

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2012

MARCIA VIANA LISBOA MARTINS

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA
HIDRO-ENERGÉTICA E AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DA
AGROINDÚSTRIA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na área de
Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga
Co-orientador: Prof. Dr. Jose Luz Silveira

Guaratinguetá
2012

M386p	Martins, Márcia Viana Lisboa Proposta de metodologia para análise de eficiência hidro-energética e ambiental: estudo de caso da agroindústria / Márcia Viana Lisboa Martins - Guaratinguetá: [s.n.], 2012. 138 f. : il. Bibliografia: f. 112-121 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientador: Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga Coorientador: Prof. Dr. José Luz Silveira 1. Conservação de energia I. Título CDU 620.9(043)
-------	---

MÁRCIA VIANA LISBOA MARTINS

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

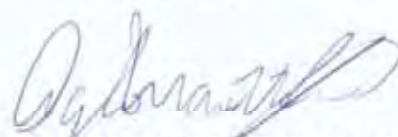
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINO
Unesp-Feg


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
Unesp-Feg


Prof. Dr. CARLOS BARREIRA MARTINEZ
UFMG


Prof. Dr. MARCELO GIULIAN MARQUES
UFRGS/IPH

Maio de 2012

DADOS CURRICULARES

MARCIA VIANA LISBOA MARTINS

NASCIMENTO	01.12.1966 – ITAJUBA / MG
FILIAÇÃO	Sebastião Lisboa Maria Luiza Vilela Viana Lisboa
1989/1992	Curso de Graduação Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia Civil de Itajubá/FECI
1994/1997	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, nível de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

Dedico este trabalho aos meus amados irmãos, em especial a minha irmã Maria Luiza, Mariângela e Mauricio, meus melhores amigos e exemplos de inteligência, bondade, sabedoria, honestidade, dedicação e de amor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e de graça, pelo equilíbrio concedido nos momentos mais difíceis.

Ao Marcos, meu marido, pelo apoio, paciência, otimismo e amor, e em especial pela compreensão nos períodos de ausência necessários à elaboração deste trabalho, e aos meus queridos filhos pela alegria que todos os dias me fazem sentir.

Ao meu pai pelo carinho e a minha mãe (*in memoriam*) pelas bênçãos. Aos meus irmãos e familiares, pelo incondicional apoio.

Agradeço ao Professor Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga, pela orientação, amizade e confiança que em mim depositou.

A empresa Frivasa – Frigorífico Vale do Sapucaí por disponibilizar os dados necessários para realização do estudo de caso. Em especial, aos seus diretores e funcionários por sempre estarem prontos a colaborar.

Aos meus colegas e amigos da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, professores e funcionários.

A FEG/UNESP por contribuir para minha formação.

E por fim, um agradecimento especial as pessoas de bom coração que contribuíram imensamente para a finalização desta tese.

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade
- CAPES – através do PROGRAMA INSTITUCIONAL DE CAPACITAÇÃO DE
DOCENTES – PICD.

*“Não sejas o de hoje.
Não suspires por ontens...
Não queiras ser o de amanhã.
Faze-te sem limites no tempo.
Vê a tua vida em todas as origens.
Em todas as existências.
Em todas as mortes.
E sabe que serás assim para sempre.
Não queiras marcar a tua passagem.
Ela prossegue:
É a passagem que se continua.
É a tua eternidade...
É a eternidade.
És tu.”
Cecília Meirelles in Cânticos II*

*“Jovem, eu te ordeno: levanta-te!”
Lucas 7,11-17*

MARTINS, M. V. L. **Proposta de metodologia para análise de eficiência hidro-energética e ambiental: estudo de caso da agroindústria.** 2012. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

O crescimento industrial acelerado associado ao crescimento populacional tem como principal consequência o aumento excessivo do uso dos recursos naturais e a degradação do meio ambiente. A adoção de medidas de conservação é uma alternativa que atende o aumento da demanda de água e energia, minimiza o impacto das atividades industriais sobre o meio ambiente, e ainda aumenta a competitividade da indústria. Mas para que estas medidas sejam eficazes elas devem ser estruturadas dentro de um sistema de gestão ambiental associado a indicadores ambientais. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da eficiência hidro-energética e ambiental de uma indústria. Diversas medidas de conservação de recursos hídricos e energéticos são apresentadas e analisadas sob o ponto de vista técnico, econômico e ambiental. É proposto um indicador energético-ambiental capaz de sintetizar os ganhos ambientais de medidas de conservação hídrica e energética, refletidas no nível de emissões de gases poluentes associadas ao uso de energia por unidade de seu principal insumo. O indicador energético-ambiental é função do indicador de poluição, o que possibilita avaliar as emissões de gases poluentes das diversas tecnologias de geração de energia calorífica/elétrica, sejam estas internas ou externas a planta industrial. No caso da geração externa são consideradas as emissões devido à geração de energia elétrica, seja esta produzida exclusivamente por uma termoelétrica ou hidrelétrica ou sistema de cogeração. Assim, é também desenvolvido o equacionamento do indicador de poluição de uma usina hidrelétrica. A metodologia é aplicada a uma agroindústria de abatedouro e frigorífico. A escolha deste setor industrial deve-se as suas características de consumidor de água e energia e de sua importância na economia do país. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do modelo empregado e evidenciam a adequação do indicador para refletir os ganhos sinérgicos das medidas de conservação hidro-energética e a eficiência das medidas na redução das emissões de gases poluentes.

PALAVRAS-CHAVE: Conservação de energia. Conservação de recursos hídricos. Indicador. Emissão de gases poluentes. Agroindústria de abatedouro e frigorífico.

MARTINS, M. V. L. **Proposal of methodology hydro-energy and environment efficiency analysis: case study in agroindustry.** 2012. 138 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The fast industrial growth associated with population growth results massive use of natural resources and environmental degradation. The adoption of conservative measures is an alternative that meets the increasing demand of water and energy, minimizing the impact of industrial activities on the environment, and increases the competitiveness of industry. But for these measures to be effective they must be structured within the environmental management system associated with environmental indicators. The objective of this work is to develop a methodology for analysis of hydro-energy efficiency and environmental performance of an industry. Several conservation measures for water and energy resources are presented and analyzed from the technical, economic and environmental point of view. The proposed energy-environmental indicator is able to summarize the environmental benefits of water conservation measures and energy, reflected on the level of greenhouse gas emissions associated with energy use per unit of its main product. The energy-environmental indicator is a function of pollution indicator which allows to evaluate the polluted gas emissions of the various technologies for generating heat energy / power, whether internal or external plant. In the case of generation are considered external emissions due to generation of electricity that is produced exclusively by a thermal or hydro or cogeneration system. Thus, the equation is also derived indicator of pollution of a hydroelectric plant. The methodology is applied to an agribusiness abattoir and refrigerator. The choice of this industrial sector due to the characteristics of consumers of water and energy and its importance in the country economy. The results demonstrate the effectiveness of the model used and show the adequacy of the indicator to reflect the synergy gains of conservation of energy and water, the efficiency of measures to reduce emissions of pollutants gases.

KEYWORDS: Energy saving. Water saving. Indicator. Pollutants gases emission. Slaughterhouse industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Principais formas de reúso de água, adaptado de Brouckaert e Buckley (2000).	30
Figura 2 -	Gráfico representativo da análise <i>Water Pinch</i> adaptado de Tainsh e Rudman (1999).	33
Figura 3 -	Esquema da decomposição da matéria orgânica pelo processo aeróbio e anaeróbio, adaptado de von Sperling (2005).	38
Figura 4 -	Critérios gerais de cobrança, adaptado de ANA (2011).	41
Figura 5 -	Correlação entre a emissão de carbono e a área do reservatório da hidrelétrica (elaborado pelo próprio autor).	73
Figura 6 -	Fluxograma do processo de abatedouro e frigorífico adaptado de SENAI (2003).	80
Figura 7 -	Localização do abatedouro e frigorífico em estudo (imagem satélite do Google maps).	81
Figura 8 -	Diagrama esquemático do sistema hídrico da agroindústria de abatedouro e frigorífico (elaborado pelo próprio autor).	82
Figura 9 -	Fotografia da captação de água bruta no rio Sapucaí: Ponto 1.	83
Figura 10 -	Fotografia do sistema de bombeamento de água bruta: Ponto 1.	83
Figura 11 -	Fotografia da Estação de Tratamento de Água - ETA.	83
Figura 12 -	Fotografia da operação incorreta do floccodecantador - ETA.	83
Figura 13 -	Fotografia: vazamento na mangueira da sala de matança.	85
Figura 14 -	Fotografia: tanque de limpeza de tripas água transbordando.	85
Figura 15 -	Balanço hídrico e concentração das correntes líquidas da agroindústria (elaborado pelo próprio autor).	85
Figura 16 -	Esquema do sistema de coleta e tratamento de efluentes (elaborado pelo próprio autor).	86
Figura 17 -	Vista geral da Estação de Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - ETERA.	86
Figura 18 -	Vista superior ETERA.	86
Figura 19 -	Potência instalada por área (elaborado pelo próprio autor).	89
Figura 20 -	Fotografia do estado de conservação tubulação de vapor.	90
Figura 21 -	Fotografia do misturador de água com tubulação de vapor sem revestimento térmico.	90
Figura 22 -	Fluxograma do Balanço Hídrico após eliminação de perdas e desperdícios de água (elaborado pelo próprio autor).	92
Figura 23 -	Análise gráfica de reúso da água pelo método <i>Water Pinch</i> (elaborado pelo próprio autor).	94
Figura 24 -	<i>Payback</i> do sistema de aproveitamento de água de chuva para os diversos cenários de custo da água (elaborado pelo próprio autor).	97
Figura 25 -	Ciclo de cogeração com turbina a vapor de contrapressão (elaborado pelo próprio autor).	103
Figura 26 -	Receita anual do sistema de cogeração operando com déficit de energia (elaborado pelo próprio autor).	105
Figura 27 -	Receita anual do sistema de cogeração operando com excedente de energia (elaborado pelo próprio autor).	106
Figura 28 -	Gráfico do indicador de poluição de cada sistema energético da agroindústria (elaborado pelo próprio autor).	109

