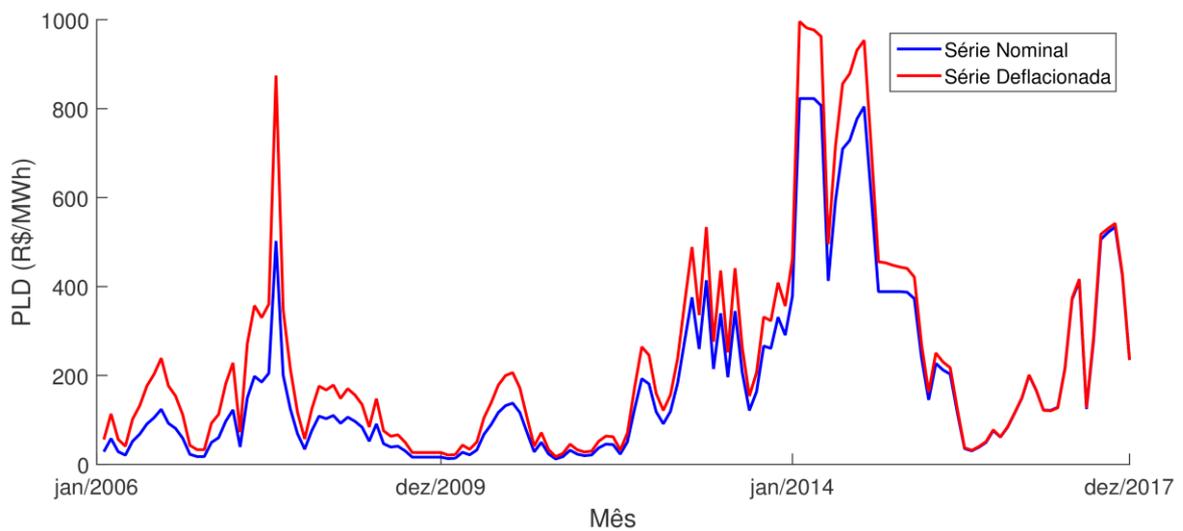


Figura 4.7 - Histórico do PLD submercado SE/CO.

4.3.2 Testes Estatísticos

A Tabela 4.5 apresenta o resultado do teste estatístico de Dickey-Fuller referente a variável aleatória PLD considerando o nível de confiança igual a 95%. Desta forma, para a aceitação da hipótese nula (H_0) de não-estacionariedade, a estatística t do teste deve apresentar valores menores que os valores críticos apresentados na Tabela 2.3, ou seja, $AR < -1,95$; $ARD < -2,86$ e $ARDT < -3,41$. Quando $H_0 = 1$, tem-se a rejeição da hipótese nula indicando que a série é estacionária.

Tabela 4.5 - Resultado do Teste de Dickey-Fuller com nível de significância igual a 5%.

		AR	ARD	ARDT
PLD (nominal)	Estatística t	-1,7885	-2,5304	-2,6091
	H_0	0	0	0
PLD (deflacionado)	Estatística t	-1,9644	-2,8367	-2,8543
	H_0	1	0	0

Pelos resultados apresentados na Tabela 4.5 constata-se que para a série nominal aceita-se a hipótese nula, isto é, trata-se de uma série não estacionária. Já para a série deflacionada nota-se que existe um modelo que rejeita a hipótese nula, indicando que a série pode ser modelada como uma série estacionária. Desta forma para a modelagem do PLD será utilizada a série deflacionada (PINTO, 2009; PINHEIRO NETO, *et al.*, 2017).

A Figura 4.8 apresenta o resultado do teste da razão da variância, o qual foi obtido por meio da equação (2.10).

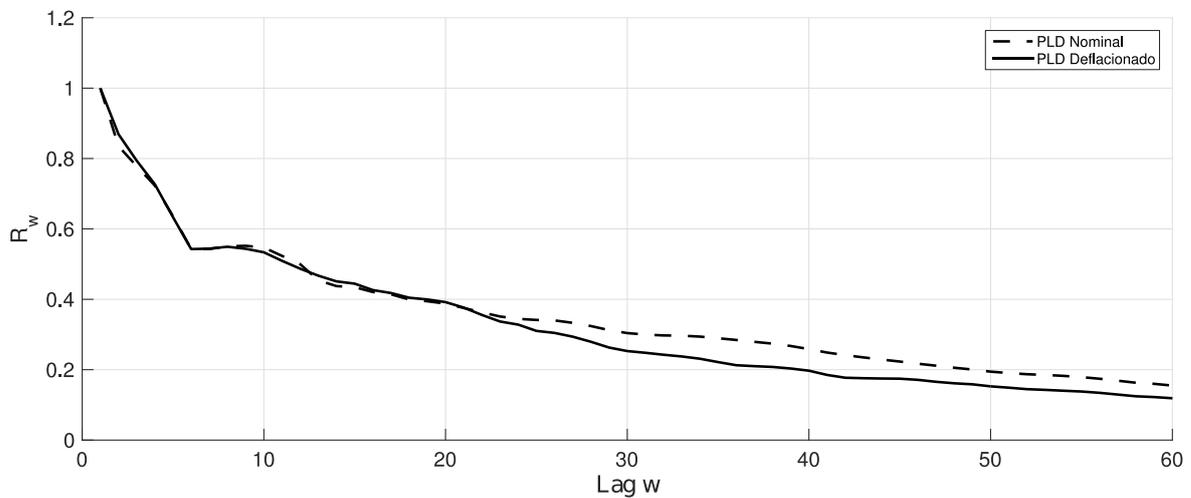


Figura 4.8 - Resultado do teste da Razão da Variância.

Nota-se na Figura 4.8 que, tanto para o PLD nominal quanto para o PLD deflacionado, as séries da razão da variância tendem a estabilizar em valor próximo a *zero*, o que indica que as séries seguem um processo estacionário e comportamento de reversão a média, o que confirma que para essa variável a modelagem por MRM é mais adequada do que por MGB.

4.3.3 Índices de Sazonalidade

Os índices de sazonalidade são calculados a partir dos dados históricos por meio da equação (3.1). São determinados em função do histórico da variável PLD, a qual apresenta valores que seguem uma média devido ao período de seca e chuva se repetirem anualmente. Tabela 4.6 apresenta os índices de sazonalidades para a variável aleatória PLD.

4.3.4 Validação do Modelo Estocástico

Para a simulação das séries sintéticas do PLD são considerados os limites estabelecidos pela ANEEL em 2018, sendo o PLD máximo igual a 505,18 R\$/MWh e o PLD mínimo igual a 33,68 R\$/MWh.

Para a validação do modelo estocástico do PLD, os dados históricos de janeiro de 2006 a dezembro de 2014 (9 anos) são usados para estimação de parâmetros da equação (3.3), e os dados históricos de janeiro de 2015 a dezembro de 2017 (3 anos) para validação.

Tabela 4.6 - Índices de sazonalidade.

Mês	Índice de Sazonalidade da Variável PLD
Janeiro	0,789
Fevereiro	0,827
Março	0,919
Abril	0,888
Mai	0,920
Junho	0,946
Julho	1,032
Agosto	0,988
Setembro	1,235
Outubro	1,227
Novembro	1,187
Dezembro	1,041

A Figura 4.9 apresenta a regressão linear, a qual é base para estimar os parâmetros do modelo com base na série histórica mensal dessazonalizada sem saltos do PLD.

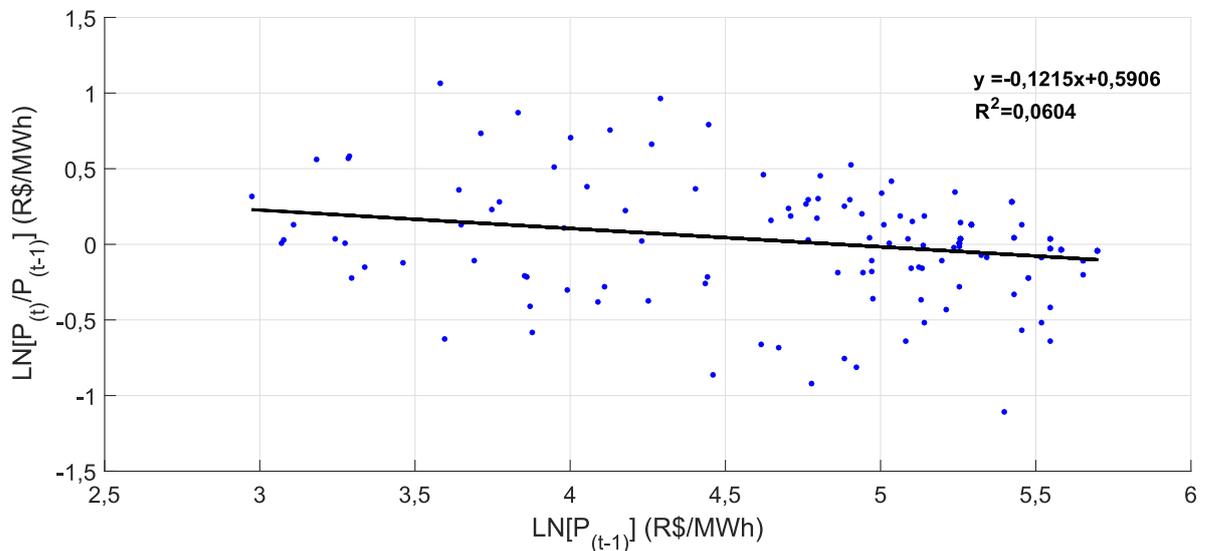


Figura 4.9 - Regressão linear para a série PLD.

A equação da regressão linear apresentada na Figura 4.9 indica que o coeficiente angular da reta é igual a -0,1215 e que o coeficiente linear é igual a 0,5906, o qual representa a interceptação da reta com o eixo vertical. Além disso, apresenta-se coeficiente de determinação (R^2), que representa a qualidade do ajuste do modelo, sendo igual a 0,0604. Com relação a reta obtida na

Figura 4.9, nota-se que à medida que $LN[P_{(t-1)}]$ aumenta, $LN[P_{(t)}/P_{(t-1)}]$ apresenta um leve declínio, o qual indica o comportamento de reversão à média.

A estimação dos parâmetros da modelagem seguiu a metodologia apresentada no Anexo B e são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros estimados.

PLD	
a	0,5906
b	0,8785
Erro padrão	0,3577
\bar{P} [R\$/MWh]	226,34
η_P	0,1295
σ_P [R\$/MWh]	0,3811
\emptyset	0,3472
\bar{k} [R\$/MWh]	254,92
γ [R\$/MWh]	236,12
Limite de salto [R\$/MWh]	235,85

Na Tabela 4.7, \bar{P} é o valor médio do PLD a longo prazo, indicando o nível de equilíbrio de longo prazo da variável; η_P representa a velocidade de reversão do PLD de longo prazo, sendo que quanto mais próximo de 1 mais rápido a série tende a reverter ao valor de longo prazo; σ_P é a volatilidade da PLD, a qual busca apresentar a medida de intensidade das perturbações estocásticas da variável; \emptyset é a frequência com que os saltos ocorrem; e \bar{k} e γ representam a média e o desvio padrão, respectivamente, da série de saltos.

A Figura 4.10 apresenta a simulação de validação, considerando o histórico do PLD descrito anteriormente. Devido à alta volatilidade do PLD, são apresentados apenas 5 cenários de previsão com o intuito de melhor visualizar a previsão da série.

A linha em vermelho, referente ao valor médio das séries sintéticas geradas, está bem próxima da linha em preto, que representa o histórico de validação.

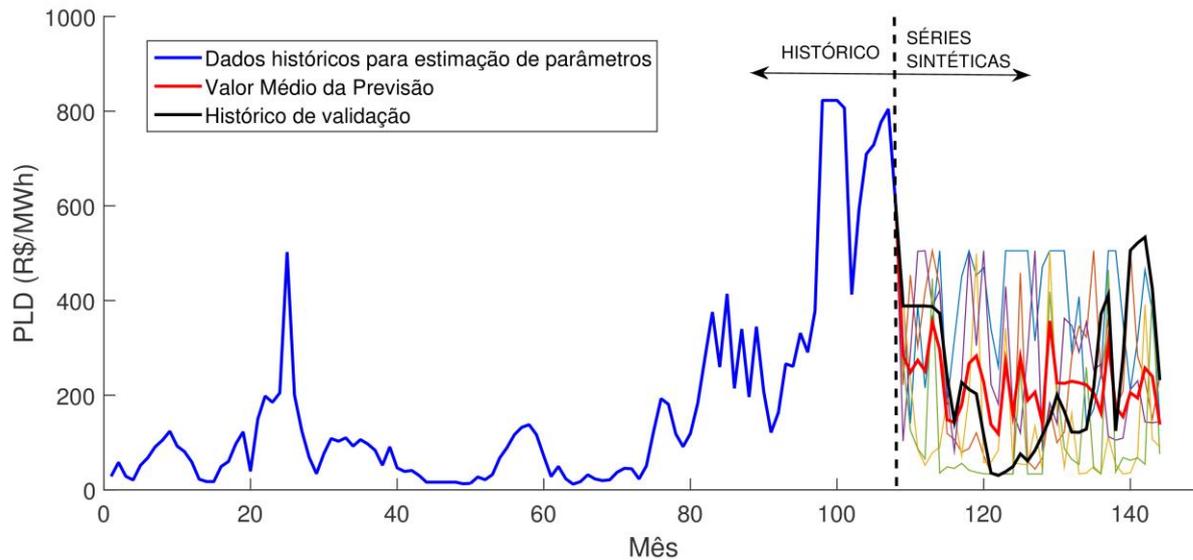


Figura 4.10 - Simulação para validação do PLD submercado Sudeste/Centro-Oeste.

Analisando a Figura 4.10, nota-se que o modelo representa adequadamente o comportamento da variável PLD, pois as características de reversão à média, sazonalidade e picos são preservadas.

A Tabela 4.8 apresenta a média do PLD calculado a partir dos dados históricos coletados, entre janeiro de 2006 a dezembro de 2017 e a média anual obtida a partir das simulações das séries sintéticas. Nota-se que os valores são bem próximos, o que indica que o modelo é adequado.

Tabela 4.8 - Comparação entre os dados históricos e simulação da variável aleatória PLD.

	Média	Desvio Padrão
Histórico	239,38 [R\$/MWh]	235,85 [R\$/MWh]
Simulação	232,36 [R\$/MWh]	151,93 [R\$/MWh]

A Figura 4.11 apresenta as séries sintéticas da variável aleatória ao longo do período de análise, que compreende a vida útil do projeto.

4.4 Correlação

O coeficiente de correlação apresenta a medida estatística que indica o grau de dependência linear entre as variáveis em análise, produção de etanol e PLD. Tais correlações são apresentadas na matriz de correlação (Tabela 4.9).

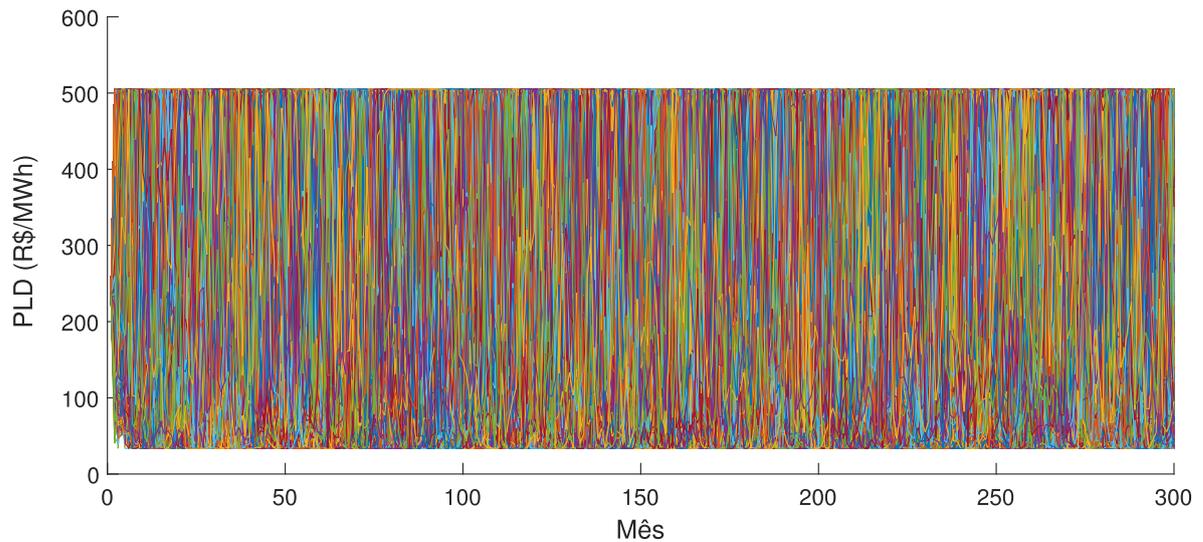


Figura 4.11 - Séries sintéticas da variável aleatória PLD ao longo do período de análise.

Para realizar a correlação é necessário o mesmo período de dados para ambas as variáveis. Desta forma, selecionou-se os dados históricos do período de janeiro de 2006 a dezembro de 2016.

Tabela 4.9 - Matriz de correlação.

Variáveis	Produção de Etanol	PLD
Produção de Etanol	1,0000	- 0,0658
PLD	- 0,0658	1,0000

Nota-se que a correlação entre as variáveis em análise é baixa. Isso ocorre pois não existe nenhum fator, na realidade, que justifique a dependência entre essas variáveis, indicando que elas são praticamente descorrelacionadas.

4.5 Obtenção dos Cenários da Variável Aleatória Produção de Vinhaça

Para a estimativa da produção da vinhaça, a constante k_{VE} , da equação (3.4), é determinada pela relação dos dados históricos da quantidade de vinhaça produzida pelo processo de fabricação do etanol e a quantidade de etanol produzida durante 10 anos.

Tal relação apresenta valores que variam de 10,68 a 12,06 litros de vinhaça gerada por litro de etanol produzido, sendo que a média desses valores é igual a 11,33. Este valor é para gerar as séries sintéticas da produção de vinhaça por meio da implementação da equação (3.4).

Na Tabela 4.10 são apresentados os dados históricos anuais da produção de etanol e de vinhaça durante os anos de 2006 e 2016, para determinar a constante k_{VE} .

Tabela 4.10 - Dados históricos para determinar a constante k_{VE} .

Safra	Vinhaça Produzida (L)	Etanol Produzido (L)	Vinhaça / Etanol
2006	668706608,72	60375045,90	11,08
2007	797611440,03	66130967,61	12,06
2008	861561315,06	80674748,40	10,68
2009	940882350,91	84948786,78	11,08
2010	1194978329,92	99077156,20	12,06
2011	779505628,66	72991230,42	10,68
2012	817864896,28	73841995,89	11,08
2013	877923819,54	72789768,00	12,06
2014	990853516,00	92781392,00	10,68
2015	1101791128,00	99476645,00	11,08
2016	941074315,00	78025655,00	12,06
Média da Quantidade de Vinhaça Gerada por Litro de Etanol			11,33

A Figura 4.12 apresenta a simulação dos 2000 cenários referentes as séries sintéticas da produção mensal de vinhaça.

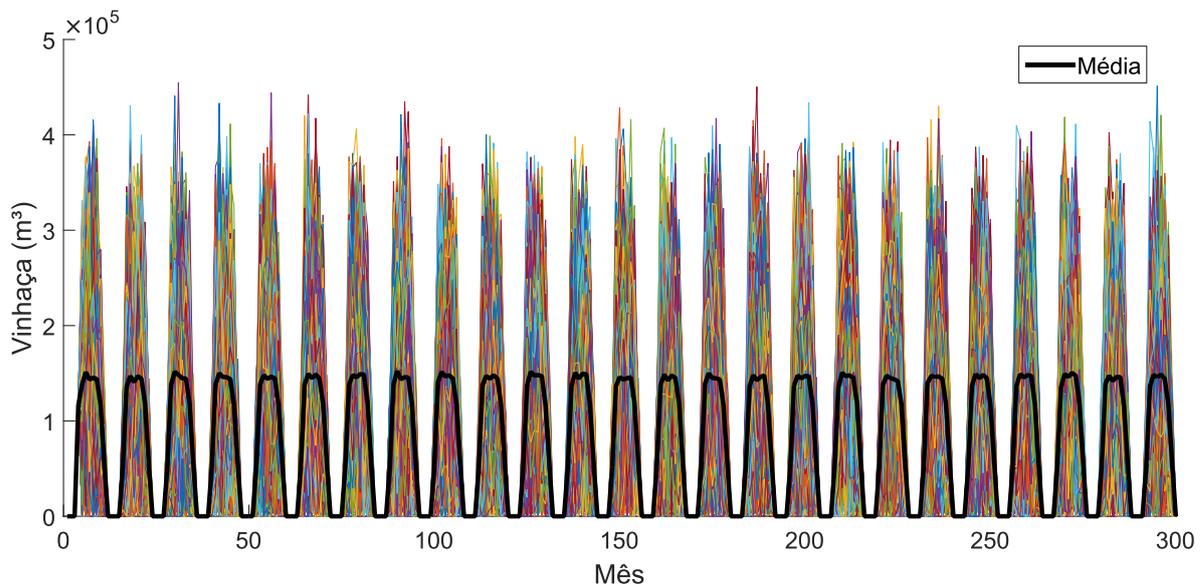


Figura 4.12 - Séries sintéticas da produção de vinhaça.

Observando a Figura 4.12, nota-se que o volume mensal máximo da produção de vinhaça em um determinado cenário e o volume médio de vinhaça a ser produzido, podem chegar a aproximadamente 460.000 m³ e 150.000 m³, respectivamente.

4.6 Dimensionamento do Reator UASB

Para dimensionar o reator modelo UASB, o mais indicado para o tratamento da vinhaça, são adotados os parâmetros apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Parâmetros para dimensionar o reator UASB.

Vazão diária de vinhaça	3.200 m ³ *
Temperatura da Vinhaça	60 °C *
Concentração do Substrato Afluente	45 kg.DQO/m ³ *
Carga Orgânica Volumétrica (COV)	30 kg.DQO/m ³ **

* Coletado junto a agroindústria.

** Segundo Chernicharo, 2016.

Por meio da equação (3.5), para a vazão apresentada na Tabela 4.11, o volume mínimo para que o reator suporte a vazão deve ser igual a 4.800 m³, com tempo de retenção de 36 horas, determinado por meio da equação (3.6). A concentração do substrato efluente, determinado por meio da equação (3.8), é igual a 26 kg DQO/m³.

4.7 Obtenção dos Cenários da Produção de Biogás

A Figura 4.13 representa os 2000 cenários gerados com base na implementação da equação (3.12) para a variável aleatória produção de biogás, em m³, obtidos a partir da biodigestão da vinhaça.

A Figura 4.13 mostra que o volume mensal máximo e o volume médio de biogás a ser produzido podem chegar a aproximadamente 554.000 m³ e 500.000 m³, respectivamente. É importante ressaltar que devido a limitação do reator não é aproveitado todo o volume de vinhaça disponível. O reator suporta determinada quantidade de vinhaça, a qual tem capacidade para gerar no máximo 554.000 m³ de biogás.

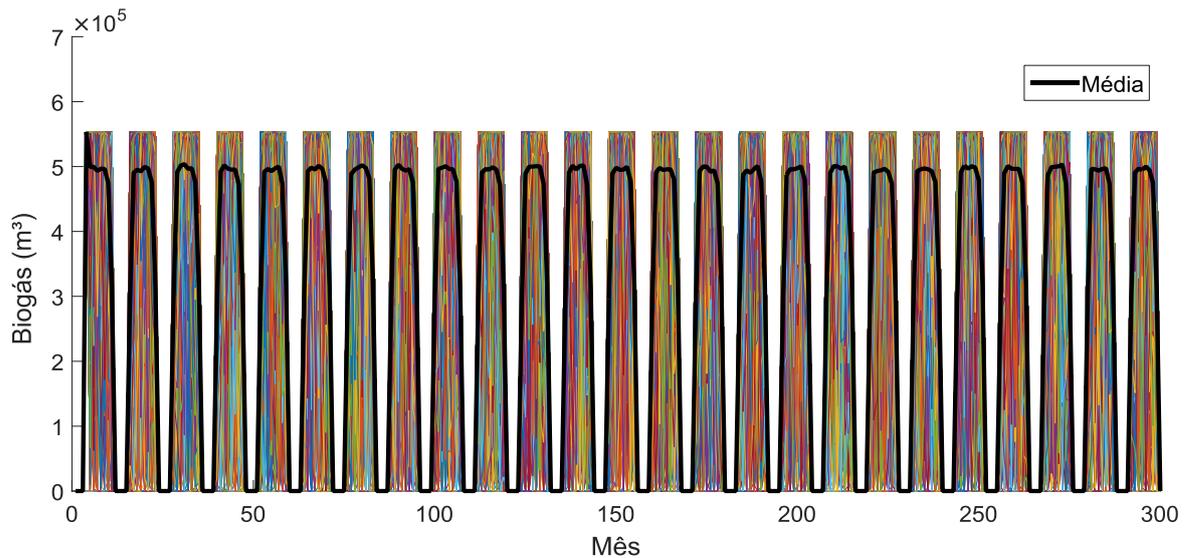


Figura 4.13 - Séries sintéticas do biogás obtido a partir da biodigestão da vinhaça.

4.8 Obtenção dos Cenários da Potência Elétrica Disponível

Para determinar a potência elétrica disponível adotou-se o poder calorífico inferior do biogás ($PCI_{\text{biogás}}$) igual a 5.9697 kWh/m^3 e a eficiência do grupo motor gerador (η_{GMG}) igual a 40% (SALOMON, 2007).

A partir das séries sintéticas da produção de biogás é possível obter os cenários, por meio da implementação da equação (3.13), que representam a potência elétrica produzida com o uso da tecnologia GMG de Ciclo Otto. A Figura 4.14 apresenta a simulação dos 2000 cenários da variável aleatória potência elétrica disponível no mês, em kW.