Figura 29 - Gráfico do indicador energético-ambiental da agroindústria calculado considerando as diversas fontes de geração de energia elétrica e a aplicação das medidas de conservação (elaborado pelo próprio autor). ...	113
Figura 30 - Gráfico do indicador energético-ambiental para as diferentes fontes de energia elétrica (elaborado pelo próprio autor).....	114
Figura 31 - Ciclo de cogeração com turbina a vapor de contrapressão (elaborado pelo próprio autor).....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores do PPU por tipo de uso.....	42
Tabela 2 –	Valores de $K_{cap\ classe}$, por classe de uso do manancial	42
Tabela 3 –	Valores de $K_{cap\ classe}$, K_{out} e $K_{medextra}$	43
Tabela 4 –	Índice de Emissão de CH_4 e CO_2 dos reservatórios das usinas hidrelétricas.....	57
Tabela 5 –	Indicadores utilizados na Avaliação de Desempenho Ambiental.....	63
Tabela 6 –	Indicadores de desempenho ambiental.....	63
Tabela 7 –	Os gases de efeito estufa e os seus respectivos potenciais de aquecimento atmosférico.....	65
Tabela 8 –	Fator Médio anual do Sistema Interligado Nacional $t(CO_2)_{equiv} / MWh$	66
Tabela 9 –	Parâmetros físico-químicos característicos de um efluente frigorífico.....	77
Tabela 10 –	Recursos empregados e resíduos gerados em um abatedouro típico	79
Tabela 11 –	Discriminação dos produtos fabricados.....	81
Tabela 12 –	Parâmetros físico-químicos do efluente da agroindústria.....	87
Tabela 13 –	Histórico do consumo médio mensal de energia no HP e HFP no período de 2007 a 2009.	88
Tabela 14 –	Potência instalada por setor de produção.....	89
Tabela 15 –	Características técnicas da caldeira	89
Tabela 16 –	Oportunidades de redução de vazão através da aplicação de medidas para eliminação de perdas e desperdícios de água e energia.....	92
Tabela 17 –	Demandas de vazão e concentrações máximas aceitáveis de entrada do poluente DBO	93
Tabela 18 –	Ofertas de vazão e concentrações máximas de saída do poluente $DBO_{5,20}$	94
Tabela 19 –	Precipitação média mensal.....	95
Tabela 20 –	Custo da água considerando os diversos cenários	96
Tabela 21 –	Resultados da análise econômica do sistema de aproveitamento de água de chuva.....	97
Tabela 22 –	Custo do sistema de abastecimento de água, volume de água e consumo de energia.....	98
Tabela 23 –	Custo do sistema de coleta e tratamento de efluente, o volume de água e a energia consumida.....	99
Tabela 24 –	Custos da cobrança pelo uso dos recursos hídricos no cenário base e com conservação	100
Tabela 25 –	Custos do sistema hídrico com e sem cobrança pelo uso dos recursos hídricos.....	100
Tabela 26 –	Principais parâmetros termodinâmicos com atendimento parcial da demanda.....	103
Tabela 27 –	Principais parâmetros termodinâmicos com pleno atendimento da demanda e com excedentes.....	104
Tabela 28 –	Principais parâmetros termodinâmicos com pleno atendimento da demanda e com excedentes.....	104
Tabela 29 –	Indicador de poluição para a caldeira a lenha e queima de biogás no <i>flare</i>	107
Tabela 30 –	Indicador de poluição de energia elétrica considerando a geração termelétrica exclusiva	107
Tabela 31 –	Cálculo do indicador de poluição médio das hidrelétricas	108

Tabela 32 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a termelétrica a gás natural.....	110
Tabela 33 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a termelétrica a diesel.....	111
Tabela 34 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a termelétrica a carvão.....	111
Tabela 35 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a hidrelétrica.....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais processos de tratamento de efluentes.....	37
Quadro 2 – Principais gases poluentes e seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente.....	54
Quadro 3 – Emissão de poluentes lançados na atmosfera pela geração de eletricidade (g/kWh)	55
Quadro 4 – Descrição do processo de abate bovino	130
Quadro 5 – Dados do conjunto elevatório de água bruta.....	133
Quadro 6 – Dados do conjunto elevatório de água tratada.....	133
Quadro 7 – Dado de tubos, peças e conexões existentes	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADA	- Avaliação de Desempenho Ambiental
ANA	- Agência Nacional de Águas
CEIVAP	- Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CONPET	- Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural
DBO5,20	- Demanda Bioquímica de Oxigênio a 5 dias e temperatura de 20oC
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
ETA	- Estação de Tratamento de Água
ETE	- Estação de Tratamento de Efluentes
ETERA	- Estação de tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de fluxo ascendente
FRIVASA	- Frigorífico Vale do Sapucaí
FURNAS	- Centrais Elétricas S. A.
GEE	- Gases de Efeito Estufa
ICA	- Indicadores de Condição Ambiental
ISO	- <i>International Standardization Organization</i>
MCI	- Motor de combustão interna
MME	- Ministério de Minas e Energia
MT	- Microturbina
OCDE	- Organization for Economic Co-operation and Development
PEE	- Programa de Eficiência Energética
PIB	- Produto Interno Bruto Nacional
PMSS	- Programa de Modernização do Setor Saneamento
PNCDA	- Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PNEf	- Plano Nacional de Eficiência Energética
PNMC	- Política Nacional sobre Mudança do Clima
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODES	- Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas
PROINFA	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RIISPOA	- Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitário de Produtos de Origem Animal
SGA	- Sistemas de Gestão Ambiental
SNIS	- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
WBCSD	- World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	CONSERVAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	23
2.1	Medidas de conservação dos recursos hídricos	26
2.2	Reúso de água	29
2.3	Aproveitamento de água de chuva.....	33
2.4	Minimização dos efluentes e de sua carga poluidora	35
2.5	Tratamento de efluentes industriais	36
2.6	Tratamento Biológico de efluentes.....	38
2.7	Análise econômica das medidas de conservação hídrico-energética no sistema hídrico industrial	39
2.7.1	Cobrança pelo uso da água da água bruta na bacia do rio Paraíba do Sul.....	41
2.7.2	Avaliação do impacto econômico das medidas de conservação no sistema hídrico industrial	43
3	CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	46
3.1	Medidas de Conservação de energia.....	46
3.1.1	Aproveitamento de fontes alternativas de energia	47
3.1.2	Aproveitamento energético do biogás.....	48
3.1.3	Aproveitamento energético do sebo	49
3.1.4	Aproveitamento energético do lodo da estação de tratamento de efluentes	50
3.2	Cogeração.....	51
3.3	Análise econômica das medidas de conservação	52
3.4	Emissão de gases poluentes na geração de energia elétrica.....	53
3.4.1	Emissão de gases poluentes pelas usinas termelétricas.....	54
3.4.2	Emissão de gases poluentes pelos reservatórios das usinas hidrelétricas.....	55
4	INDICADORES AMBIENTAIS.....	59
4.1	Indicadores de desempenho ambiental.....	62
4.2	Indicador de poluição.....	63
4.3	Indicador de poluição do Sistema Interligado Nacional - SIN.....	66
5	PROPOSIÇÃO DE INDICADOR DE DESEMPENHO ENERGÉTICO-AMBIENTAL	67
5.1	Proposta do indicador energético-ambiental	67
5.2	Aplicação do indicador de poluição	69
5.3	Proposição do indicador de poluição para reservatórios de usinas hidrelétricas	70
6	ESTUDO DE CASO	74
6.1	Agroindústria de Abatedouro e Frigorífico	74
6.2	Processo produtivo típico de uma agroindústria de abatedouro e frigorífico	76
6.3	Aplicação prática na agroindústria	81
7	RESULTADOS.....	91
7.1	Eliminação de perdas e desperdícios	91
7.2	Otimização do uso de água	93
7.3	Aproveitamento de água de chuva.....	95
7.4	Análise econômica	97
7.5	Estudo de viabilidade de aproveitamento do biogás	101
7.6	Estudo de viabilidade da cogeração.....	102
7.7	Cálculo do $(CO_2)_e$ e do π_g	106
7.8	Cálculo do indicador energético-ambiental (ϵ).....	109

8	CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS	115
	REFERÊNCIAS	119
	ANEXO A - Descrição do processo industrial de abate	130
	ANEXO B - Características dos equipamentos do sistema de recalque de água.....	133
	ANEXO C – Método prático australiano	134
	ANEXO D - Dimensionamento da Cogeração	135

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de recursos hídricos é uma questão que assume importância cada vez maior nos dias atuais devido ao crescente aumento da demanda e da intensa degradação dos corpos d'água, consequência principalmente do lançamento indiscriminado de resíduos industriais e efluentes urbanos nos cursos d'água. Isto tem levado ao aumento do custo para obtenção de água em quantidade e qualidade satisfatória, e também a necessidade de maiores investimentos no tratamento de efluentes de modo a minimizar seu impacto no meio ambiente. Isto exige que as indústrias adotem soluções alternativas como o reúso de água, visando à redução dos seus custos e o uso dos recursos hídricos.

Além disso, a mudança climática também deve alterar a disponibilidade de recursos hídricos para os ecossistemas e o consumo humano, industrial e da agricultura fazendo com que a água seja um bem cada vez mais disputado (METZ, 2007). Diante deste cenário de escassez de recursos hídricos e degradação ambiental, há uma preocupação mundial dos governos em estabelecer uma legislação ambiental mais rígida de forma a promover o uso racional dos recursos hídricos.

No Brasil, um grande marco para a preservação dos recursos hídricos foi a aprovação da Lei 9.433/97 que dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos. Destacam-se nesta lei dois instrumentos: a cobrança pelo uso da água e o enquadramento dos corpos d'água. Estes instrumentos visam incentivar a busca por soluções que viabilizem econômica, ambiental e socialmente o uso da água nas atividades industriais e têm implicação direta nos custos de produção. O objetivo da cobrança é dotar a água de valor econômico de forma a sinalizar sua importância e a correta utilização da água, além de gerar recursos financeiros para investimentos na recuperação e preservação dos recursos hídricos. O enquadramento dos corpos d'água visa estabelecer metas de qualidade para estes corpos, a fim de assegurar os usos preponderantes estabelecidos.

Atualmente, a cobrança pelo uso da água no Brasil ainda é bastante restrita, entretanto, sua aplicação deverá ser estendida a todas as bacias hidrográficas o que resultará na elevação dos custos relacionados com a obtenção de água e lançamento de efluentes. O enquadramento dos corpos d'água em classes de usos preponderantes exigirá investimentos adicionais para o tratamento de efluente de forma que este alcance parâmetros de qualidade estabelecidos no enquadramento. Como consequência direta, surge a necessidade de investimentos que reduzam o consumo da água bem como a carga poluidora dos efluentes. Assim sendo, a

conservação dos recursos hídricos torna-se prioritária no planejamento estratégico de qualquer empresa, tanto no que diz respeito a sua competitividade quanto ao cumprimento às leis ambientais cada vez mais rígidas.

A questão energética é outra preocupação crescente tanto pela escassez dos recursos energéticos quanto pelos impactos negativos no meio ambiente decorrentes da produção e uso da energia, principalmente no que diz respeito às emissões de gases poluentes. Isto ocorre porque grande parte da energia é obtida por meio de queima de combustíveis fósseis que resulta na emissão de óxidos de carbono (CO_x , principalmente CO e CO_2), metano (CH_4), óxidos de enxofre (SO_x , principalmente SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x , principalmente NO e N_2O), entre outros. O aumento da concentração destes gases na atmosfera provoca entre outros a intensificação do efeito estufa, a chuva ácida, além de afetar a saúde humana.

As melhores estratégias para reduzir as emissões de gases poluentes incluem a conservação de energia e o aumento da eficiência energética (COOPER; SEHLKE, 2012; BRASIL, 2009a). Assim, o uso racional de energia bem como o emprego de tecnologias de produção de energia mais limpas têm sido incentivados através de promulgação de leis específicas e programas de incentivo do governo.

No caso brasileiro, o programa Conserve - Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial, lançado em 1981, foi o primeiro esforço em termos de conservação de energia. Ele tinha como objetivo a promoção da conservação de energia na indústria, o desenvolvimento de produtos e processos energeticamente mais eficientes e o estímulo à substituição de óleo combustível importado pela indústria por fontes alternativas autóctones. Em 2001, a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001), conhecida como Lei da Eficiência Energética, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, prevê níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país. No que tange aos programas de incentivo existem atualmente, dentre outros, o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural - CONPET¹, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL² e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA³.