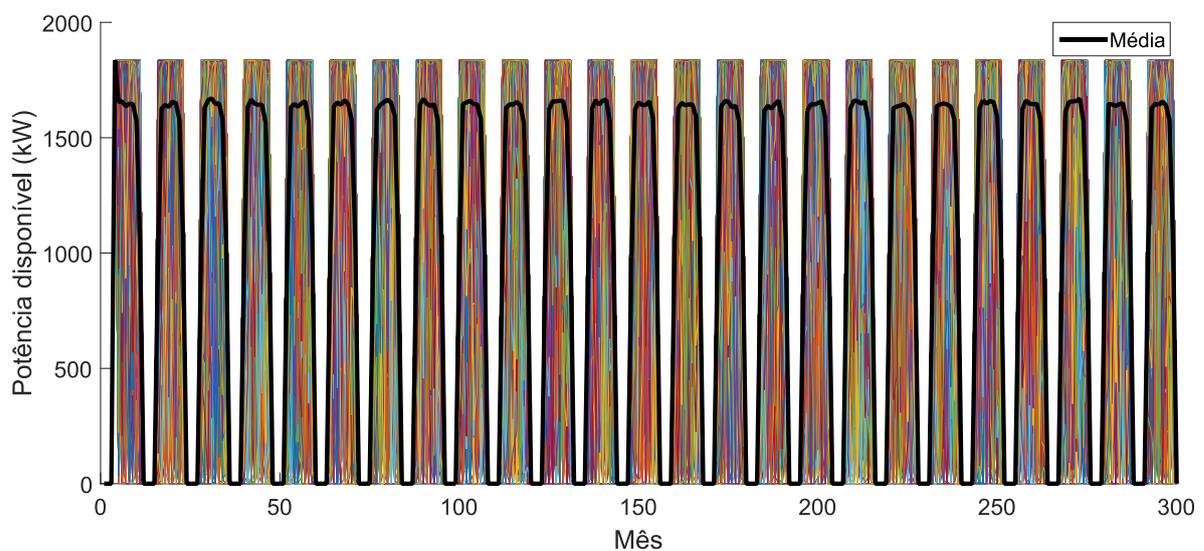


Figura 4.14 - Séries sintéticas da potência elétrica disponível.

Na Figura 4.14 nota-se que a potência elétrica produzida pode chegar ao pico máximo de 1835 kW no mês, sendo a média mensal próxima de 1600 kW/mês.

4.9 Obtenção dos Cenários da Energia Elétrica Gerada

Para determinar a energia gerada, considera-se que o GMG irá funcionar 24 horas por dia, durante 30 dias, 720 horas por mês. Implementando a equação (3.14) é possível encontrar os 2000 cenários referentes as séries sintéticas da energia elétrica gerada, conforme a Figura 4.15.

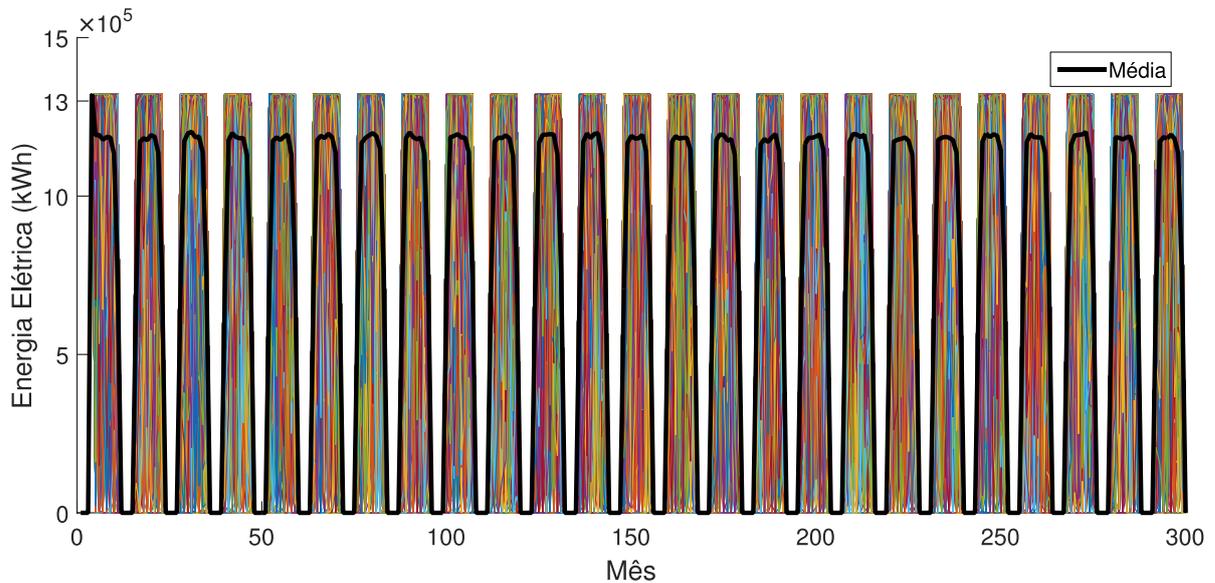


Figura 4.15 - Séries sintéticas da energia elétrica gerada.

Percebe-se na Figura 4.15 que a energia elétrica produzida é de aproximadamente 1,3 MWh/mês e o valor médio de produção está próximo de 1,2 MWh/mês. Além disso, é possível observar o efeito da sazonalidade oriunda da produção de etanol através dos meses onde não há produção de energia elétrica.

4.10 Alternativas de Comercialização da Energia Elétrica Gerada

São analisadas duas formas de comercialização da energia elétrica. Na primeira opção, toda energia produzida é comercializada no ACR onde o preço da energia elétrica é fixo. Já na segunda opção, a análise é realizada considerando que toda a energia gerada será negociada no ACL, ambiente este que tem como base o preço do PLD para valorar os montantes liquidados no mercado de curto prazo.

4.10.1 Opção 1 – Comercialização da Energia no ACR

Na primeira opção, toda a energia produzida é comercializada no ACR, onde o preço da energia elétrica é definido como o sendo o preço negociado para geração com biogás, no 23º Leilão de Energia Nova A-5 realizado em 2016, sendo esse igual a 251,00 R\$/MWh (MME, 2017)

A Tabela 4.12 apresenta os impostos aplicados à receita bruta no regime de tributação Lucro Presumido, o qual estabelece como limite de receita bruta anual igual a R\$ 78.000.000,00, e os demais dados necessários para a simulação.

Tabela 4.12 - Dados da simulação.

Custo de investimento do reator (R\$/m ³)	1006,77 ¹
Custo GMG 20 kW (R\$)	107.307,00 ²
Custo GMG 32 kW (R\$)	109.917,00 ²
Custo GMG 55 kW (R\$)	146.867,00 ²
Custo GMG 77 kW (R\$)	171.637,00 ²
Custo GMG 160 kW (R\$)	388.547,00 ²
Eficiência GMG (%)	40 ²
Vida útil do projeto (anos)	25
Preço da energia (R\$/MWh)	251,00 ³
Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (% a.a.)	8 ⁴
Taxa de Investimento (% a.a.)	8 ⁴
Taxa de Financiamento (% a.a.)	8,4 ⁵
Operação e Manutenção (R\$/m ³)	16,05 ¹
Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) (R\$/kWhmês)	1,5 ⁶
Taxa de inspeção da ANEEL aplicada na receita líquida (%)	5 ⁷
PIS ⁸	0,65 % da Receita Bruta
COFINS ⁸	3 % da Receita Bruta
CSLL ⁸	9 % sobre a base de cálculo de 12% da Receita Bruta
IR ⁸	1,2% até 240 mil/ano 2,0% sobre o excedente
Depreciação Linear (anos)	25

¹ Segundo dados da coletânea de publicações do PROBIOGÁS, 2017.

² Segundo a empresa ER-BR – Energia Renováveis Ltda.

³ Segundo 23º Leilão de Energia Nova A-5 realizado em 2016.

⁴ Igual ao Custo de Capital Próprio calculado por metodologia apresentada na NT nº 89/2014-SER/ANEEL.

⁵ Igual ao Custo de Capital de Terceiros calculado por metodologia apresentada da NT nº 89/2014-SER/ANEEL.

⁶ Segundo Tarifa de Uso da Transmissão da Resolução Normativa ANEEL - REN nº 559/2013.

⁷ Segundo os procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET) da Resolução Normativa nº 414/2010.

⁸ Receita Federal, 2018.

4.10.1.1 Fluxo de Caixa

Com o intuito de exemplificar os fluxos de caixa obtidos, é apresentado na Figura 4.16 o fluxo de caixa de um determinado cenário do ACR. O investimento inicial de R\$ 9.132.380,00, não está apresentado na Figura 4.16 por questão de escala.

Nota-se que em determinados meses só existem valores positivos, já em outros apenas valores negativos. Isto ocorre pois no período da safra ocorre a geração de energia elétrica por meio do biogás proveniente da vinhaça e a venda da mesma gera valores de receita que cobrem os impostos e os custos de operação e manutenção, gerando-se benefícios positivos para empresa. Já na entressafra ocorrem apenas valores negativos, pois, nesses meses não é produzida energia elétrica, mas os custos com manutenção e operação permanecem.

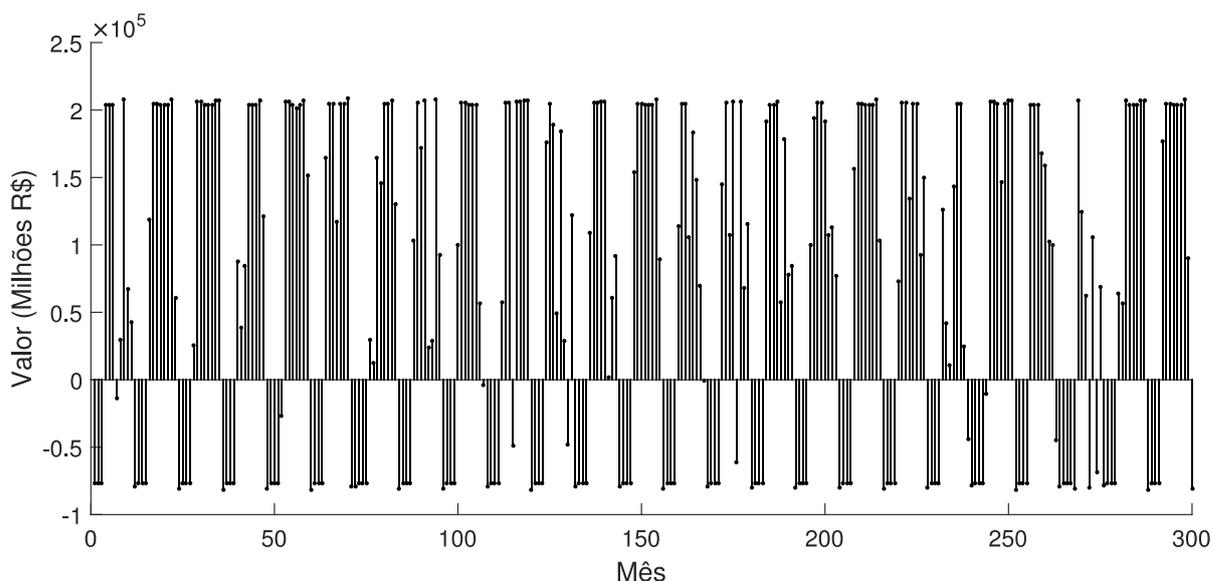


Figura 4.16 - Fluxo de caixa de um determinado cenário do ACR.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados encontrados para os indicadores VPL, TIRM e *Payback* Descontado, definidos nas equações (3.18), (3.19) e (3.20), respectivamente, para o cenário apresentado na Figura 4.16.

Tabela 4.13 - Indicadores do fluxo de caixa apresentado.

VPL	R\$ 701.792,51
TIRM	8,25 %
<i>Payback</i> Descontado	211,44 meses

Nota-se na Tabela 4.13 que os três indicadores referentes a análise de viabilidade econômica mostram que o projeto é viável. Pois, o VPL é maior que *zero*, a TIRM é maior que a TMA (8%) e o *Payback* Descontado, menor que a vida útil da usina.

4.10.1.2 Análise da distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido

A Figura 4.17 mostra a distribuição de probabilidade do VPL referente aos 2000 cenários de fluxo de caixa.