Em 2009 foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, através da Lei 12.187/09, onde fica estabelecida a meta de redução das emissões de gases de efeito

¹ Decreto Federal 9.656/1990 institui o CONPET

² Portaria Interministerial MME/MIC Nº 1.877/85 1991 institui o PROCEL

³ Lei Federal 10.438/2002 institui o PROINFA

estufa em 36,1 a 38,9% em relação a um cenário de referência para 2020 (BRASIL, 2009a). E recentemente foi publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEf 2010/2030. O PNEf busca reduzir cerca de 10% da demanda de energia elétrica até 2030 através de proposição de um conjunto extenso de ações e medidas para todos os setores da economia (BRASIL, 2011b).

Nas indústrias onde a água e a energia são insumos essenciais em seus processos produtivos, a gestão destes recursos é de fundamental importância para garantir a conservação dos mesmos. É importante salientar que os usos destes insumos estão intimamente interrelacionados, por exemplo, a energia é necessária no sistema de abastecimento de água e no sistema de tratamento de efluente e a água é necessária na operação do sistema de refrigeração. Além disto, a escassez de recursos hídricos pode colocar um limite importante na capacidade de captura dos recursos de energia primária e convertê-los em serviços de energia secundária, como por exemplo, na produção de biocombustíveis e na geração termelétrica (COOPER; SEHLKE, 2012). Portanto, a conservação dos recursos hídricos e energéticos nas atividades industriais deve ser buscada de forma sistêmica, adequando as indústrias à realidade atual de escassez, à preocupação ambiental e à maior competitividade em um mundo cada vez mais globalizado.

Esta tese tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para análise da eficiência hidro-energética e ambiental de uma indústria. A metodologia consiste numa pesquisa sistemática sobre as principais técnicas de conservação de água e energia associadas ao estudo de viabilidade econômica e ambiental destas medidas. Para a consolidação da eficácia da implantação das medidas de conservação hidro-energética são desenvolvidos indicadores de desempenho ambiental.

Portanto é objetivo específico deste trabalho o estudo de medidas de conservação dos recursos hídricos, como eliminação de perdas e desperdício, reúso e aproveitamento de fontes alternativas de água. O método *Water Pinch* é empregado para a otimização do uso da água no processo industrial. Este método possibilita reduzir o consumo de água de abastecimento e de geração de efluentes através da maximização do reúso de água, e identificar os processos que precisam ser mais eficientes. Adicionalmente é proposta uma simulação da cobrança pelo uso da água para avaliação econômica do impacto desta nos cenários com e sem conservação hídrico-energética.

Também é objetivo específico desta tese o levantamento das principais medidas de conservação de energia, tais como medidas para redução de perdas e desperdícios, eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais, emprego da cogeração e o

aproveitamento de fontes alternativas de energia. As medidas de conservação hidro-energética são avaliadas sob o ponto de vista econômico através do método do Valor Presente Líquido - VPL, da Taxa Interna de Retorno - TIR e complementado pela análise do tempo de retorno do investimento (*payback*).

A implementação de medidas de conservação hidro-energética em uma indústria também deve ser analisadas sob o ponto de vista ambiental e estruturada dentro de um sistema de gestão ambiental que garanta o aprimoramento contínuo das ações. Indicadores capazes de refletir aspectos importantes da operação de uma indústria podem constituir-se em instrumentos úteis e importantes para o estabelecimento de um sistema de gestão eficaz (HUANG; LO, 2011).

Assim, esta tese tem por objetivo específico o desenvolvimento de um indicador energético-ambiental que avalie e monitore o desempenho hidro-energético e ambiental da indústria, considerando o consumo de energia e as emissões dos gases poluentes inerentes à indústria. O indicador faz uso do conceito de indicador de poluição para avaliar as emissões de gases poluentes associados às diversas tecnologias de produção de calor e/ou eletricidade que compõem uma instalação industrial. Espera-se assim, determinar um único indicador da indústria que sirva de comparação com outras indústrias.

O indicador energético-ambiental proposto considera as emissões geradas no processo produtivo e na geração de energia elétrica, mesmo quando a fonte de geração for externa à planta industrial. No caso da geração externa são consideradas as emissões devido à geração de energia elétrica seja esta produzida exclusivamente por uma termoelétrica ou hidrelétrica ou sistema de cogeração. Os estudos das emissões de gases de efeito estufa pelas usinas hidrelétricas ainda são incipientes, mas revelam a necessidade de contabilizar as emissões. Assim, é também desenvolvido o equacionamento para o cálculo do indicador de poluição de uma usina hidrelétrica. Desta forma, o indicador energético-ambiental pode também constituir-se em uma ferramenta auxiliar valiosa em estudos de viabilidade técnico-econômico-ambiental de novos projetos de geração de energia, sinalizando qual opção é menos impactante em relação às emissões de gases poluentes.

A metodologia proposta é verificada através de um estudo de caso. Nesta tese escolheu-se um abatedouro e frigorífico devido as suas características de consumidor de água e energia e gerador de resíduos. Além disto, o setor agropecuário desempenha papel importante na economia do país, atuando como fonte fornecedora de capital, empregos, alimentos, matérias-primas e divisas através dos excedentes exportáveis. Sua participação no desenvolvimento da economia brasileira tem sido superior aos setores da indústria e de serviços, e seus índices de

crescimento verificados em anos recentes permitem estimar que sua participação vai continuar significativa nos próximos anos (ABIEC, 2009). Portanto, melhorias no uso racional da água e energia representam ganhos de competitividade significativos, além de promover a sustentabilidade ambiental.

No estudo de caso é realizado um diagnóstico hidro-energético e apresentadas as principais medidas de eficiência hídrica e energética e de reaproveitamento dos resíduos cabíveis para a agroindústria de abatedouro e frigorífico. São apresentados os métodos de cálculo para análise técnica, econômica e ambiental e, principalmente, são avaliadas as sinergias obtidas com a implementação destas medidas e aplicados os indicadores para avaliação do desempenho ambiental.

Esta tese foi estruturada em oito capítulos. O presente capítulo trata das notas introdutórias. No capítulo 2 são apresentados os principais problemas de degradação dos recursos hídricos e as principais medidas de conservação dos mesmos.

No capítulo 3 são relatados os problemas ambientais decorrentes do uso intensivo de energia e abordadas as principais medidas de conservação energética. São descritos os principais gases poluentes e seus efeitos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Também é apresentada as principais emissões de gases poluentes pelas usinas termelétricas e pelos reservatórios das usinas hidrelétricas.

O capítulo 4 relata sobre a importância de indicadores de desempenho ambiental e seu papel como informação e suporte à tomada de decisão.

No capítulo 5 é descrito o equacionamento proposto para o indicador energético-ambiental que relaciona os diversos sistemas de geração de energia na agroindústria com a emissão de gases poluentes em função do produto. Também é apresentado o equacionamento do indicador de poluição para cálculo das emissões provenientes dos reservatórios de usinas hidrelétricas.

No capítulo 6 é apresentado um panorama sobre a importância da agroindústria de abatedouro e frigorífico para a economia do país e descrito seu processo produtivo. São apresentados os resultados da auditoria hidro-energética realizada em uma agroindústria situada no município de Itajubá, Minas Gerais, que são utilizados para o estudo de caso.

No capítulo 7 são apresentados os resultados do estudo de viabilidade técnico-econômica para implementação das medidas de conservação hidro-energética propostas e avaliadas sob ponto de vista energético e ambiental através dos indicadores propostos neste estudo.

Por último, no capítulo 8, são descritas as conclusões e recomendações.

2 CONSERVAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Até muito recentemente a água era considerada como um recurso inesgotável, pois, com exceção das regiões áridas do planeta, a quantidade de água sempre foi suficiente para suprir plenamente as necessidades de toda a população. Entretanto, o rápido crescimento demográfico e a aceleração do desenvolvimento econômico têm levado a uma demanda crescente de água, tanto para atender as necessidades básicas, como as atividades de produção, industrial e agrícola (SAUTCHÜK, 2005). Segundo o relatório *Water in a Changing World* (UNESCO, 2009), depois da agricultura, o maior usuário de água é o setor industrial, incluindo a geração de energia, correspondendo cerca de 20% do uso mundial de água.

O aumento de demanda, o desperdício e o uso inadequado da água, como o lançamento indiscriminado de efluentes industriais e domésticos, estão levando ao esgotamento ou degradação dos recursos hídricos. As previsões são que em 2025 cerca de 1,8 bilhões de pessoas viverão em países ou regiões com escassez absoluta de água⁴, e dois terços da população do mundo poderá estar sob condições de estresse hídrico, caso não sejam implementadas políticas efetivas de gestão dos recursos hídricos FAO (2007). A aceleração do desenvolvimento econômico e as melhorias das condições sociais dos países emergentes devem aumentar ainda mais a pressão sobre a energia e água, UNESCO (2009).

A Conferência Mundial de Desenvolvimento e Meio Ambiente, realizada em 1972, na Suécia, é um marco histórico político internacional da necessidade de preservação do meio ambiente e dos recursos hídricos. A Declaração de Estocolmo constitui-se de princípios que visam orientar as nações na formulação de políticas de gerenciamentos dos recursos naturais.

Em 1977, em Mar del Plata, Argentina, foi realizada a primeira conferência das Nações Unidas específica sobre água, que teve como objetivo o levantamento sobre a disponibilidade e a qualidade de água no mundo, seus usos atuais e futuros e das áreas em conflito devido à escassez. Também foi dado início às discussões sobre o uso eficiente e a visão do aproveitamento múltiplo do uso da água.

Em janeiro de 1992, foi realizada em Dublin, Irlanda, a Conferência Internacional das Nações Unidas sobre Água e Meio Ambiente. Neste evento foi aprovada a “Declaração de

⁴ A Organização das Nações Unidas considera-se escassez absoluta quando a quantidade diária de água disponível para cada pessoa é menor que 50 litros. Esta é a quantidade mínima para atender as necessidades básicas de consumo e higiene.

Dublin sobre Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável” que tem entre seus princípios que a água é um recurso finito e vulnerável, essencial à manutenção da vida, do desenvolvimento e do meio ambiente, a gestão dos recursos deve ser participativa e descentralizada, e a água deve ser reconhecida como um bem econômico.

Durante a conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – ECO 92, realizada no Rio de Janeiro, muitas propostas feitas nas conferências anteriores foram aperfeiçoadas e consolidadas através de compromissos assumidos por diversos países, através da Carta da Terra e da Agenda 21. O capítulo 18 da Agenda 21 é específico sobre a água e trata da proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos. Destaca-se entre seus objetivos o estabelecimento, até 2020, de programas eficientes de uso da água para alcançar padrões sustentáveis de utilização dos recursos (CNUMAD, 2001).

Na União Européia, a Directiva-Quadro da Água do Parlamento Europeu e do Conselho (PARLAMENTO EUROPEU, 2000), que estabelece um quadro de ação comunitária no domínio da política da água, é o principal esforço para promover a proteção ambiental dos recursos hídricos. Entre as principais ações previstas e que estão sendo implementadas, destaca-se o estabelecimento de um plano de enquadramento para proteção das águas superficiais continentais, das águas de transição, das águas costeiras e das águas subterrâneas e o estabelecimento de políticas de preços da água que dar incentivos adequados para que os consumidores utilizem eficazmente a água.

No Brasil, a Lei 9.433/97, que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos, tem por um dos seus objetivos assegurar à geração atual e futura a água necessária em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos (BRASIL, 1997). A outorga pelo direito de uso da água e a cobrança pelo seu uso são instrumentos de gestão previstos na lei como uma forma de incentivar seu uso racional. Especificamente, a outorga tem por objetivo assegurar o controle qualitativo e quantitativo da água e ainda assegurar o direito de acesso à água, e a cobrança pelo seu uso tem por finalidade dotar a água de um valor econômico, para incentivar o seu uso racional e propiciar recursos para serem aplicados em programas e intervenções propostos no plano de recursos hídricos.

O enquadramento dos corpos d'água em classes de usos preponderantes é outro importante instrumento de gestão previsto na Lei de Recursos Hídricos. O enquadramento visa “assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas; diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes” (BRASIL, 1997).

A preocupação governamental com o problema de escassez de água não se limitou à Lei 9.433/97. O Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água - PNCDA, instituído em abril de 1997 pelo Governo Federal, tem por objetivo geral promover o uso racional da água de abastecimento público nas cidades brasileiras. Posteriormente, a Agência Nacional de Águas – ANA, logo após sua criação em 2001, lançou o Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES. Este programa tem importância significativa visto que menos de 20% do esgoto urbano nacional recebe algum tipo de tratamento, sendo o restante lançado diretamente nos corpos d'água, agravando o problema de escassez de água com boa qualidade (ANA, 2009). Existe ainda o Programa de Modernização do Setor Saneamento - PMSS, que atua como área técnica de suporte às ações da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e que tem como principal produto o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (BRASIL, 2009b). Em 2010 entrou em vigor a Política Nacional de Resíduos Sólidos para promover a destinação correta de resíduos e incentivar a sua reciclagem (BRASIL, 2010).

Dentro deste contexto de escassez futura de água e legislação ambiental cada vez mais rigorosa, as indústrias passaram a se preocupar em adotar medidas de conservação de recursos hídricos, o que inclui a redução das perdas e desperdícios da água, aproveitamento de águas residuárias (reúso) e água de chuva, otimização dos processos, melhoria da eficiência de equipamentos e a minimização dos efluentes.

O reúso de água é a principal ferramenta para reduzir o consumo de água. De um modo geral, as indústrias utilizam água potável para fins industriais que não requerem água com esta qualidade, por exemplo, a utilização de água potável no sistema de resfriamento, irrigação de jardins, limpeza de pátios e descargas sanitárias. Com o reúso a água de qualidade inferior pode ser empregada para utilização em fins menos nobres, preservando assim a água potável para usos que exigem água de melhor qualidade.

A adoção de medidas de conservação de recursos hídricos pelo setor industrial resulta em benefícios econômicos diretos como a redução do consumo de água e do volume de efluentes gerados e, como resultado indireto, a redução do consumo de energia, de produtos químicos, a otimização de processos e a redução de despesas com manutenção (SAUTCHÜK, 2005).

A água é um insumo que tem seu custo cada vez mais elevado em razão da degradação dos mananciais de abastecimento. Isto exige que se busque água cada vez mais longe dos centros de consumo o que implica em sistemas de abastecimento de água complexos e onerosos. Outro fator também responsável pela elevação dos custos com a água é a

necessidade de quantidades elevadas de produtos químicos para tornar a água degradada em água potável. Algumas vezes, é necessário recorrer a processos de tratamento específicos além do tratamento convencional para eliminar substâncias tóxicas prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, o que acarreta em custos adicionais para o sistema de abastecimento de água. O uso crescente de energia nos sistemas de saneamento é outro item que também onera este sistema. Segundo o relatório Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2007 (BRASIL, 2009b), o consumo de energia elétrica nos sistemas de saneamento no país é o terceiro maior gasto do setor. E por último, os custos devem aumentar quando da implementação do enquadramento dos corpos d'água e da cobrança pelo uso da água.

O crescimento acelerado e sem planejamento da produção e do consumo de água e energia comprometem o desenvolvimento sustentável. O uso de energia, seja ela proveniente de fontes renováveis ou não renováveis, resulta em impactos negativos sobre o meio ambiente como a poluição do ar, descarte de lixo radioativo, erosão do solo, sedimentação das bacias hidrográficas, desmatamento, entre outros. Portanto, é necessário otimizar o uso das fontes geradoras e reduzir o consumo de energia. As medidas de conservação de recursos hídricos também podem ser vistas como uma medida de redução do uso de energia e de mitigação de impactos sobre o meio ambiente.

2.1 Medidas de conservação dos recursos hídricos

As medidas de conservação dos recursos hídricos visam à redução do consumo de água e da geração de efluentes e devem ser empregadas dentro de um programa de conservação de recursos hídricos. Segundo SAUTCHÜK (2005), um programa de conservação de recursos hídricos deve ser composto por um conjunto de ações específicas de racionalização do uso da água na planta industrial e de mecanismos que possibilitam analisar quais as medidas são mais benéficas para que possam fazer parte da política da empresa. Logo, para que as medidas tenham sucesso elas devem contar com o envolvimento da direção da empresa, bem como dos funcionários.

A adoção de medidas de conservação deve ser baseada na viabilidade técnica e econômica de implementação das mesmas e devem ser concebidas dentro de um programa de gestão ambiental da empresa. A principal vantagem de um programa de gestão é a manutenção de um banco de dados atualizado que possibilite avaliar através de indicadores a

eficiência e a eficácia das medidas adotadas e ainda planejar as ações futuras dentro de um plano de melhoria contínua.

A conservação de recursos hídricos contempla medidas para reduzir o consumo de água e minimizar a geração de efluentes, quais sejam: (i) redução das perdas e desperdício; (ii) adoção de práticas de reúso de água; (iii) minimização do uso de água; (iv) aproveitamento da água de chuva; e (v) minimização do efluente e da carga poluidora.

A implementação de medidas de conservação dos recursos hídricos deve ser precedida pela realização de diagnóstico do sistema hídrico com a finalidade de avaliar, qualitativamente e quantitativamente, a demanda e oferta de água na planta industrial. Com base nas informações obtidas no diagnóstico, faz-se um estudo para definir quais as medidas que devem ser implementadas para minimizar o consumo de água e reduzir a carga poluidora, e quando e como elas devem ser implementadas.

A partir do diagnóstico é possível avaliar as perdas físicas decorrentes de vazamentos em tubulações, registros, etc. Perdas internas, que são mais difíceis de detectar, devem ser avaliadas a partir dos resultados obtidos com o monitoramento do consumo de água. Avalia-se também nesta etapa o desperdício de água, que ocorre principalmente devido a atitudes displicentes dos funcionários (por exemplo, o não ou o mau fechamento de torneiras). Medidas para reduzir ou eliminar as perdas e os desperdícios, em geral, requerem pequenos investimentos e apresentam resultados significativos (SAUTCHÜK, 2005).

Após o estudo de redução de perdas e desperdício deve-se proceder ao estudo das possibilidades de reúso de água que é a principal ferramenta para reduzir o consumo de água além de contribuir para redução da carga poluidora dos efluentes. O reúso constitui no aproveitamento da água de qualidade inferior, em geral águas residuárias tratadas, em processos que não apresentam restrição à utilização desta água disponível. As possibilidades de reúso são avaliadas em função da quantidade e da qualidade de água requerida num processo e da quantidade e qualidade do efluente disponível para reúso. Estas informações devem ser apresentadas no balanço hídrico e de massa elaborados na fase do diagnóstico.

Um estudo das fontes de abastecimento de água deve ser realizado com o objetivo de identificar qual opção é a mais viável ambiental e economicamente, quer seja de concessionária de água ou captação direta no manancial superficial ou água subterrânea.

Uma outra medida a ser avaliada é o aproveitamento das águas pluviais como fonte de abastecimento. Sua aplicação tem se expandido principalmente nos centros urbanos, minimizando os problemas de escassez devido ao aumento da demanda.

Com a implementação do reúso de água e o aproveitamento da água da chuva, uma parcela da água consumida pela indústria passa a ser produzida no próprio local, reduzindo assim o volume aduzido dos mananciais. Com a implementação destas medidas de conservação hídrica, pode-se reduzir os custos de adução e tratamento da água, incluindo os custos de energia associados, e até mesmo postergar eventual necessidade de expansão do sistema de abastecimento de água potável. Portanto, empresas que usam a água de forma mais eficiente podem reduzir seus custos de produção, e assim obter vantagem competitiva sobre as demais.

Por último, deve-se analisar a viabilidade técnica e econômica de propostas de otimização dos processos e equipamentos. Neste caso, os investimentos são altos, devendo-se então priorizar os processos e/ou equipamentos que têm maior consumo de água. Estas medidas incluem a automatização, a alteração dos processos e/ou a substituição dos equipamentos por outros mais eficientes.

As medidas de conservação de recursos hídricos também envolvem medidas para minimização de efluentes e de sua carga poluidora, tais como as definidas nos Programas de Prevenção à Poluição⁵: substituição de produtos químicos, segregação de efluentes, e controle mais rigoroso do lançamento dos efluentes. Estas medidas resultam em economia no processo industrial e possibilitam obter sistemas de tratamento mais seguros e eficientes, contribuindo dessa forma para melhoria da qualidade ambiental. Estas medidas contribuem para redução da carga poluidora lançada nos cursos d'água e para a preservação da bacia hidrográfica.

As várias medidas de racionalização do uso da água apresentadas devem servir de subsídio para a concepção de uma rede hidráulica otimizada. O método *Water Pinch* é a ferramenta utilizada para otimização do uso da água. Este é um método recursivo que permite determinar o consumo mínimo de água de abastecimento e de geração de efluentes através da maximização do reúso de água e, ainda, identificar os processos que precisam ser mais eficientes. Esta técnica pode ser utilizada tanto na concepção de um projeto industrial como em projetos já existentes que necessitam de otimização (CANADA, 2003).

⁵ A Prevenção a Poluição (P2) trata-se da aplicação contínua de uma estratégia ambiental para reduzir ou eliminar os resíduos na fonte, modificando os processos de produção, promovendo o uso de substâncias não-tóxicos ou menos tóxicos, a implementação de técnicas de conservação e reutilização de materiais, em vez de colocá-las no fluxo de resíduos. O termo surgiu em 1975 na companhia 3M – *Minnesota Mining and Manufacturing Company*, que desenvolveu o programa 3P (*Pollution Prevention Pays*) com uma abordagem orientada para prevenir à poluição na origem. Ele foi disseminado pela EPA (Environmental Protection Agency), através da Lei de Prevenção a Poluição (P2) promulgada pelo Governo Federal Americano, em 1990 que estabeleceu que a poluição deve ser prevenida ou reduzida na fonte sempre que possível. (Tradução livre do site da EPA- *Environmental Protection Agency* - <http://www.epa.gov/p2/>).