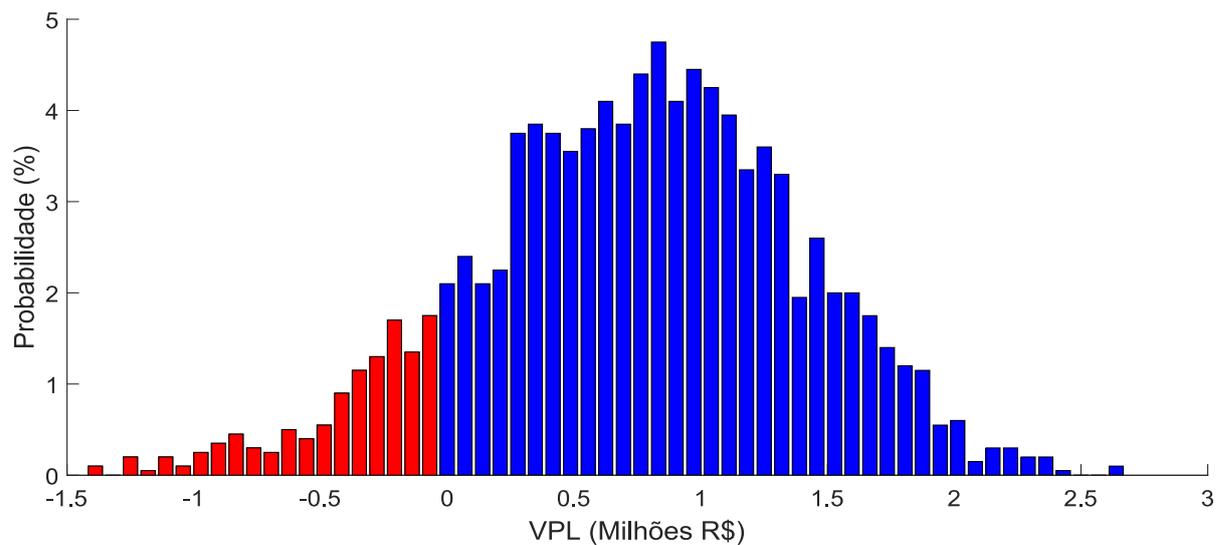


Figura 4.17 - Distribuição de Probabilidade do VPL da opção 1.

A área representada pela cor vermelha indica que o projeto é inviável ($VPL < 0$). Já a área em cor azul indica que o projeto é viável ($VPL \geq 0$).

Para esta análise, o valor esperado do VPL ($E[VPL]$) é igual a R\$ 714.398,23 e o risco ($\sigma[VPL]$) igual a R\$ 640.178,57. O risco é representado pelo desvio padrão em relação ao valor esperado. A probabilidade de não retorno do investimento para este caso é de 12,50%.

4.10.1.3 Análise da distribuição de probabilidade da Taxa Interna de Retorno Modificada

A Figura 4.18 apresentada a distribuição de probabilidade da TIRM. A área correspondente à cor vermelha indica a inviabilidade do projeto ($TIRM < TMA$), e a probabilidade de tal acontecimento é igual a 9,15 %. Já a área representada pela cor azul indica que o projeto é viável ($TIRM \geq TMA$).

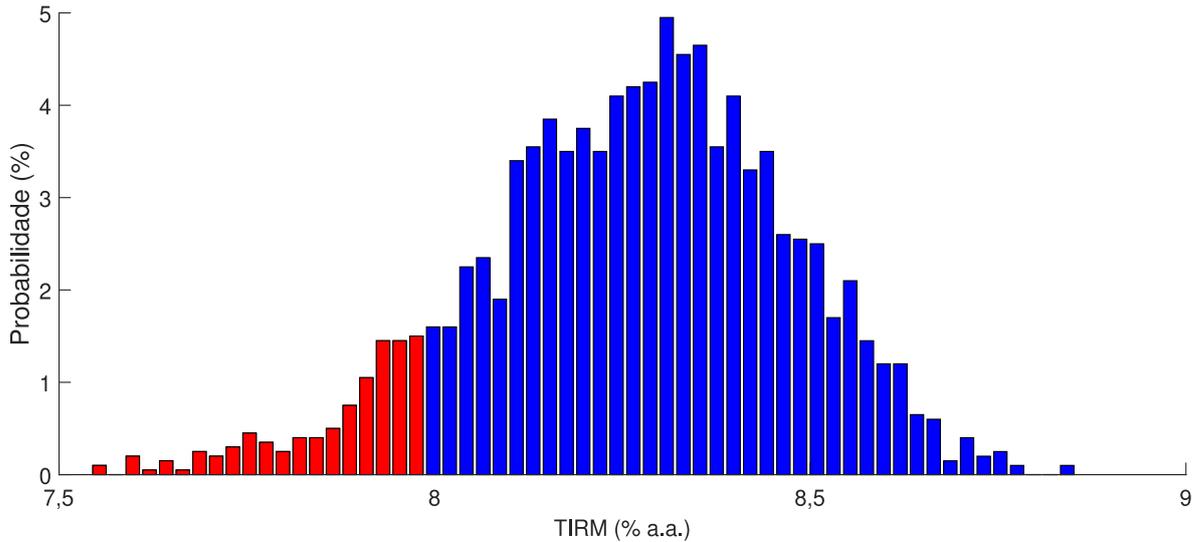


Figura 4.18 - Distribuição de Probabilidade da TIRM da opção 1.

Neste caso, encontrou-se o valor esperado da TIRM ($E[TIRM]$) igual a 8,26 %, e o risco ($\sigma[TIRM]$) igual a 0,21 %, o qual é representado pelo desvio padrão em relação ao valor esperado.

4.10.1.4 Análise da distribuição de probabilidade do *Payback Descontado*

A Figura 4.19 apresenta a distribuição de probabilidade do *Payback Descontado*. Nesta figura a área em azul representa a probabilidade dos valores do *Payback Descontado* serem menores que a vida útil do projeto, que no caso é 300 meses.

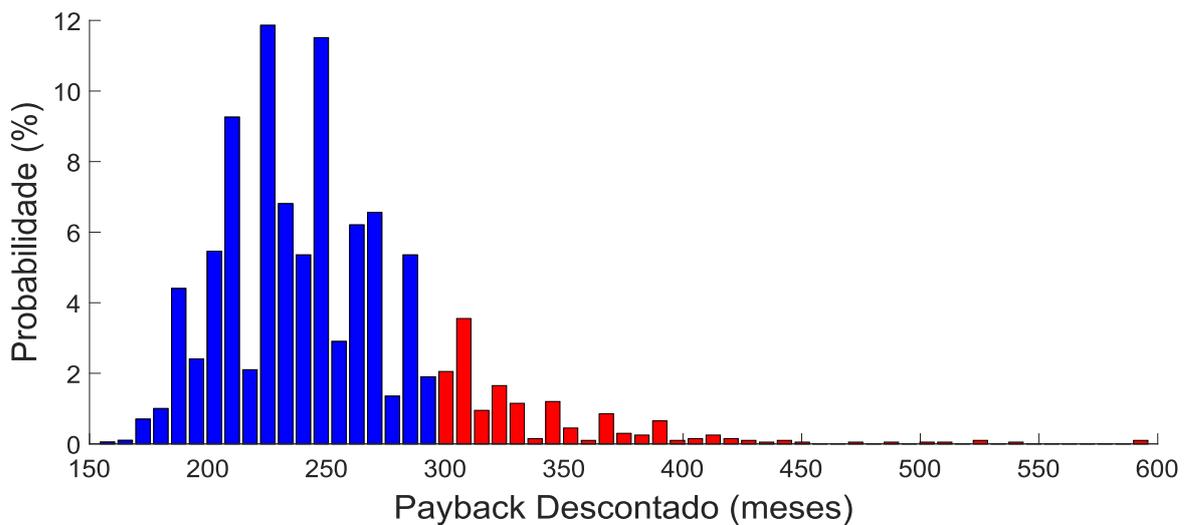


Figura 4.19 - Distribuição de Probabilidade do *Payback* da opção 1.

Na Figura 4.19 os cenários são simulados para 600 meses com o objetivo de apresentar a probabilidade de o retorno do investimento não ocorrer durante a vida útil do projeto (300 meses). Observa-se a viabilidade econômica do projeto para a maioria dos cenários simulados (86,79% dos cenários), pois, o retorno do investimento ocorrerá antes do final de sua vida útil. Já a área em vermelho indica a probabilidade dos valores do *Payback* Descontado serem maiores que a vida útil do projeto (13,21 % dos cenários), o que torna o mesmo inviável, pois o retorno do investimento só ocorrerá após os 300 meses. Neste caso encontrou-se o valor esperado do *Payback* ($E[\textit{Payback}]$) igual a 253 meses, o risco ($\sigma[\textit{Payback}]$) igual a 49,94 meses.

4.10.2 Opção 2 – Comercialização da Energia no ACL

Na segunda opção, toda energia produzida é comercializada no ACL. Considerou-se que o montante contratado é igual a 1,2 MW (aproximadamente a média de geração), e preço de contrato sendo negociado igual a 251,00 R\$/MWh (23º Leilão de Energia Nova A-5 realizado em 2016).

Com relação aos dados empregados na simulação, são aproveitados os apresentados anteriormente na Tabela 4.12. A diferença desta opção é que, neste ambiente, considera-se o preço do PLD para valorar os montantes liquidados no mercado de curto prazo.

4.10.2.1 Fluxo de Caixa

Com o intuito de exemplificar os fluxos de caixa obtidos, é apresentado na Figura 4.20 o fluxo de caixa de um determinado cenário do ACL.

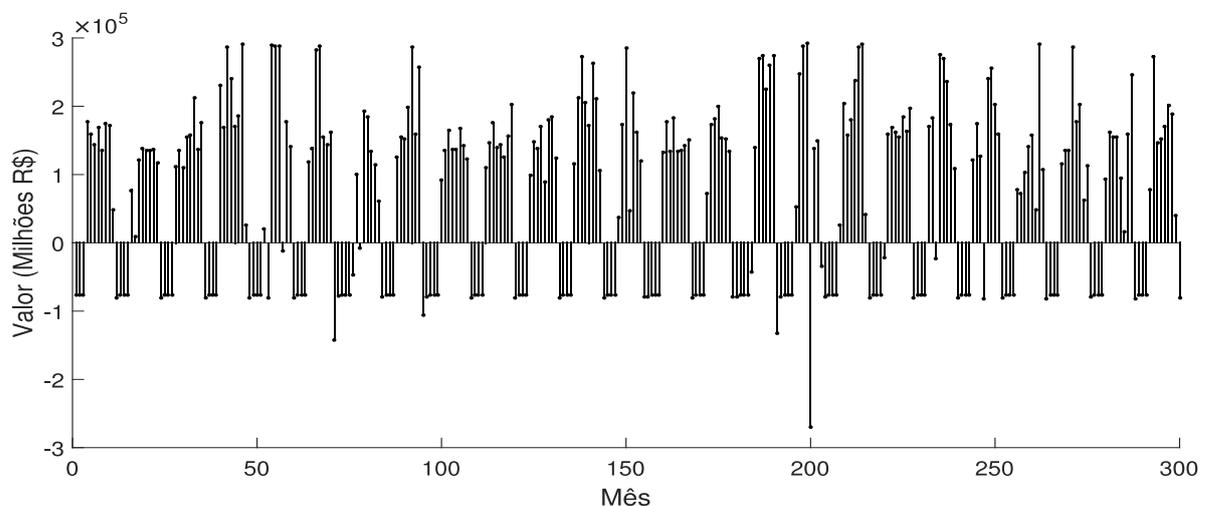


Figura 4.20 - Fluxo de caixa de um determinado cenário do ACL

O investimento inicial de R\$ 9.132.380,00, não está apresentado na Figura 4.20 por questão de escala.

Nota-se que em determinados meses só existem valores positivos, já em outros apenas valores negativos. Isto ocorre pois no período da safra ocorre a geração de energia elétrica por meio do biogás proveniente da vinhaça, e a venda da mesma gera valores de receita que cobrem os impostos e os custos de operação e manutenção, gerando-se benefícios positivos para empresa. Já na entressafra ocorrem apenas valores negativos, pois, nesses meses não é produzida energia elétrica, mas os custos com manutenção e operação permanecem.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados encontrados para os indicadores VPL, TIRM e *Payback* Descontado, definidos nas equações (3.18), (3.19) e (3.20), respectivamente, para o cenário apresentado na Figura 4.20.

Tabela 4.14 - Indicadores do fluxo de caixa apresentado.

VPL	R\$ 443.402,34
TIRM	8,17 %
<i>Payback</i> Descontado	246,14 anos

Nota-se na Tabela 4.14 que os três indicadores da análise de viabilidade econômica indicam viabilidade para projeto, pois, o VPL é maior que *zero*, a TIRM é maior que a TMA (8%) e o *Payback* Descontado, menor que a vida útil da usina.

4.10.2.2 Análise da distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido

A Figura 4.21 mostra a distribuição de probabilidade do VPL referente aos 2000 cenários de fluxo de caixa.

A área representada pela cor vermelha indica que o projeto é inviável ($VPL < 0$). Já a área na cor azul indica que o projeto é viável ($VPL \geq 0$).

Para esta análise, encontrou-se o valor esperado do VPL ($E[VPL]$) igual a R\$ 566.071,75 e o risco ($\sigma[VPL]$) igual a R\$ 753.363,34. O risco é representado pelo desvio padrão em relação ao valor esperado. A probabilidade de não retorno do investimento para este caso é de 21,45%.