2.2 Reúso de água

O reúso da água é a uma ferramenta fundamental no gerenciamento dos recursos hídricos visto que sua implementação resulta na redução do consumo da água e na minimização de geração de efluentes.

A água na planta industrial é utilizada para diferentes fins, tais como água de processo, água para alimentação do sistema de refrigeração e geração de vapor, limpeza, lavagem, transporte de produtos e para agir como um catalisador e para transportar materiais de resíduos. Nestes processos são gerados efluentes que devem ser tratados antes de seu descarte para o meio ambiente. Com o reúso os efluentes industriais após um tratamento adequado podem ser utilizados em diversas operações em que os parâmetros de qualidade da água sejam menos restritivos. Esta medida resulta em redução do consumo de água, e ainda pode propiciar a recuperação de calor, matérias primas e produtos. Entretanto, ressalta-se que o emprego do reúso não é uma tarefa fácil de ser implementada.

Na Figura 1 são ilustradas as principais formas de reúso: (i) reúso direto; (ii) reúso após tratamento parcial do efluente; e (iii) reúso após tratamento completo do efluentes. O reúso direto consiste no aproveitamento do efluente de um determinado processo no próprio processo ou em outro, sem qualquer tratamento. O reúso após tratamento parcial consiste no aproveitamento de um efluente de um processo no processo seguinte, após um tratamento parcial do efluente para compatibilizar as características do efluente à qualidade da água requerida no processo seguinte, por exemplo, tratamento para adequação de pH (potencial de Hidrogênio) . O reúso após tratamento ocorre quando o efluente é encaminhado para o local de reúso depois de receber tratamento completo.

O emprego de reúso de água no processo industrial faz com que diversas substâncias sejam incorporadas ao efluente, o que pode prejudicar o processo de operação ou afetar a qualidade do produto ou sistema de tratamento. Ressalta-se que problemas de incrustação, corrosão, obstruções, crescimento biológico em sistema de refrigeração, caldeiras e processos industriais ainda não são totalmente conhecidos, o que dificulta a implementação do reúso no processo industrial. Para que o reúso seja empregado com sucesso é necessário, muitas vezes, incorporar técnicas de tratamento avançadas, como osmose reversa, filtração de membrana etc, a fim de garantir a segurança química e biológica da água (SAUTCHÛK, 2005).

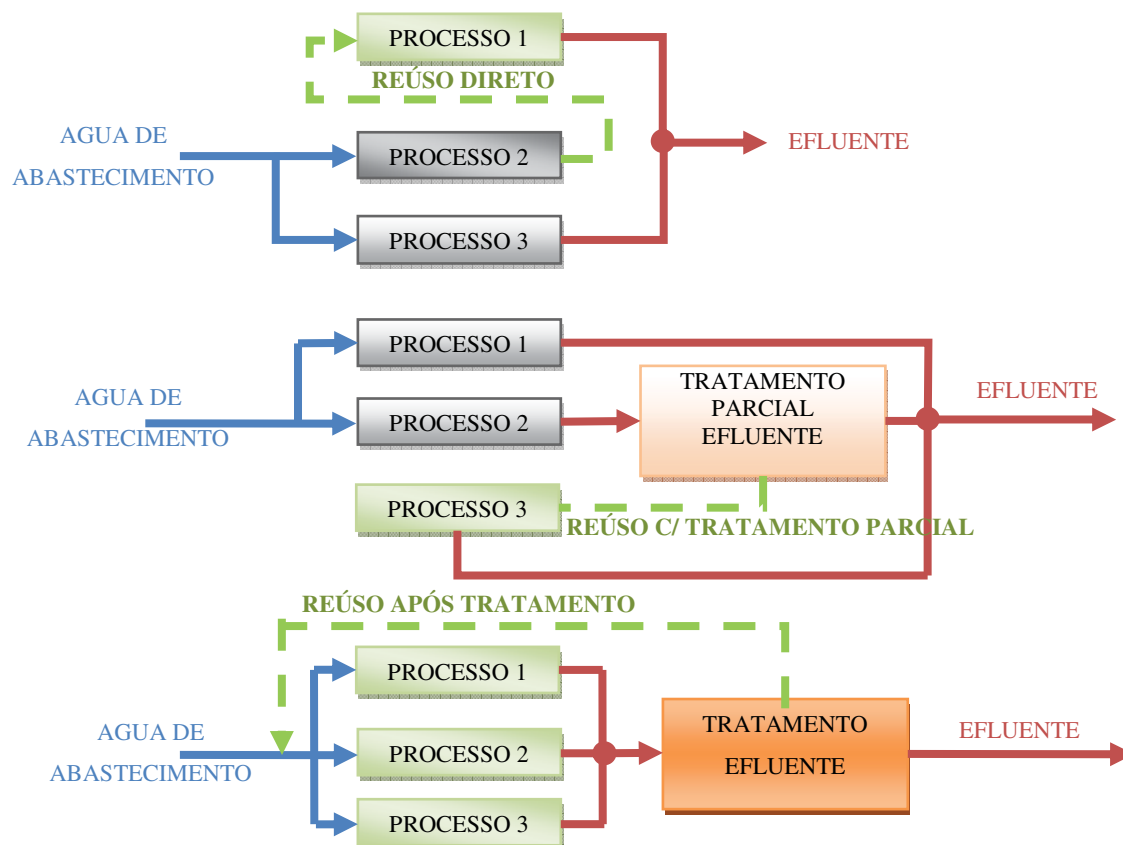


Figura 1 - Principais formas de reúso de água, adaptado de Brouckaert e Buckley (2000).

O enquadramento dos corpos d'água pode ser visto como uma medida que propiciará o emprego do reúso de água. Ele exigirá que as indústrias invistam no tratamento de seus despejos de forma a alcançar parâmetros de qualidade preestabelecidos e compatíveis com a classe de uso preponderante tendo como consequência a disponibilização de efluentes tratados com elevado grau de qualidade que passam a ser uma fonte segura de abastecimento de água.

Como visto o reúso é uma medida que pode propiciar grandes reduções de consumo de água, porém ele não substitui completamente a fonte de abastecimento de água visto que há limites técnicos, de operação e ambiental que inviabilizam a implementação de um sistema de circuito fechado de água na planta industrial (SAUTCHÜK, 2005). Assim, para evitar problemas potenciais que prejudiquem o processo de operação e a qualidade do produto é necessário que haja um conhecimento profundo sobre a qualidade da água exigida em determinado processo produtivo.

Em geral, as indústrias apresentam um sistema complexo de distribuição de água e coleta de efluentes que resultam num número elevado de alternativas para seu reúso. Identificar e determinar o melhor sistema de reúso de água é um problema difícil cuja resolução requer o uso de técnicas de otimização do uso da água.

O método *Water pinch* é uma técnica de otimização que possibilita identificar diversas soluções para reduzir o consumo de água e de efluente, recuperar calor, entre outros. A redução do volume de água e a diminuição do volume de efluente determinada por esta técnica é feita verificando as possibilidades de reúso de água. Isto é feito com base na comparação das características qualitativas e quantitativas da água requerida em um processo com as do efluente disponibilizado do mesmo ou de outro processo. Reduções significativas de água e efluente, da ordem de 25 a 40%, têm sido obtidas com a aplicação desta técnica nas indústrias de refinaria de petróleo, papel e celulose e alimentação e bebida (CANADA, 2003).

Os fundamentos teóricos do método *Water pinch* para os problemas de água e efluentes foram desenvolvidos inicialmente por El-Halwagi e Manousiouthakis (1989), para equacionar os problemas de transferência de massa entre uma corrente líquida rica e outra pobre. Posteriormente, Wang e Smith (1994; 1995) aprimoraram a técnica para resolver os problemas de minimização do uso da água, através do uso de um limite máximo e mínimo de concentração de um determinado limitante na água a ser usada no processo. Olesen e Polley (1997), ainda introduziram o custo da tubulação no processo de otimização.

Segundo LRDEC (1999) o método consiste em quatro etapas principais, a saber:

Etapas 1. Execução do diagrama com os principais fluxos de água da indústria em estudo, mostrando todas as operações unitárias onde a água é utilizada e todas as operações unitárias onde a água, contaminada ou não, é produzida.

Etapas 2. Identificação dos principais poluentes que interferem no processo industrial: DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio, DQO – Demanda Química de Oxigênio, sólidos totais, dureza, óleos e graxas, número de coliformes fecais e totais, entre outros. Para reduzir o número de variáveis e simplificar o processo, deve-se escolher um poluente mais restritivo ou um poluente que possa representar um conjunto de poluentes com características de interesse semelhantes. Para o poluente escolhido, determina-se a concentração máxima aceitável na entrada de cada operação unitária e a concentração resultante na saída.

Etapas 3. A construção do gráfico *water pinch* é ilustrada na Figura 2. Este gráfico é constituído pelas curvas de oferta interna de água e de demanda interna de água, utilizando no eixo das abscissas a taxa de escoamento (vazão) acumulada, e no eixo das ordenadas a concentração do poluente. Este eixo é definido de forma inversa ao convencional, ou seja, com valores positivos das ordenadas no quarto quadrante. Assim, os valores situados mais

próximos do eixo das abscissas são os de melhor qualidade, ou seja, as águas de abastecimento.

A curva da oferta interna é definida com base nos valores de vazão dos efluentes disponíveis para o reúso em cada operação e correspondentes concentrações máximas de saída, considerando a concentração do efluente constante em cada operação. Trata-se de uma curva acumulada de oferta, obtida a partir dos valores de vazão dos efluentes ordenados de forma decrescente com relação à concentração do poluente.

A curva de demanda interna de água é definida com base nos valores da vazão requerida em cada operação e correspondente concentração máxima aceitável do poluente. Esta curva é construída de forma semelhante à de oferta interna de água. Neste caso, entretanto, inicia-se com um valor arbitrário de vazão, grande o suficiente para que as duas curvas não se sobreponham, ao qual se adiciona sucessivamente os valores de vazão requerida, a partir daquela de maior concentração.

O ponto onde as duas curvas se tocam é o definido como *water pinch*. Este ponto é obtido movendo horizontalmente a curva da demanda interna em direção à curva da oferta interna até que as duas curvas se toquem. No gráfico da Figura 2 as áreas definidas pela sobreposição das duas curvas indicam as oportunidades de reúso de água (intervalo de reúso).

Etapa 4. A partir da análise do gráfico do *water pinch* (Figura 2), pode-se determinar uma nova configuração da rede de água, com diferentes valores de vazão e concentração de poluente em algumas operações. As medidas necessárias para reconfiguração da rede devem ser avaliadas economicamente. O procedimento deve então ser repetido até obter a configuração da rede hidráulica com menor uso de água e economicamente viável.

Conforme já apresentado, as possibilidades de reúso da água são definidas com base nos parâmetros de qualidade e quantidade da água eliminada (efluente) e nos parâmetros de qualidade e quantidade exigidos na mesma ou em outra etapa do processo industrial. Entretanto, ressalta-se que os limites dos parâmetros quali-quantitativos não são fáceis de serem obtidos, pois em geral as próprias indústrias desconhecem.

Zbontar e Glavic (2000) consideram ainda que mudanças no processo também é opção para diminuir o consumo de água.