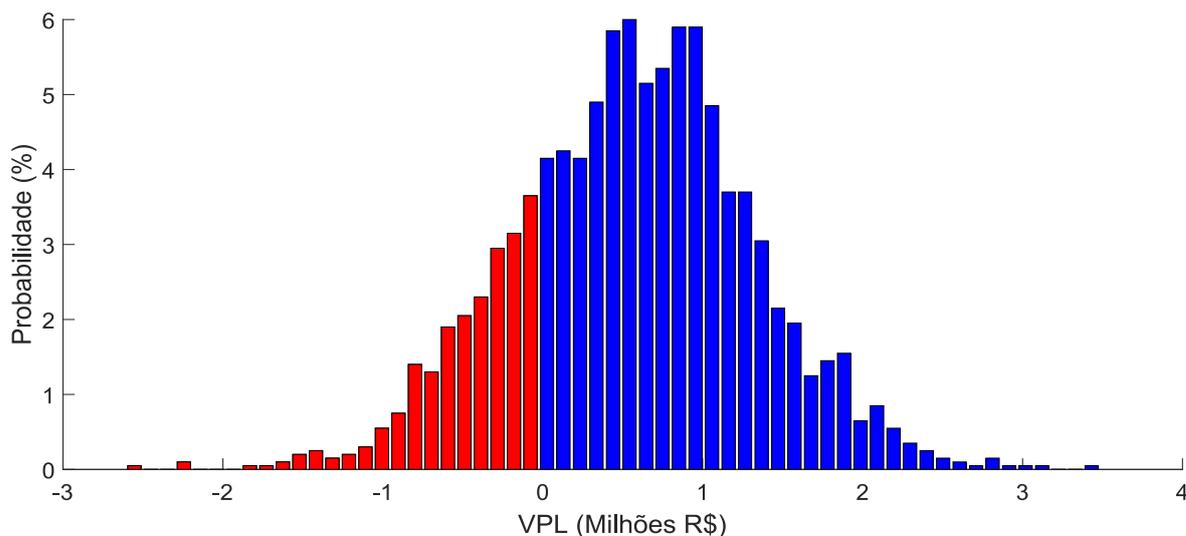


Figura 4.21 - Distribuição de Probabilidade do VPL da opção 2.

4.10.2.3 Análise da distribuição de probabilidade da Taxa Interna de Retorno Modificada

A Figura 4.22 apresenta a distribuição de probabilidade da TIRM. A área correspondente à cor vermelha indica a inviabilidade do projeto ($TIRM < TMA$), e a probabilidade de tal acontecimento é igual a 18,35 %. Já a área representada pela cor azul indica que o projeto é viável ($TIRM \geq TMA$).

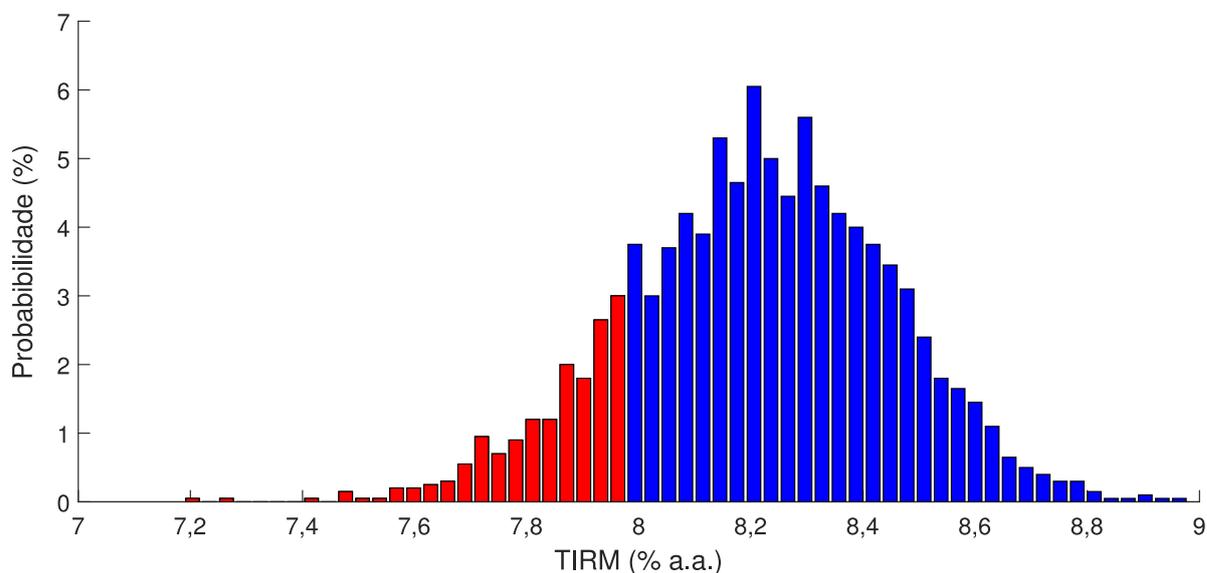


Figura 4.22 - Distribuição de Probabilidade da TIRM da opção 2.

Neste caso, encontrou-se o valor esperado da TIRM ($E[TIRM]$) igual a 8,20 %, e o risco ($\sigma[TIRM]$) igual a 0,24 %, o qual é representado pelo desvio padrão em relação ao valor esperado.

4.10.2.4 Análise da distribuição de probabilidade do *Payback Descontado*

A Figura 4.23 apresenta a distribuição de probabilidade do *Payback Descontado*. Nesta figura a área em azul representa a probabilidade dos valores do *Payback Descontado* serem menores que a vida útil do projeto, que no caso é 300 meses.

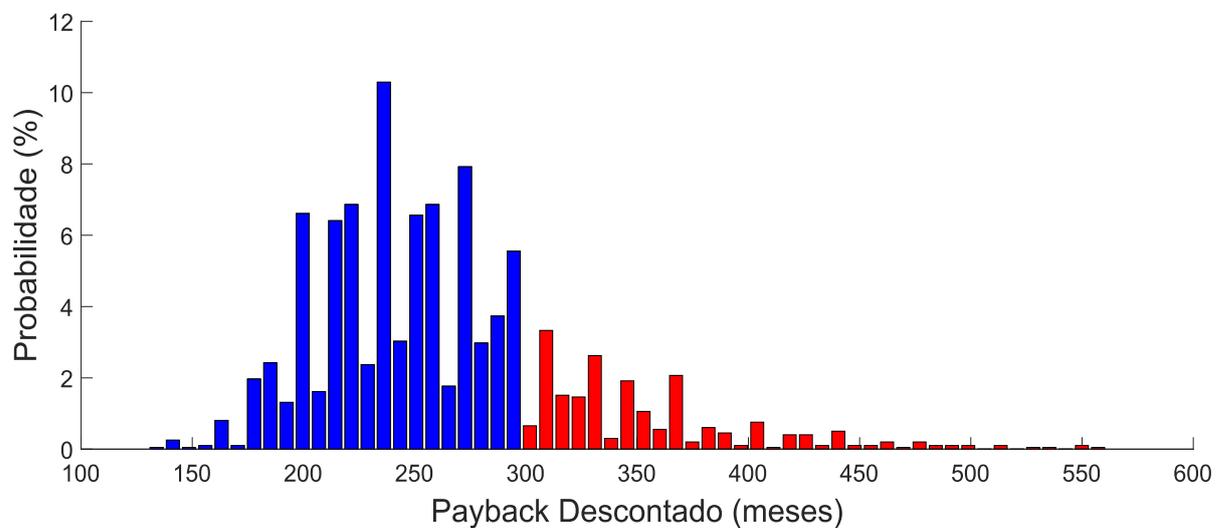


Figura 4.23 - Distribuição de Probabilidade do *Payback* da opção 2.

Tal distribuição indica a viabilidade do projeto para 77,63 % dos cenários, nos quais o retorno do investimento ocorrerá antes do final de sua vida útil. Já a área em vermelho indica a probabilidade de os valores serem maiores que a vida útil do projeto (22,37 % dos cenários), o que torna o mesmo inviável, pois o retorno do investimento só ocorrerá após os 300 meses.

Neste caso, encontrou-se o valor esperado do *Payback Descontado* ($E[Payback]$) igual a 266,39 meses, e o risco ($\sigma[Payback]$) igual a 63,94 meses. A probabilidade do projeto se pagar durante sua vida útil é de 77,63%.

4.10.3 Comparação entre as Alternativas Apresentadas

Nos dois ambientes de comercialização, as distribuições de probabilidade dos indicadores VPL, TIRM e *Payback Descontado*, mostraram que, para a maioria dos cenários gerados, é viável a

implantação do projeto. Os resultados de simulação poderão auxiliar no processo de tomada de decisão do investidor em relação a qual dos ambientes é melhor negociar.

A comercialização de energia elétrica no ACR apresentou $E[VPL]$ igual a R\$ 714.398,23, $\sigma[VPL]$ igual a R\$ 640.178,57 e probabilidade de não retorno do investimento de 12,50%. Já para a venda da energia elétrica no ACL, obteve-se $E[VPL]$ igual a R\$ 566.071,75 e $\sigma[VPL]$ igual a R\$ 753.363,34. Neste caso a probabilidade de não retorno do investimento foi de 21,45%. Nota-se que, o método do VPL indica que a comercialização no ACR é mais vantajosa, pois apresenta maior valor esperado do VPL menor risco e menor probabilidade de não retorno do investimento quando comparado com o ACL.

O $E[TIRM]$ e $\sigma[TIRM]$ se mostraram bem próximos para os dois ambientes de comercialização, 8,26 % e 0,21 %, para o ACR, e 8,20 % e 0,24 % para o ACL, respectivamente. A vantagem da comercialização no ACR está na probabilidade da viabilidade do projeto. No ACR 90,85 % dos cenários indicam a viabilidade do projeto, contra 81,65 % dos cenários no ACL.

Para a maioria dos cenários de simulação o projeto se paga durante sua vida útil do. Isto ocorreu tanto no ACR quanto no ACL, com probabilidades iguais a 86,79% e 77,63%, respectivamente. Tem-se então que, no ACR a comercialização da energia elétrica gerada apresenta índices melhores para os indicadores de viabilidade.

4.11 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é realizada variando os seguintes parâmetros que afetam o fluxo de caixa: vazão diária da vinhaça por dia (m^3/dia); preço da energia elétrica no ACR (R\$/MWh); montante contratado no ACL (MW); e a potência limite.

4.11.1 Vazão Diária de Vinhaça

A vazão diária da vinhaça impacta diretamente no custo de implantação do projeto. É por meio desta vazão que se determina o volume do reator, e quanto maior o reator maior o custo.

O volume do reator está relacionado com a quantidade de biogás que é produzido durante o processo de biodigestão anaeróbica. Quanto maior o volume do reator, mais vinhaça é despejada no mesmo, mais biogás é produzido, e conseqüentemente mais energia elétrica é gerada.

Para realizar a análise de sensibilidade deste parâmetro é considerado que a energia elétrica é comercializada no ACR. Desta forma, varia-se a vazão diária da vinhaça de 200 m³/dia até 4.000 m³/dia, valor mínimo e valor máximo, respectivamente, encontrados nos cenários gerados. A Figura 4.24 apresenta o comportamento E[VPL] e σ [VPL] em função do aumento da vazão diária da vinhaça, sendo que se utilizou discretização igual a 1 m³/dia.

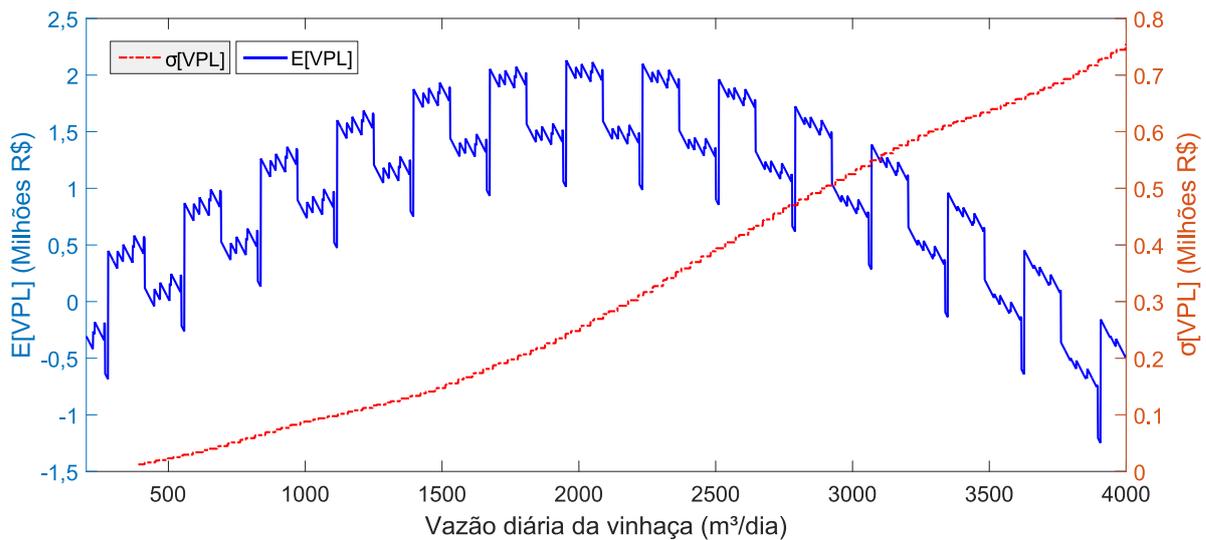


Figura 4.24 - E[VPL] e σ [VPL] em função da vazão diária da vinhaça.

Nota-se na Figura 4.24 que o E[VPL] tem comportamento crescente até o valor próximo de 2000 m³/dia, desta forma, os valores próximos a este são considerados dentro da faixa de valores ótimos. A partir deste valor, o E[VPL] passa a ter comportamento decrescente. O VPL é influenciado, dentre outros, pela geração de energia e pelo investimento inicial. A medida que a vazão diária de vinhaça aumenta, a geração de energia também aumenta e o fluxo de caixa é beneficiado com uma maior receita. Ao mesmo tempo, maior investimento inicial é necessário devido ao maior volume do reator, o que traz um impacto negativo no fluxo de caixa. A combinação destes dois parâmetros, geração de energia e investimento inicial, justificam o comportamento do E[VPL]. Até o valor próximo de 2000 m³/dia o benefício da maior geração de energia se sobrepõe ao impacto negativo do maior investimento inicial. Após este valor, ocorre o inverso, isto é, o investimento inicial passa a ter valor suficiente a ponto de diminuir o fluxo de caixa.

As variações regulares do E[VPL], representadas por picos e vales na Figura 4.24, ocorrem devido o cálculo da potência instalada, tendo como referência a potência limite, considerar a combinação dos GMGs, os quais possuem valores fixos (20 kW, 32 kW, 55 kW, 77 kW e 160

kW). Para cada valor de vazão diária de vinhaça é definido um valor de potência limite e, conseqüentemente, uma combinação diferente de GMGs. Adicionalmente, os GMGs com potências maiores possuem menor custo, afetando diretamente o $E[VPL]$.

Ainda na Figura 4.24 é possível observar o comportamento crescente do $\sigma[VPL]$, pois quanto maior a vazão diária de vinhaça, maior o volume do reator, permitindo uma maior variação dos cenários de produção de biogás devido à menor limitação de capacidade. Assim, o valor máximo de cada cenário de produção de biogás, limitado pela capacidade máxima do reator, é cada vez maior. Este fato permite maior variação de valores dentro dos cenários de biogás o que influencia diretamente no cálculo do risco (desvio padrão).

4.11.2 Preço da Energia Elétrica no ACR

O preço da energia elétrica no ACR é definido através de leilões de energia elétrica realizados pela CCEE, sendo a comercialização formalizada através de contratos CCEAR.

Para esta análise, considera-se a variação do preço da energia de 200 R\$/MWh até 300 R\$/MWh, variação de $\pm 20\%$ do valor apresentado na Tabela 4.10. Os resultados são apresentados na Figura 4.25.

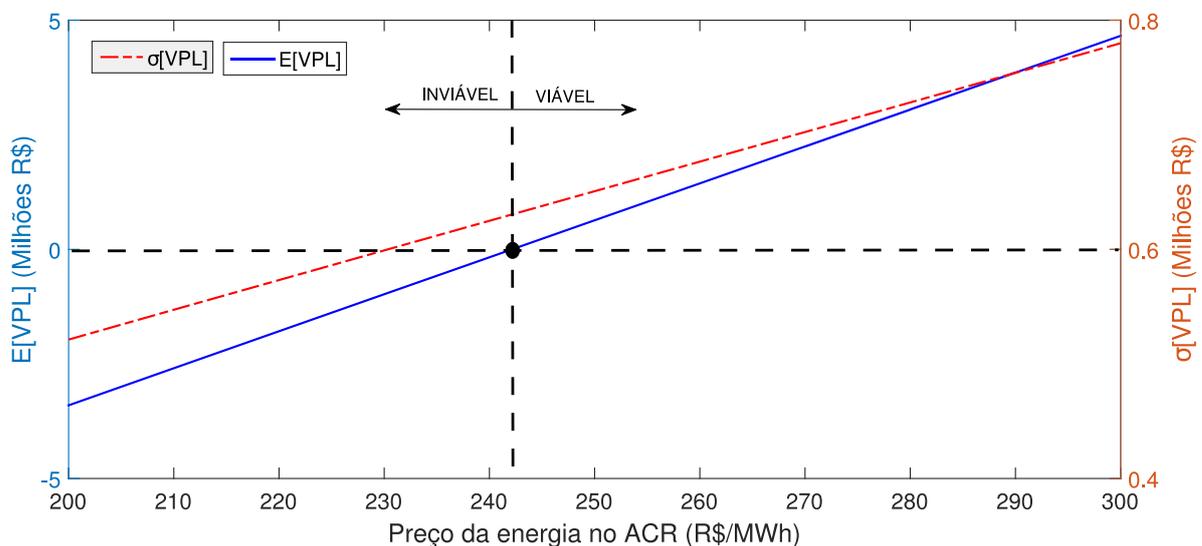


Figura 4.25 - $E[VPL]$ e $\sigma[VPL]$ em função do Preço da Energia no ACR.

Na Figura 4.25 nota-se que, se o preço da energia for maior que 242 R\$/MWh, o projeto torna-se viável, e se o valor for menor, o projeto torna-se inviável. De fato, o aumento do preço da

energia traz um aumento da receita e, conseqüentemente, um benefício econômico. Com relação ao $\sigma[\text{VPL}]$, o mesmo possui comportamento crescente, pois os valores de VPL tornam-se maiores. Por um outro lado, quando comparado com o $E[\text{VPL}]$, o $\sigma[\text{VPL}]$ possui valor relativo cada vez menor, indicando que o risco diminui proporcionalmente ao $E[\text{VPL}]$.

4.11.3 Montante Contratado no ACL

No ACL, os contratos bilaterais formalizam a compra e venda de energia elétrica entre os gerados e os consumidores. Nesses contratos são especificados livremente, sem a interferência da CCEE, o preço de venda de energia elétrica (P_C), o montante de energia que será comercializado (M) e o prazo do contrato.

A análise de sensibilidade é realizada considerando $P_C = 251,00$ R\$/MWh e o montante contratado variando de 1 MW até 1,6 MW, variação em torno de $\pm 20\%$ da garantia física da usina.

Deve-se ressaltar que não é permitido negociar montante maior que a garantia física. Neste estudo considera-se que a garantia física é igual à geração média da usina obtida nas simulações, sendo encontrado o valor próximo de 1,3 MW. Desta forma, o investidor deve negociar montantes menores que este valor.

A Figura 4.26 apresenta o comportamento do $E[\text{VPL}]$ e do $\sigma[\text{VPL}]$ em função do montante contratado. Nota-se que o $E[\text{VPL}]$ aumenta conforme o aumento do montante contratado. De fato, a parcela ($M \cdot P_C \cdot t$) de (3.16) aumenta com o aumento de M . Ao mesmo tempo, a diferença entre a geração e o montante contratado é liquidada no mercado curto prazo ao preço do PLD, sendo determinada pela parcela ($[E_{E_{t+1}} - M] \cdot PLD \cdot t$) de (3.16) e, quanto maior o M , menor o valor desta parcela. Então, existem duas parcelas em conflito e, sendo o valor do P_C (251,00 R\$/MWh) maior que o valor médio do PLD simulado (231,64 R\$/MWh), logo, a primeira parcela se sobrepõe à segunda, induzindo o $E[\text{VPL}]$ aumentar.

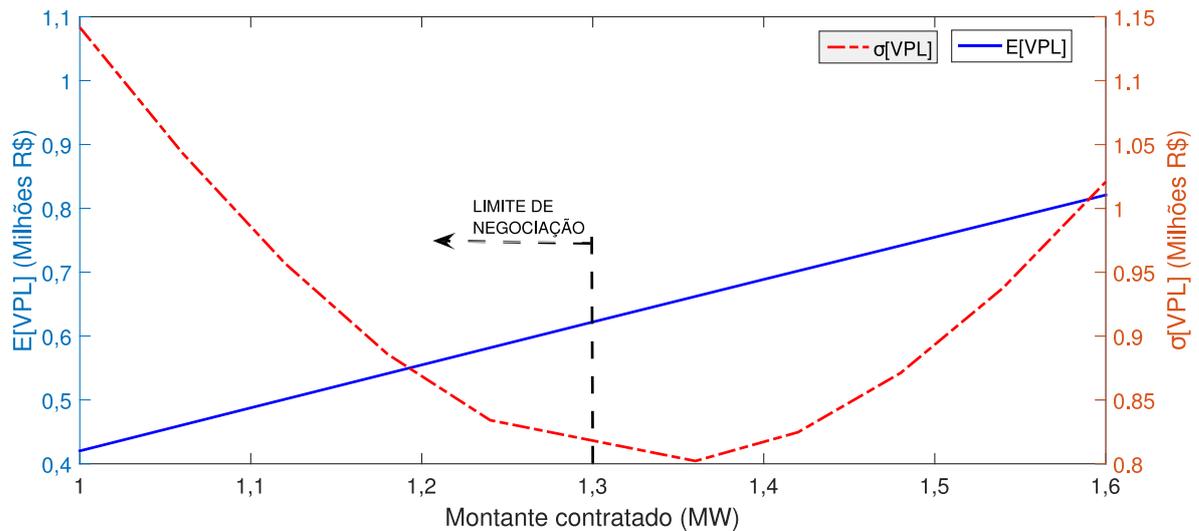


Figura 4.26 - $E[VPL]$ e $\sigma[VPL]$ em função do montante contratado.

Conforme observado na Figura 4.26, o menor valor do $\sigma[VPL]$ é encontrado quando M é aproximadamente 1,4 MW, ou seja, próximo à garantia física considerada (1,3 MW). De fato, valores de M próximos da geração média da usina trazem menor exposição ao mercado de curto prazo (PLD), o qual apresenta relevante volatilidade.

4.11.4 Potência Limite

Na Seção 3.7, a potência limite é calculada com base nos cenários da potência elétrica disponível. Cada valor de vazão diária da vinhaça define um valor de potência limite. Para esta análise, considera-se três valores constantes para a potência limite, não sendo dependente da vazão diária de vinhaça. Desta forma, é possível verificar a influência da potência limite na análise de viabilidade econômica. Ao mesmo tempo, considera-se variações da vazão diária da vinhaça para análise conjunta dos dois parâmetros: potência limite e vazão diária da vinhaça.

O comportamento do $E[VPL]$ em função dos parâmetros potência limite e vazão diária da vinhaça é apresentado na Figura 4.27.

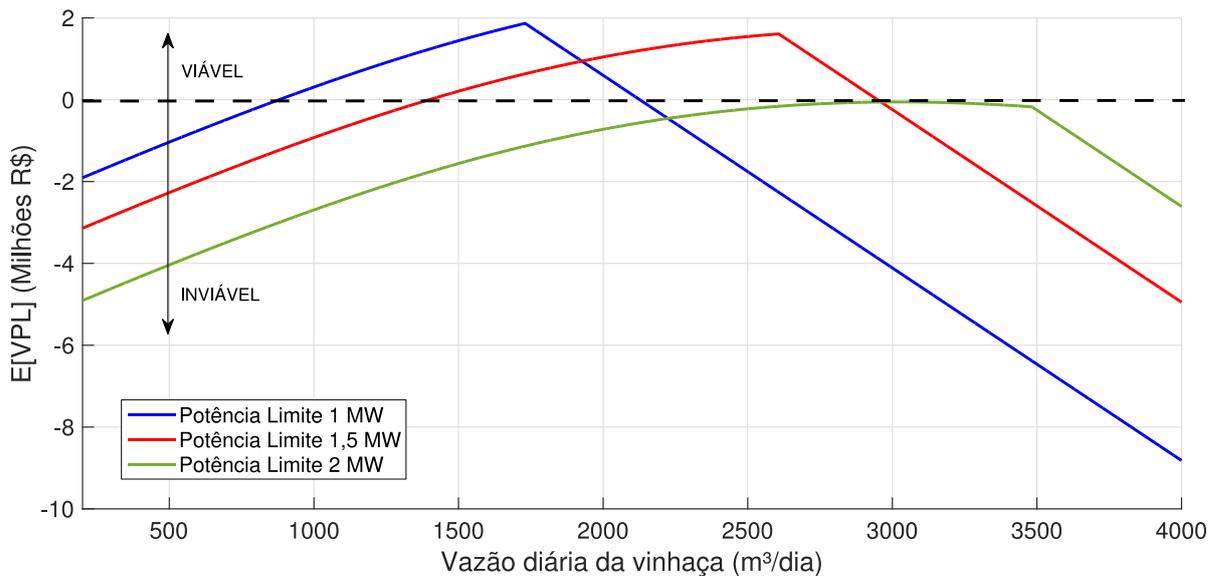


Figura 4.27 - E[VPL] em função da potência limite e da vazão diária da vinhaça.