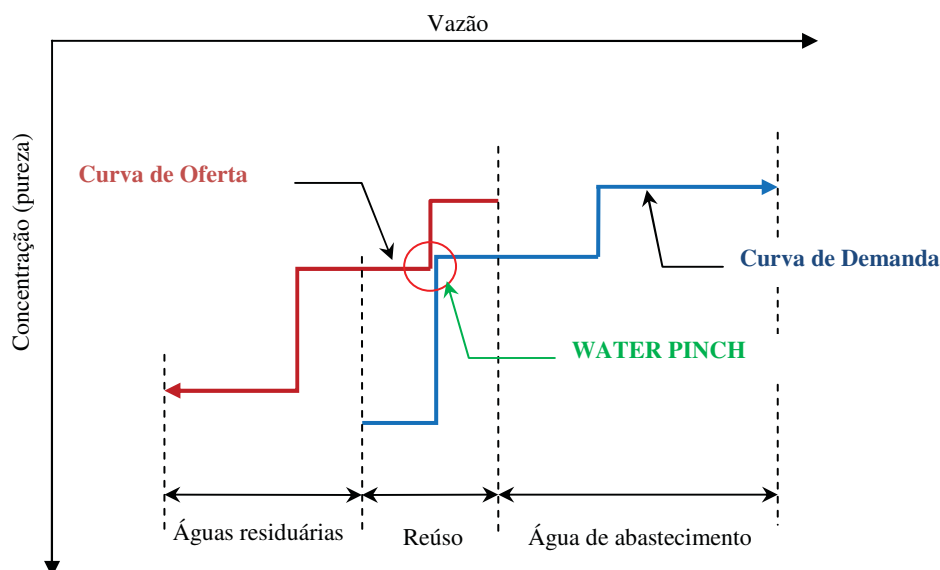


Figura 2 - Gráfico representativo da análise *Water Pinch* adaptado de Tainsh e Rudman (1999)

2.3 Aproveitamento de água de chuva

A água de chuva pode atender a diversos fins dentro de uma indústria, tanto para uso nos processos industriais (sistema de resfriamento, água de reposição em sistema de produção de vapor etc) quanto para usos em sanitários (regas de jardim, limpeza de pátio, recarga de aquífero etc), reduzindo assim a necessidade da indústria de água de menor qualidade.

A viabilidade técnica e econômica de implementação de um sistema de coleta de água de chuva depende basicamente do nível de precipitação, da área de captação, da qualidade da água requerida, da qualidade da água ofertada e dos custos do sistema de coleta. Em geral, as indústrias apresentam condições que propiciam a execução do sistema de coleta, pois dispõe de grandes áreas de cobertura para captação da água da chuva. Sendo o consumo de água elevado, os investimentos necessários para implementação do sistema de coleta podem ser compensados com a redução do consumo de água proveniente das fontes convencionais de abastecimento.

No Brasil, os requisitos necessários para o aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis são estabelecidos pela norma ABNT NBR 15527 (2007). O projeto de sistemas de coleta, tratamento e uso de água de chuva envolve as etapas de caracterização da qualidade da água pluvial; identificação dos usos da água (demanda e qualidade); determinação do potencial de aproveitamento de água de chuva; levantamento da precipitação média local (diária ou mensal); determinação da área de coleta; determinação do coeficiente de escoamento (*runoff*); dimensionamento do reservatório de acumulação;

dimensionamento do reservatório de descarte; projeto dos sistemas complementares (grades, filtros, tubulações, etc.); e escolha do sistema de tratamento necessário.

O reservatório é o item mais oneroso do sistema de aproveitamento de água de chuva, podendo representar cerca de 50% a 85% do custo total (TOMAZ, 2003). Portanto, o dimensionamento do volume de reservação deve ser feito de forma criteriosa, levando em conta os aspectos técnicos e de viabilidade financeira.

Para determinar o potencial de aproveitamento de água de chuva é necessário obter o levantamento da série histórica das precipitações médias diárias ou mensais ou anuais da área em estudo. Recomenda-se que as séries históricas tenham um período mínimo de cinco anos. Porém, para estudos mais rigorosos, pode ser recomendado trabalhar com séries sintéticas de precipitações.

Existem vários métodos de dimensionamento de reservatório de água de chuva, dependendo da qualidade e quantidade de dados disponíveis e nível de confiabilidade de suprimento desejado. Em Amorim e Pereira (2008) encontra-se uma análise detalhada sobre a adequação dos vários métodos de dimensionamento sob diferentes aspectos. São analisados o método de Rippl (analítico e gráfico), o método de consideração do período dos dias consecutivos sem chuva (simplificado e com análise estatística), o método de análise de simulação e os métodos práticos (brasileiro, alemão, inglês e australiano). Concluiu-se que os métodos práticos por serem menos complexos são de fácil aplicação. Estes métodos estão apresentados na ABNT NBR 15527:2007 e apresentam menor volume de reservatório. O método de Rippl, o método de Análise de simulação e o método de consideração de dias consecutivos sem chuva, são mais complexos e indicados para serem aplicados quando se deseja suprir toda a demanda de água por esta fonte ou quando há sérios riscos de escassez.

Em geral, o sistema de água de chuva é dotado de mecanismo para descarte do volume inicial, denominado *first-flush*⁶. O objetivo deste mecanismo é diminuir a concentração de impurezas dissolvidas, suspensas, ou simplesmente arrastadas mecanicamente. Após o descarte do *first-flush*, a água pode e deve ser aproveitada para fins não potáveis.

Para obter água de melhor qualidade devem ainda ser instalados filtros para remoção de materiais grosseiros, tais como folhas, gravetos e particulados de maior dimensão. Segundo Santos (2009b), ensaios realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas mostram que, em geral, os sólidos grosseiros são retidos na sua totalidade na maioria dos filtros, mas que a eficiência tende a cair com o aumento da vazão. Vale ressaltar que os reservatórios de

⁶ *first-flush* significa primeiro fluxo de lavagem.

armazenamento da água de chuva também podem oferecer riscos de contaminação (TOMAZ, 2003).

2.4 Minimização dos efluentes e de sua carga poluidora

O crescimento populacional e industrial é acompanhado também pelo aumento da produção de efluentes. Atualmente, apesar da legislação vigente, muitas indústrias ainda lançam seus despejos no corpo receptor sem nenhum tratamento prévio ou com tratamento ineficiente e/ou incompleto, prejudicando a capacidade de autodepuração dos corpos d'água.

Para minimizar os impactos provenientes do lançamento de efluente corpo hídrico e adequar-se à legislação ambiental as indústrias precisam implementar ou aprimorar o tratamento do seu efluente. Para isto é necessário conhecer a vazão e as características do efluente, que variam de acordo com o tipo de indústria, com o período de operação, com a matéria-prima empregada, com a reutilização de água etc.

Além disto, a tendência atual é de promover a otimização dos processos tecnológicos de produção de forma a prevenir a geração de resíduos. O objetivo é que as emissões sejam reduzidas na fonte evitando processos e materiais potencialmente tóxicos (SENAI, 2003). Esta tendência está baseada nos vários conceitos concorrentes desenvolvidos por entidades nacionais e internacionais:

- PP ou P2 – *Prevention Pollution*, divulgada pela EPA – *Environmental Protection Agency*
- P+L – Produção mais Limpa, desenvolvida pela UNIDO – *United Nations for Industrial Development* e UNEP – *United Nations Environmental Program*;
- PL – Produção Limpa, defendida por organizações ambientalistas e vários centros de P&D – Pesquisa e Desenvolvimento;
- Ecoeficiência - desenvolvida pelo WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*.

Algumas medidas de prevenção à poluição são tais como redução da carga orgânica, segregação de efluentes e substituição de produtos químicos. Evitar o uso de produtos que contenham ingredientes tóxicos substituindo-os por outros que contenham uma proporção menor ou nenhum ingrediente tóxico é uma estratégia prática para diminuir a carga poluidora tóxica de efluentes industriais. Desta forma, evita-se o uso de produtos químicos que possam interferir no tratamento dos efluentes ou impactar o corpo receptor (SENAI, 2003).

A redução da carga poluidora dos efluentes líquidos constituídos de matéria orgânica pode ser realizada minimizando a quantidade de matéria em contato com a água. Isto implica em recolher, o quanto possível, os materiais ou resíduos antes que entrem nos drenos e canaletas do sistema de coleta águas residuárias. De um modo geral, a remoção a seco dos resíduos sólidos é recomendada antes de realizar a limpeza com a água para diminuir a quantidade de resíduos no efluente. Deve-se também evitar ou minimizar transbordamentos de água dos equipamentos de modo a não aumentar o volume de efluentes (PACHECO; YAMANAKA, 2006). Reduzida a geração de resíduos, deve-se então escolher a alternativa mais adequada ao tratamento dos efluentes.

O reúso de água, como visto anteriormente, é uma medida que visa reduzir o consumo de água e a geração de efluente. Uma das vantagens do reúso é a economia de custo gerada no processo produtivo, pois reduz a quantidade de efluente a ser tratado e consequentemente a quantidade lançada no corpo hídrico receptor.

Weber et al. (2010) avaliaram as possibilidades do reúso de água de uma estação de tratamento de efluentes - ETE em uma indústria de embalagens de papelão ondulado com o objetivo de aumentar o seu desempenho. Eles identificaram a oportunidade de reúso do efluente de tratamento primário na produção de adesivo de amido. O resultado da simulação matemática, por meio do balanço de cargas, apresentou uma redução em mais de 60% da carga orgânica afluente ao processo de lodo ativado aumentando, assim a eficiência da ETE, com consequente atendimento aos padrões de lançamento estabelecidos pelo órgão ambiental.

2.5 Tratamento de efluentes industriais

Os efluentes industriais devem receber tratamento específico antes de seu lançamento na rede coletora ou no corpo receptor. O objetivo é reduzir a carga poluidora a fim de que substâncias nocivas não prejudiquem a rede coletora e/ou ETE ou os corpos d'água. O lançamento de efluentes no corpo d'água deve atender aos padrões de lançamento estabelecidos na resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011c).

Nas indústrias em que o efluente é composto por substâncias de valor comercial, por exemplo, moinha de carvão, alcatrão, óleos minerais, fibras de celulose, lanolina, fenóis, benzina, o tratamento visando à recuperação destas substâncias pode ser vantajoso. A segregação dos despejos em linhas de correntes distintas é uma medida que visa facilitar a remoção de substâncias tóxicas e, que pode diminuir os custos do tratamento final. Além

disto, o efluente mais segregado, ou seja, com características menos restritivas possibilita maiores oportunidades de reúso (PACHECO; YAMANAKA, 2006).

O tratamento dos despejos industriais é definido em função da análise dos tipos e características dos contaminantes que devem ser eliminados ou minimizados. Pessoa e Jordão (1995) apresentam uma classificação dos processos de tratamento em função do grau de redução dos sólidos em suspensão e da demanda bioquímica do oxigênio, proveniente da eficiência de uma ou mais unidades de tratamento (Quadro 1).