Observa-se na Figura 4.27 que, para um dado valor de potência limite, o comportamento crescente e decrescente do E[VPL] é similar ao da Figura 4.24, cabendo as mesmas explicações dadas anteriormente. Verifica-se que o melhor resultado econômico, dentre os três valores de potência limite analisados, se dá para o valor de 1,5 MW, pois a curva indica viabilidade do projeto para um maior faixa de vazão diária da vinhaça quando comprado com as demais curvas.

De fato, valores menores de potência limite implicam valores menores de potência instalada e, conseqüentemente, valores menores de geração de energia elétrica. Por outro lado, valores maiores de potência limite implicam maiores valores de investimento inicial e, conseqüentemente, valores menores de fluxo de caixa. Desta forma, existe valor intermediário de potência limite que fornece melhor resultado econômico.

No caso da Figura 4.27, não se observa a variação regular do E[VPL], como na Figura 4.24, pois a potência limite é constante e corresponde a um único valor de potência instalada.

Na Figura 4.28 observa-se que o $\sigma[VPL]$ apresenta comportamento crescente similar ao observado na Figura 4.24, cabendo as mesmas explicações dadas anteriormente. O $\sigma[VPL]$ se torna constante a partir de determinado momento devido a variação de valores dentro dos cenários de biogás serem parecidas, o que influencia diretamente no cálculo do risco (desvio padrão).

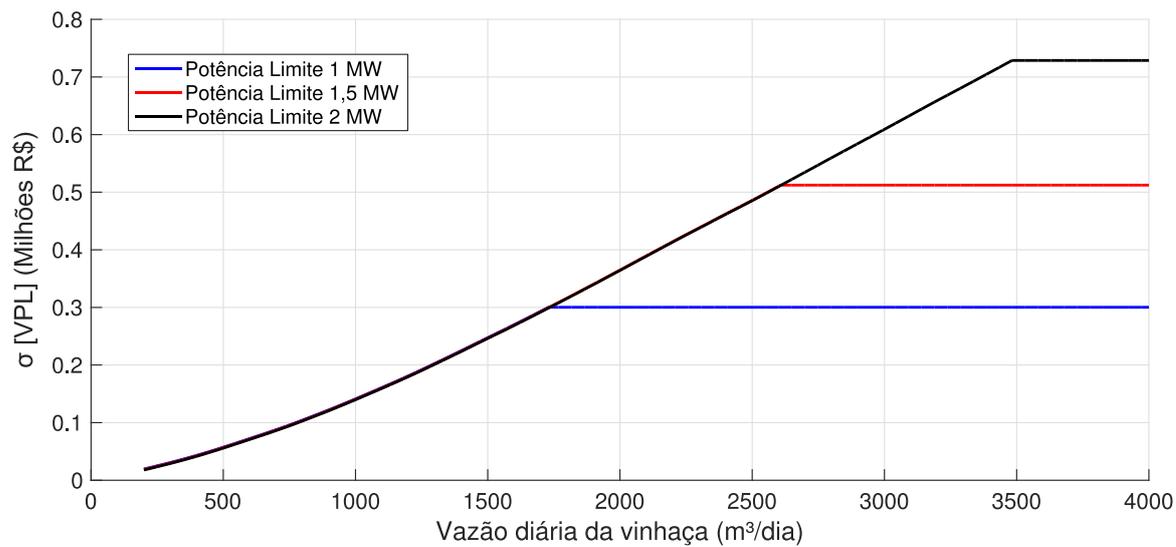


Figura 4.28 - σ [VPL] em função da vazão diária da vinhaça e a potência limite.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação propôs a aplicação de uma metodologia de análise de risco voltada para investimentos em geração de energia elétrica proveniente do biogás, sendo este obtido através da biodigestão anaeróbica da vinhaça gerada no processo de produção do etanol em agroindústrias sucroenergéticas.

Primeiramente modelou-se as variáveis aleatórias produção de etanol, com base nos dados históricos mensais coletados junto a agroindústria, e PLD, com base nos dados disponibilizados pela CCEE. Tais modelagens foram validadas com base nos dados históricos das mesmas, com o intuito de preservar as características de reversão a média, volatilidade, sazonalidade e picos (no caso do PLD).

A partir da geração das séries sintéticas da produção de etanol foram geradas as séries sintéticas da vazão da vinhaça, por meio da relação existente entre essas variáveis, e com base nos dados obtidos junto a agroindústria onde realizou-se o estudo de caso. Para se obter o biogás é necessário que a vinhaça seja submetida ao processo de biodigestão, o qual pode ocorrer em um reator UASB, o mais indicado para a vinhaça.

Para dimensionar o reator, adotou-se um valor fixo da vazão diária da vinhaça, o qual foi fornecido pela agroindústria. Este valor influencia diretamente no dimensionamento do reator, e também na produção de biogás. Após obter o volume adequado do biodigestor para o estudo de caso obteve-se as séries sintéticas da produção de biogás.

Considerando GMGs com eficiência de 40% e operando 720 horas por mês, foram obtidas as séries sintéticas da energia elétrica, considerando a queima do biogás. O pico máximo de geração de energia elétrica é de aproximadamente 1,3 MWh/mês, montante este que foi considerado como garantia física da usina. A sazonalidade observada no histórico da produção de etanol (período de safra e entressafra), se mantém presente durante a geração de todas as séries sintéticas.

A alternativa de comercialização da energia elétrica gerada que se apresentou mais vantajosa pelos três métodos analisando (VPL, TIRM e *Payback* Descontado) foi no ACR, pois apresenta melhores índices para os indicadores de viabilidade.

Para auxiliar na tomada de decisão sobre investir ou não no projeto, foi realizada a análise de sensibilidade de alguns parâmetros que afetam o fluxo de caixa e a viabilidade econômica do projeto.

Como a vazão diária da vinhaça impacta diretamente no custo de implantação do projeto, notou-se, por meio da análise de sensibilidade, que até o valor próximo de 2000 m³/dia o valor E[VPL] tem comportamento crescente, indicando que o projeto é viável para esta faixa de valores.

Analisou-se também o preço da venda da energia no ACR, variando de 200 R\$/MWh a 300 R\$/MWh. Observou-se em tal variação que se o preço da energia for maior que 242 R\$/MWh, o projeto torna-se viável, e se o valor for menor, o projeto torna-se inviável.

O montante contrato no ACL é outro parâmetro que afeta a viabilidade econômica do projeto. Notou-se que o menor risco encontra-se próximo $M = 1,4 MW$, pois valores mais próximos de M indicam menor exposição ao mercado de curto prazo.

Para finalizar a análise de sensibilidade, analisou-se a influência da potência limite na análise de viabilidade econômica. Para isso considerou-se as variações da vazão diária da vinhaça juntamente com potência limite. Foi possível concluir que o melhor resultado econômico, dentre os três valores de potência limite analisados, ocorreu para o valor de 1,5 MW.

É importante ressaltar que os modelos adotados são específicos para o Brasil, pois são empregadas as condições políticas e econômicas nacionais, mas que podem ser adaptadas para outros países.

5.1 Artigos

Publicados em Congressos

L. S. Pinto; E. G. Domingues; D. Pinheiro Neto; S. Ramalho; M. H. E. Tschudin; G. P. Medeiros. **Risk Analysis of the Electric Power Generation Potential from Biogas Coming from Vinasse Biodigestion.** In: IEEE II Congreso Chileno De Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Tecnologías De La Información Y Comunicaciones (IEEE CHILECON 2017). Pucón, 2017.

L. S. Pinto; D. Pinheiro Neto; E. G. Domingues. **Investment risk analysis of electricity generation from vinasse biodigestion in the Brazilian Regulated Market.** In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'18). Salamanca, 2018.

L. S. Pinto; D. Pinheiro Neto; E. G. Domingues. **Investment Risk Analysis of Electricity Generation from Vinasse Biodigestion in the Free Contracting Environment.** In: IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 18). Palermo, 12-15 junho 2018.

5.2 Software

Foi solicitado junto ao Centro de Inovação Tecnológica (CITE) do Instituto Federal de Goiás o registro do software desenvolvido para a análise de risco proposta neste trabalho.

5.3 Sugestões de melhorias e trabalhos futuros

- Quantificar as emissões de CO₂ equivalente totais deste tipo de projeto através do emprego de metodologia específica do IPCC;
- Inserir na análise de viabilidade econômica a comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas;
- Elaborar metodologia semelhante para a análise de viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás a partir da biodigestão do bagaço da cana;
- Analisar a viabilidade econômica de outras tecnologias para aproveitamento do biogás para geração de eletricidade;
- Inserir as flexibilidades operacionais na análise de viabilidade econômica destes tipos a partir da Teoria das Opções Reais. Neste sentido, poder-se-ia considerar: i) flexibilidade operacional, em relação a produção do etanol e/ou açúcar; ii) flexibilidade de adiar a venda imediata de energia, através da estocagem do biogás; iii) suspensão temporária da comercialização da energia elétrica produzida em função do preço *spot*, etc.

ANEXO A

Estimação de parâmetros para o processo de reversão à média aritmético

Para estimar os parâmetros do processo de reversão à média aritmético é adotada a metodologia descrita a seguir que pode ser encontrada em (DIXIT e PINDICK, 1994; PINTO, 2009).

Primeiramente é realizada uma regressão linear simples com $x_t - x_{t-1}$ como variável dependente, e x_{t-1} como variável independente, dada por (A.1):

$$x_t - x_{t-1} = a + (b - 1) \cdot X_{t-1} \quad (\text{A.1})$$

Após, calcula-se os parâmetros a partir dos valores estimados obtidos através da regressão linear da série por meio de (A.2), (A.3), (A.4), onde σ_ε é o erro padrão de regressão.

$$\eta = -\frac{\ln(b)}{\Delta t} \quad (\text{A.2})$$

$$\bar{X} = -\frac{a}{(b - 1)} \quad (\text{A.3})$$

$$\sigma = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{2 \ln(b)}{(b^2 - 1)\Delta t}} \quad (\text{A.4})$$

Em que, a é o coeficiente linear; b o coeficiente angular; e Δt a variação do tempo em um determinado intervalo.

ANEXO B

Estimação de parâmetros para o processo de reversão à média geométrico

Para estimar os parâmetros do processo de reversão à média aritmético é adotada a metodologia descrita a seguir que pode ser encontrada em (DIXIT e PINDICK, 1994; PINTO, 2009).

Primeiramente é necessário escrever o processo em termos do intervalo de temporal discreto Δt , conforme (B.1).

$$x_t - x_{t-1} = \bar{x} \cdot (1 - e^{-\eta\Delta t}) + (e^{-\eta\Delta t} - 1) \cdot x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (\text{B.1})$$

Em (B.1), ε_t é o erro da série, denominado como ruído branco.

Após, substitui-se $x_t = \ln(Y)$ e $\bar{x} = \ln(\bar{Y}) - \sigma^2/2\eta$

$$\ln(Y_t/Y_{t-1}) = (1 - e^{-\eta\Delta t}) \cdot (\ln(\bar{Y}) - \sigma^2/2\eta) + (e^{-\eta\Delta t} - 1) \cdot \ln(P_{t-1}) \quad (\text{B.2})$$

Adotando: $a = (1 - e^{-\eta\Delta t}) \cdot (\ln(\bar{Y}) - \sigma^2/2\eta)$ e $(b - 1) = (e^{-\eta\Delta t} - 1)$, tem-se:

$$\ln(Y_t/Y_{t-1}) = a + (b - 1) \cdot \ln(P_{t-1}) \quad (\text{B.3})$$

Considerando (B.3) realiza-se a regressão linear de Y_t , e após calcula-se os parâmetros a partir dos valores estimados obtidos através da regressão linear da série por meio (B.4), (B.5), (B.6), onde σ_ε é o erro padrão de regressão.

$$\eta = -\frac{\ln(b)}{\Delta t} \quad (\text{B.4})$$

$$\bar{X} = \exp \left[\frac{a}{(1 - b)} + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{(1 - b^2)} \right] \quad (\text{B.5})$$

$$\sigma = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{2 \ln(b)}{(b^2 - 1)\Delta t}} \quad (\text{B.6})$$

ANEXO C

Deflacionamento do PLD

Pinheiro Neto (2017) realiza o processo de deflacionamento de preços através das três etapas descritas a seguir:

1) Padronização da moeda: conversão de determinado padrão monetário vigente no passado para a moeda atual, em reais (R\$). Tal etapa pode ser dispensada pois os dados coletados apresentam mesma moeda.

2) Mudança da base do índice deflator: primeiramente todos os índices do passado devem ser deslocados para uma base referência, denominado como mês referencial, para que seja possível realizar a comparação de todos os outros preços no tempo. O valor do índice deflator na base nova pode ser encontrado através de (C.1).

$$Inova_t = \frac{I_t}{I_{ref}} \cdot 100 \quad (C.1)$$

Em (C.1), $Inova_t$ é o valor do índice deflator na base nova no mês t , I_t é o índice deflator na base antiga no mês t e I_{ref} é o índice deflator na base antiga no mês escolhido como referência.