Quadro 1 – Principais processos de tratamento de efluentes

Tipo de Tratamento	Processo
Tratamento Preliminar	- Remoção de sólidos grosseiros (gradeamento) - Remoção de gorduras - Remoção de areia (desarenadores)
Tratamento Primário	- Sedimentação (simples e com polieletrólitos) - Flotação (simples e por ar dissolvido) - Digestão do lodo - Desidratação do lodo - Sistemas compactos ou conjugados (Tanques Imhoff) - Sistemas anaeróbios (lagoas anaeróbias, reator de fluxo ascendente)
Tratamento Secundário	- Filtração biológica - Processos de lodos ativados (aeração prolongada, valo de oxidação etc) - Decantação intermediária ou final (sedimentação de lodo floculoso ou biomassa) - Lagoas de estabilização aeróbias (facultativa, aerada).
Tratamento Terciário	- Lagoas de maturação - Desinfecção (ozonização, cloração) - Processos de remoção de nutrientes (N e P) - Filtração final

Fonte: Pessoa e Jordão (1995)

O tratamento químico é empregado nos efluentes industriais que são biologicamente inativos ao tratamento biológico. Esse tipo de tratamento também é bastante utilizado visando o reúso de água. Alguns exemplos de processo de tratamento químico: processos para remoção de sólidos em suspensão; filtração e precipitação química; processos para remoção de resíduos oleosos; coagulação/floculação e sedimentação ou flotação; processos para remoção de sólidos dissolvidos; insolubilização química, osmose reversa e troca iônica; processos de separação térmica.

As águas residuárias domésticas assim como as águas residuárias provenientes da agroindústria de abatedouro, laticínios, usinas de açúcar são constituídas principalmente de

matéria orgânica em suspensão ou dissolvida, assim como nutrientes (nitrogênio e fósforo). O tratamento biológico, aeróbio ou anaeróbio, é a forma mais eficiente de remoção da matéria orgânica dos efluentes. O próprio efluente contém grande variedade de microorganismos para compor as culturas microbiais mistas que processam os poluentes orgânicos (von SPERLING, 2005).

2.6 Tratamento Biológico de efluentes

Os processos de tratamento biológico têm como princípio utilizar a matéria orgânica, dissolvida ou em suspensão, como substrato para microorganismos tais como bactérias, fungos e protozoários, que a transforma em gases, água e novas células. O tratamento biológico tem sua aplicação favorecida nos países tropicais onde as temperaturas elevadas predominantes aceleram o metabolismo dos microorganismos.

O processo biológico é denominado aeróbio quando os microorganismos utilizam o oxigênio (O_2) para a decomposição da matéria orgânica, gerando gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) como resultado da respiração dos microorganismos. Quando a decomposição da matéria orgânica é realizada sem a presença de oxigênio denomina-se processo anaeróbio. Os principais produtos da decomposição anaeróbia são o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), podendo este último ser utilizado como fonte alternativa para geração de energia. A Figura 3 ilustra, de forma simplificada, o processo aeróbio e anaeróbio de decomposição da matéria orgânica.

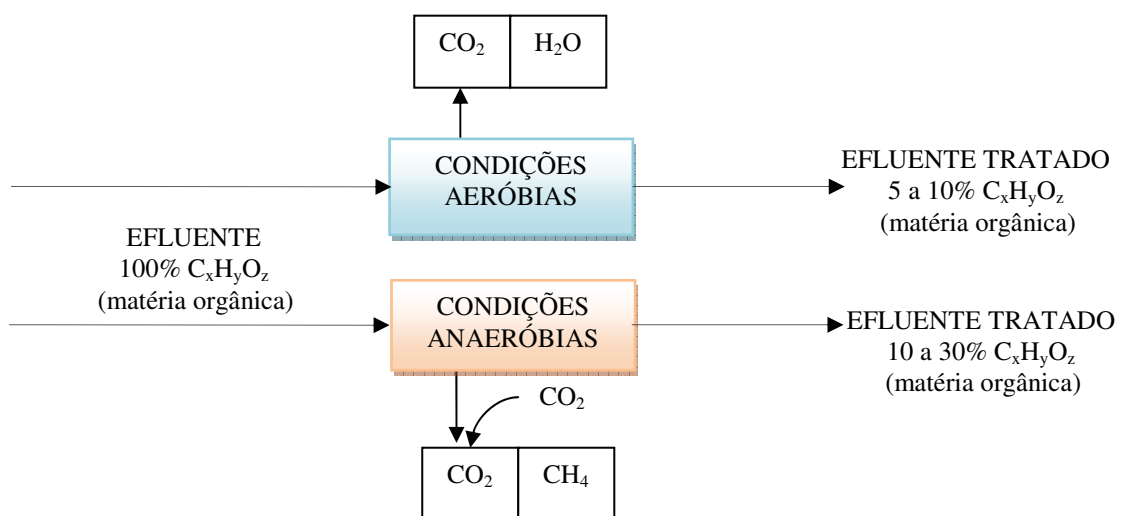


Figura 3 - Esquema da decomposição da matéria orgânica pelo processo aeróbio e anaeróbio, adaptado de von Sperling (2005).

Durante muito tempo, empregou-se principalmente o tratamento aeróbio para o tratamento de águas residuárias, enquanto o tratamento anaeróbio era utilizado somente no tratamento do lodo. Entretanto, com a evolução do conhecimento do processo anaeróbio e com a necessidade de tratar o efluente com custos mais baixos de construção e de operação, desenvolveram-se vários sistemas com base na aplicação da digestão anaeróbia para a remoção do material orgânico de águas residuárias.

A digestão anaeróbia tem como vantagem a remoção da matéria orgânica (em geral, cerca de 75%) sem o dispêndio de energia ou adição de substâncias químicas auxiliares, o que resulta em baixo custo de operação, von Sperling (2005). No sistema aeróbio, a remoção de matéria orgânica pode chegar a 95% quando se emprega o processo de lodos ativados, porém o consumo de energia é elevado devido à necessidade de aeração do processo.

Segundo von Sperling (2005), no sistema anaeróbio, a produção de lodo é mais baixa, pois a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em biogás, que é fonte de energia. O lodo excedente do sistema anaeróbio constitui-se de uma pequena parcela do material orgânico que é convertida em biomassa microbiana. Além de ser menor a quantidade produzida o lodo excedente apresenta-se, via de regra, mais concentrado e com melhores características de desidratação, facilitando seu descarte. Uma alternativa ao descarte é o aproveitamento do lodo como fonte alternativa de energia.

As desvantagens do tratamento anaeróbio são a demora na partida do processo se não houver microrganismos adequados disponíveis e a sensibilidade às mudanças das condições ambientais. Ainda, a presença de sulfetos pode ocasionar a emissão de odores desagradáveis.

Em vista do elevado grau de poluição dos corpos d'água e da carência de recursos econômicos para implementação de estações de tratamento de esgoto, o tratamento anaeróbio é uma solução interessante pelo baixo custo de operação de manutenção, mesmo que sua eficiência na remoção de matéria não ultrapasse a 75%, segundo von Sperling (2005). Neste caso há de se considerar que a degradação da matéria orgânica remanescente ocorrerá pela adição de unidade de pós-tratamento ou pelos processos naturais de autodepuração dos cursos d'água. Vale ressaltar que, apresenta como vantagem o aproveitamento energético do biogás.

2.7 Análise econômica das medidas de conservação hídrico-energética no sistema hídrico industrial

A aplicação das medidas de conservação hidro-energética objetiva a redução do consumo de água, a geração de efluentes e a diminuição da demanda de energia. Esta redução

é desejada, pois possibilita produzir bens e produtos com uma menor utilização dos recursos hídricos e energéticos, além de menor geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

Entretanto, as medidas de conservação hidro-energéticas podem não resultar em benefícios econômicos enquanto os valores de tarifa de energia elétrica, água e esgoto forem baixos, não existir a cobrança pelo uso da água e os custos de implementação das medidas de conservação forem elevados. No médio e longo prazo, certamente este cenário deve se alterar em função das possíveis reduções nos custos para aquisição de equipamentos mais eficientes e acréscimos nas tarifas de energia elétrica e água.

A cobrança pelo uso da água e lançamento de efluentes ainda não foi instituída na maioria das bacias hidrográficas brasileiras, apesar de estar prevista em lei há mais de 10 anos. Isto é resultado da dificuldade de estruturação dos comitês de bacia hidrográfica e de criação das agências de água, pois cabe ao comitê decidir sobre os valores de cobrança. Entretanto, os comitês ainda funcionam precariamente, há carência de recursos financeiros e humanos nos órgãos gestores federais e estaduais. Mas, quando a cobrança for amplamente implementada deverá haver um impacto nos custos da indústria, o que poderá ser um incentivo à adoção de medidas de conservação dos recursos energéticos e hídricos.

A exceção desta realidade tem-se o Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - CEIVAP. A bacia possui uma área de drenagem relativamente pequena, 0,7% do território brasileiro, mas situa-se numa das áreas mais industrializadas do país (responsável por 10% do Produto Interno Bruto - PIB), e abastece cerca de 14 milhões de habitantes (BRAGA et al., 2008). Em função de sua importância e da necessidade de obtenção de recursos para sua recuperação, o CEIVAP tornou-se, em 2003, pioneiro na aplicação da cobrança no país.

Avanços foram obtidos, e até 2010 a cobrança foi implementada em três bacias hidrográficas de rios de domínio da União e em 16 de domínio estadual (Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro) num total de 20 bacias com cobrança (ANA, 2011).

Entretanto, antes que se estabeleça a cobrança numa bacia hidrográfica é preciso avaliar o impacto desta nos custos de produção industrial e suas consequências na comercialização dos produtos. Neste sentido, é apresentada a seguir a metodologia da cobrança pelo uso da água definida pelo CEIVAP, através da Deliberação Normativa DN 65 (CEIVAP, 2006), que será empregada para simular a cobrança pelo uso na água em bacias onde não há cobrança pelo uso da água. Isto possibilitará analisar o impacto da cobrança nos custos de produção e ainda avaliar a eficácia da cobrança como um instrumento de estímulo ao uso racional da

água. Ressalta-se que, para bacias onde já há cobrança, os valores adotados devem ser seguidos.

2.7.1 Cobrança pelo uso da água da água bruta na bacia do rio Paraíba do Sul

De uma forma simplificada, os critérios gerais estabelecidos para a cobrança pelo uso da água para os seus diferentes usos inclui a captação direta do corpo de água, o consumo (diferença entre a retirada e o lançamento) e a diluição (lançamento no corpo de água), conforme Figura 4.