3) Correção de valores nominais para valores reais: nesta etapa é realizada a correção dos preços nominais (com inflação) para os preços reais (sem inflação) por meio de (C.2).

$$Vr_t = \frac{Inova_{ref}}{Inova_t} \cdot Vn_t \quad (C.2)$$

Em (C.2), Vr_t é o valor real do preço no tempo t deflacionado na base nova, $Inova_{ref}$ é o valor do índice deflator na base nova no mês escolhido como referência e Vn_t é o valor nominal do preço no tempo t .

Neste trabalho, o PLD foi deflacionado aplicando como deflator o Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI), com base 100 em dezembro de 2017.

ANEXO D

Obtenção do Valor Esperado e Desvio Padrão

A partir da distribuição de probabilidade de uma variável é possível obter informações valiosas, como o valor esperado e desvio padrão.

Classificado como um dos parâmetros mais importantes, o valor esperado de uma variável aleatória X , denotado por $E(X)$, representa o valor médio dos resultados, definido por (D.1).

$$E[X] = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p(x_i) \quad (\text{D.1})$$

O desvio padrão é uma medida que indica a dispersão dos dados dentro de uma amostra com relação à média. É definido como a raiz quadrada positiva da variância, conforme (D.2), sendo que a variância de X é definida por (D.3).

$$\sigma[X] = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (\text{D.2})$$

$$\text{Var}[X] = E[X^2] - [E[X]]^2 \quad (\text{D.3})$$

Trata-se de forma de medir a dispersão absoluta de X , sendo expressa na mesma unidade da variável aleatória X .

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Resíduos Sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 71. 2004.
- ARAUJO, G. J. F. D. **Análise Energética, Ambiental e Econômica de Biodigestores de Circulação Interna e Concentradores de Vinhaça Para Geração de Eletricidade, Fertilizantes e Créditos de Carbono em Diferentes Cenários Econômicos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, p. 316. 2017.
- BLEY JR., C. **Biogás: A Energia Invisível**. 2. ed. Foz do Iguaçu: ITAIPU Bionacional, 2015.
- BRASIL. **Resolução Normativa nº 414/2010 - Procedimentos de Regulação Tarifária**. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2010.
- BRASIL. **Resolução Normativa nº 482/2012**. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 6. 2012.
- BRASIL. **Resolução Normativa nº 559/2013 - Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão**. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2013.
- BRASIL. **Nota Técnica nº 89/2014-SRE**. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 22. 2014.
- BRASIL. **Resolução Normativa nº 687/2015 - Altera a Resolução Normativa nº 482**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2015.
- BRASIL, H. G. **Avaliação Moderna de Investimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de Investimentos: Matemática Financeira, Engenharia Econômica, Tomada de Decisão, Estratégia Empresarial**. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- CASTRO, N. J.; DANTAS, G. de A.; LEITE, A. L. da S.; BRANDÃO, R. **Bioeletricidade e a Indústria de Alcool e Açúcar: Possibilidades e Limites**. Rio de Janeiro: Synergia, 2008.
- CCEE. Comercialização. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**, 2017. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_afLoop=509107511078429#!%40%40%3F_afLoop%3D509107511078429%26_adf.ctrl-state%3D10uch57km7_4>. Acesso em: 27 outubro 2017.
- CCEE. **Regras de Comercialização - Preço de Liquidação das Diferenças: Versão 2018.1.0**. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. [S.l.]. 2018.
- CENBIO. Nota Técnica VII - Geração de Energia a partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais. **Centro Nacional de Referência em Biomassa**, 2007. Disponível em: <<http://143.107.4.241/download/documentos/Nota%20t%E9cnica%20VII%20-%20biog%E1s.pdf>>. Acesso em: 10 outubro 2017.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Reatores Anaeróbicos**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 5, 2016.

COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 164, de 30 de março de 2011. Conselho de Política Ambiental. **Sistema Integrado de Informação Ambiental**, 2011. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=16794>>. Acesso em: 10 julho 2017.

CORRÊA NETO, V. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-Açúcar e Gás Natural**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 174. 2001.

CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSSILO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **Internacional Sugar Journal**, v. 100, n. 1196, p. 403-413, 1996.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v. 2, n. 2, p. 111-146, 1992.

COSTA, A. N.; MEDEIROS, G. P.; PACHECO, W. C.; ALVES, A. J.; PINHEIRO NETO, D.; DOMINGUES, E. G. Investment Risk Analysis in the Use of Landfill Biogas for Electricity Generation. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, Madrid, Maio 2016.

CTGÁS. **Turbinas a Vapor**. Centro de Tecnologias do Gás. Natal. 2009.

DAMODARAN, A. **Avaliação de Investimentos - Ferramentas e Técnicas para a Determinação do Valor de Qualquer Ativo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. dos. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt_BR&nrm=abn>. Acesso em: 27 janeiro 2018.

DICKEY, D.; FULLER, W. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, p. 427-431, 1979.

DIXIT, A. K.; PINDICK, R. S. **Investment Under Uncertainty**. 1. ed. New Jersey: Princeton University Press, 1994.

DOMINGUES, E. G. **Análise de Risco para Otimizar Carteiras de Ativos Físicos em Geração de Energia Elétrica**. Tese (Doutorado). Program de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 222. 2003.

ELIA NETO, A. **Estado da Arte da Vinhaça**. União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA). Piracicaba. 2016.

FERNANDES, G.; MAIA, V. M.; BRANDÃO, L. E.; GOMES, L. L. Aplicação da Teoria de Opções Reais na Avaliação de Estocagem do Biogás Suíno. **V Congresso Nacional de Administração e Ciências Contábeis - AdCont**, Rio de Janeiro, 16 e 17 out 2014.

FUESS, L. T.; ZAIAT, M. Economics of anaerobic digestion for processing sugarcane vinasse: Applying sensitivity analysis to increase process profitability in diversified biogas applications. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 115, p. 27-37, may 2017.

GEHRING, C. G. **Análise da Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Produzido na Fermentação Anaeróbica de Vinhaça**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 124. 2014.

GRANATO, E. F. **Geração de Energia Elétrica Através da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça**. Universidade Estadual Paulista. Bauru. 2003.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

MALETTA, B. V. **Modelos baseados em Simulação de Monte Carlo: soluções para o cálculo do Value-at-Risk**. Dissertação (Mestrado em Administração). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 71. 2005.

MENDES, L. G. **Análise de Viabilidade Econômica de uma Usina Termelétrica Usando Modelagem Estocástica e Teoria de Opções Reais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2007.

MICUANSKI, V. C. **Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização da Vinhaça para Geração de Energia Elétrica (Estudo de Caso)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, p. 75. 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. **Sistema de Acompanhamento de Produção Canavieira**. Brasília. 2017.

MME. Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2016. **Ministério de Minas e Energia**, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>>. Acesso em: 05 novembro 2017.

MME. MME fixa novos valores anuais de referência para sistemas de geração distribuída. **Ministério de Minas e Energia**, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-fixa-novos-valores-anuais-de-referencia-para-sistemas-de-geracao-distribuida>. Acesso em: 05 abril 2018.

MONTEIRO, C. M. D. N. **Modelo para previsão de curto prazo de velocidade de vento usando Holt-Winters**. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 95. 2013.

MORAES, B. S.; JUNQUEIRA, T. L.; PAVANELLO, L. G.; CAVALETT, O.; MANTELATTO, P. E.; BONOMI, A.; ZAIAT, M. Anaerobic digestion of vinasse from

sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825-835, jan 2014.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic Digestion of Vinasse From Sugarcane Ethanol Production in Brazil: Challenges and Perspectives. **Bioresource Technology**, v. 190, p. 227-234, ago 2015.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. T. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

NAGAOKA, M. D. P. T.; ESPERANCINI, M. S. T.; VIRGENS FILHO, J. S.; AGALHÃES, A. M.; NAGAOKA, M. E.; GUERRA, S. P. S. Análise de Viabilidade Econômica em Co-Geração de Energia Elétrica. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 9, fev 2007.

NOGUEIRA, M. A. F. D. S.; GARCIA, M. D. S. Gestão dos Resíduos do Setor Industrial Sucroenergético: Estudo de Caso de uma Usina no Município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas da UFSM**, Santa Maria, v. 17, p. 3275-3283, Dez 2013.

NOVA CANA. A Produção de Cana-de-Açúcar no Brasil, 2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>. Acesso em: 15 agosto 2017.

PECORA, V. **Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Energia. Instituto de Energia e Ambiente. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 153. 2006.

PESSOA, P. F. P. **Opções de Conversão com Movimento de Reversão à Média com Saltos de Poisson: o Caso do Setor Sucroalcooleiro**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.

PINHEIRO NETO, D. **Processo de Otimização Aplicada à Análise de Risco de Investimento em Geração de Energia Elétrica com Fontes Renováveis**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC). Goiânia, p. 252. 2017.

PINHEIRO NETO, D.; DOMINGUES, E. G.; COIMBRA, A. P.; ALMEIDA, A. T. de; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P. Portfolio optimization of renewable energy assets: Hydro, wind, and photovoltaic energy in the regulated market in Brazil. **Energy Economics**, v. 64, p. 238–250, may 2017.

PINTO, C. D. L. B. **Modelagem de Opções Reais com Processo de Reversão à Média em Tempo Discreto: Uma Aplicação na Indústria Brasileira de Etanol**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

PINTO, C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 162. 1999.

POVEDA, M. M. R. **Análise Econômica e Ambiental do Processamento da Vinhaça com Aproveitamento Energético**. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Energia. Instituto de Energia e Ambiente. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 160. 2014.

PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5. ed. Prüzen, Alemanha: Gülzow, 2010. 232 p.

PROBIOGÁS. **Catálogo de Tecnologias e Empresas de Biogás**. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015a.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de Digestão Anaeróbica com Relevância Para o Brasil: Substratos, Digestores e Uso do Biogás**. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015b.

PROBIOGÁS. **Viabilidade Técnico - Econômica de Produção de Energia Elétrica em ETEs a Partir do Biogás**. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2017.

RECEITA FEDERAL. Contribuição Social sobre o Lucro Líquido CSLL. **Receita Federal - Ministério da Fazenda**, 2015. Disponível em: <<http://idg.receita.fazenda.gov.br/acesso-rapido/tributos/CSLL#ali1>>. Acesso em: 01 janeiro 2018.

REGO, E. E. R.; HERNÁNDEZ, F. D. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar. Contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. **Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, v. 6, 2006.

REIS, L. B. D. **Geração de Energia Elétrica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011. ISBN 978-85-204-3039-2.

RODRIGUES, A.; SANTOS, R. F.; AVACI, A. B.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I.; GASPARIN, E. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica a Partir da Vinhaça. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 2, p. 80-93, 2012.

SALES, C. A. V. B. D.; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. Geração de Eletricidade a Partir da Gaseificação da Biomassa. **RENABIO - Rede Nacional de Biomassa para Energia**, Viçosa, v. 2, n. 3, p. 195-204, 2005.

SALLES, A. C. N. D. **Metodologias de Análise de Risco para Avaliação Financeira de Projetos de Geração Eólica**. Tese (Doutorado). Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 83. 2004.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. Tese (Doutorado). Pós-Graduação em Conversão de Energia. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 219. 2007.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica Para Diferentes Fontes de Biogás no Brasil. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SENAI. Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná.

Curitiba: SENAI/PR, 2016. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/observatorios/download--oportunidades-da-cadeia-produtiva-de-biogas-para-o-estado-do-parana-1-19295-319478.shtml>>. Acesso em: 17 outubro 2017.

SILVA FILHO, P. A. D. **Diagnóstico operacional de lagoas de estabilização.** Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia Regional de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 169. 2007.

SILVA, I. V. G. D. **A previsão do vento para geração de energia eólica.** Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 103. 2010.

SILVA, M. A. S. D.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108 – 114, 2007.

SOCCOL, C. R.; BRAR, S. K.; FAULDS, C.; RAMOS, L. P. **Green Fuels Technology: Biofuels (Green Energy and Technology).** 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

SOUSA, E. A. F. D. **Simulador do Reator UASB para Conversão de Vinhaça em Biogás.** Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica) - Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2014.

SOUTE, D. O.; SCHVIRCK, E.; MARTINS, E.; MACHADO, M. R. Métodos de Avaliação Utilizados Pelos Profissionais de Investimento. **Revista UnB Contábil**, Brasília, v. 11, p. 1-17, jan./dez. 2008.

STACH, A. H. M.; MEDEIROS, G. P. **Desenvolvimento de software para análise da viabilidade econômica de alternativas tecnológicas para aproveitamento energético de biogás gerado por aterros sanitários.** TCC (Trabalho de Conclusão de Curso). Curso Superior em Engenharia de Controle e Automação. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Goiânia, p. 95. 2017.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça: Aproveitamento Energético do Biogás e Obtenção de Créditos de Carbono – Estudo de Caso. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912, out./dez 2010.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016.

UNICA. **Moagem de Cana-de-Açúcar e Produção de Etanol - Safra 2016/2017.** União da Indústria de Cana-de-Açúcar. São Paulo. 2017.

VIANA, A. B. **Tratamento anaeróbico de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento de progressivo de carga orgânica.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 102. 2006.

VILELA, F. S. V. **Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A.** Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília. Brasília, p. 107. 2013.