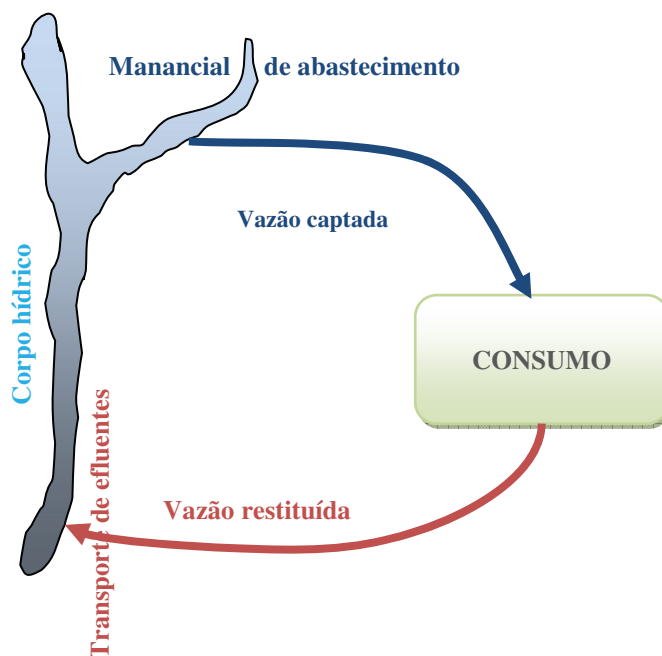


Figura 4 - Critérios gerais de cobrança, adaptado de ANA (2011)

Segundo a DN 65 (CEIVAP, 2006), o cálculo para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos no setor industrial é dado pela equação (1):

$$Valor_{Total} = (Valor_{cap} + Valor_{cons} + Valor_{DBO}) K_{gest\tilde{a}o} \quad (1)$$

Onde o $Valor_{Total}$ é o pagamento anual total pelo uso da água, e $Valor_{cap}$, $Valor_{cons}$, e $Valor_{DBO}$ são os pagamentos anuais pela captação de água, volume efetivamente consumido pelo usuário e pela quantidade de matéria orgânica lançada no corpo d'água, respectivamente, expressos em R\$/ano. O $K_{gest\tilde{a}o}$ é o coeficiente de gestão que tem por objetivo representar o efetivo retorno à bacia dos recursos arrecadados pela cobrança do uso da água nos cursos

d'água (geralmente igual a 1). Apresenta-se a seguir as fórmulas para o cálculo do Valor_{cap}, Valor_{cons} e do Valor_{DBO}.

A cobrança do volume captado, Valor_{cap}, é dada pela equação (2) ou pela equação (3). Quando o volume anual de água captado é obtido segundo valores da outorga ou medido ou verificado pelo organismo outorgante o Valor_{cap}, em R\$/ano, é obtido por:

$$Valor_{cap} = Q_{capout} . PPU_{cap} . K_{capclasse} \quad (2)$$

Onde Q_{capout} é o volume anual de água captado, em m³/ano, e, PPU_{cap} é o Preço Público Unitário para captação superficial (Tabela 1), e K_{cap classe} é o coeficiente que leva em conta a classe de enquadramento do corpo d'água no qual se faz a captação (Tabela 2).

Tabela 1 – Valores do PPU por tipo de uso

Tipo de uso	PPU	Unidade	Valor
Captação	PPU _{cap}	R\$/m ³	0,01
Consumo	PPU _{cons}	R\$/m ³	0,02
Lançamento carga orgânica – DBO	PPU _{DBO}	R\$/kg	0,07

Fonte: DN 65, CEIVAP (2006)

Tabela 2 – Valores de K_{cap classe}, por classe de uso do manancial

Classe de uso do corpo d'água	K _{cap classe}
1	1,0
2	0,9
3	0,9
4	0,7

Fonte: DN 65, CEIVAP (2006)

Quando houver medição do volume anual captado, conforme estabelece o parágrafo 2º do artigo 2º da DN 65 (CEIVAP, 2006), a cobrança do volume captado, Valor_{cap}, é dada pela equação (3):

$$Valor_{cap} = (K_{out} . Q_{capout} + K_{med} . Q_{capmed} + K_{medextra} . (0,7 . Q_{capput} - Q_{capmed})) . PPU_{cap} . K_{capclasse} \quad (3)$$

Onde K_{out} é o peso atribuído ao volume anual de captação outorgado, K_{med} é o peso atribuído ao volume anual de captação medido, K_{medextra} é o peso atribuído ao volume anual disponibilizado no corpo hídrico e Q_{capout} é o volume anual de água, em m³/ano, segundo dados de medição. Os pesos são definidos, conforme Tabela 3, para que não haja grande diferença entre o valor medido e o valor outorgado.

Tabela 3 – Valores de K_{cap} classe, K_{out} e $K_{medextra}$

	K_{out}	K_{med}	$K_{medextra}$
$0,7 \leq \frac{Q_{capmed}}{Q_{capout}} \leq 1$	0,2	0,8	0
$\frac{Q_{capmed}}{Q_{capout}} < 0,7$	0,2	0,8	1
$\frac{Q_{capmed}}{Q_{capout}} > 1$	0	1	0

Fonte: DN 65, CEIVAP (2006)

O Valor_{cons} é dado pela equação (4):

$$Valor_{cons} = (Q_{capT} - Q_{lançT}) \cdot PPU_{cons} \cdot \left(\frac{Q_{cap}}{Q_{capT}} \right) \quad (4)$$

Onde Q_{capT} , Q_{cap} , $Q_{lançT}$ são os volumes anuais de água captado total (corpos d'água de domínio da união, do estado e concessionárias de água), de água captada, e de água total lançada (em corpos d'água de domínio dos estados, da União, em redes públicas de coleta de esgotos ou em sistemas de disposição em solo) respectivamente, em m³/ano; e PPU_{cons} é o Preço Público Unitário para o consumo de água (Tabela 1).

O Valor_{DBO}, por sua vez, é dado pela equação (5):

$$Valor_{DBO} = C_{DBO} \cdot Q_{lançFed} \cdot PPU_{DBO_{5,20}} \quad (5)$$

Onde C_{DBO} é a concentração média anual de $DBO_{5,20}$ (Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias a 20°C) lançada, em kg/m³, obtida pela média ponderada das medidas feitas pelo órgão ambiental estadual correspondente ou pelo usuário, desde que acreditadas pelos órgãos ambientais e quando não houver medidas deve-se adotar o valor máximo de outorga e $Q_{lançFed}$ é o volume anual de água lançada, em m³/ano, e o $PPU_{DBO_{5,20}}$ é o preço público unitário pago pelo lançamento de água (Tabela 1).

2.7.2 Avaliação do impacto econômico das medidas de conservação no sistema hídrico industrial

A avaliação econômica das medidas de conservação hidro-energética no sistema hídrico industrial pode ser realizada determinando o custo de operação e manutenção deste

sistema nas condições atuais da indústria e, posteriormente, comparando com o custo após implementação das medidas de conservação. Além disto, pode-se incluir a cobrança pelo uso da água para avaliar seu impacto econômico.

O custo do sistema hídrico de uma indústria inclui os custos de operação do sistema de captação, tratamento e distribuição de água, além dos custos de operação do sistema de coleta e tratamento e disposição dos efluentes líquidos. Também deve incluir a cobrança pelo uso da água, quando esta estiver em vigor.

Excluindo a cobrança pelo uso da água, o custo associado ao sistema hídrico $C_{SistHid}$, em R\$, pode ser calculado pela equação (6).

$$C_{SistHid} = C_{SistAgua} + C_{SistEflu} \quad (6)$$

O custo do sistema de abastecimento de água, $C_{SistAgua}$, depende da fonte de abastecimento (concessionária de água, manancial superficial ou subterrâneo, reúso de água, água de chuva). Para as indústrias que captam água diretamente de mananciais superficiais ou subterrâneos, assim como para os sistemas de reúso de efluentes e aproveitamento de água de chuva, os custos vão depender dos custos de adução da água bruta e tratada e do tipo de tratamento requerido. Neste caso, o custo do sistema de abastecimento pode ser expresso, em R\$, pela equação (7).

$$C_{SistAgua} = C_{Bomb} + C_{Trat} \quad (7)$$

Em geral, os custos de adução, C_{Bomb} , são compostos pela soma dos custos de bombeamento da água bruta e tratada, que pode ser obtido multiplicando-se a potência do motor pelo total anual de horas de bombeamento, no horário de fora de ponta e na ponta, e pelos correspondentes valores de tarifa de energia.

Para as indústrias que utilizam água da concessionária o custo do sistema de abastecimento, $C_{SistAgua}$, deverá ser considerado o preço cobrado pela água fornecida.

O custo de tratamento da água, C_{Trat} , vai depender da qualidade da água disponível e da qualidade da água requerida. O tratamento convencional da água, por sua vez, é obtido somando-se os custos anuais relacionados a compras de produtos químicos (carbonato de sódio, hipoclorito de sódio e sulfato de alumínio), os custos de operação e manutenção e o custo de depreciação da Estação de Tratamento de Água - ETA.

Nos custos com o sistema hídrico da indústria também estão inclusos os custos para coletar, tratar e lançar o efluente, $C_{Sist\ Eflu}$, calculados conforme a equação (8).

$$C_{SistEflu} = C_{BombE} + C_{TratE} + T_{Res} \quad (8)$$

O custo de tratamento do efluente, C_{TratE} , vai depender do grau e tipo de tratamento necessário para atender as exigências da legislação ambiental. Deve-se verificar a necessidade ou não do emprego de produtos químicos, em geral, carbonato de sódio e polímero, e os custos destes. Também deve-se incluir o custo de manutenção, operação e depreciação dos equipamentos da Estação de Tratamento de Efluentes - ETE. No caso de reúso de efluentes e aproveitamento de água de chuva, o custo vai depender do grau e tipo do tratamento necessário para atender as exigências de qualidade requerida no processo em que for utilizado.

O custo de bombeamento, C_{BombE} , corresponde ao custo de operação e manutenção do sistema de bombeamento do efluente por todas as etapas da coleta, tratamento e lançamento dos efluentes. Portanto, tal custo depende das características dos conjuntos elevatórios instalados, do número de horas de bombeamento, do preço da tarifa de energia elétrica, etc.

Os custos com a disposição dos resíduos, T_{Res} , vai depender de como é realizada a disposição dos resíduos provenientes do tratamento de efluentes. O efluente final é, em geral, lançado no corpo receptor através ou não de um sistema de bombeamento. Os resíduos sólidos são dispostos em aterros sanitários ou em locais de compostagem, portanto, devem ser contabilizados os custos com a disposição e o custo do transporte dos resíduos até o local.

Para avaliar o impacto da cobrança pelo uso da água no custo do sistema hídrico da indústria é adicionado ao custo deste sistema o valor pago pela cobrança pelo uso da água, dado pela equação (1). O custo do sistema hídrico total, $C_{SistHidT}$, em R\$, resulta na equação (9):

$$C_{SistHidT} = C_{SistAgua} + C_{SistEflu} + Valor_{Total} \quad (9)$$

3 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A preocupação crescente com a menor abundância, em um futuro próximo, das fontes energéticas primárias, principalmente petróleo e gás natural, bem como a preocupação com a preservação do meio ambiente, têm levado os planejadores a considerar outros recursos para assegurar o pleno atendimento da demanda futura de energia. Esses recursos incluem uma maior diversificação da matriz energética, com uma participação mais significativa de fontes renováveis e/ou alternativas, e a eficiência energética (SIITONEN; TUOMAALA; AHTILA, 2010).

O relatório sobre as medidas mitigadoras para os problemas de mudanças climáticas (METZ, 2007) destaca que a eficiência energética tem um papel central na redução do aquecimento global, além de ser uma solução mais econômica de atendimento a demanda que o aumento da oferta de energia. Portanto, a conservação de energia desponta como uma alternativa que proporciona o aumento da competitividade da indústria e redução dos impactos ambientais.

3.1 Medidas de Conservação de energia

As medidas de conservação de energia constam de ações de combate ao desperdício de energia e melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais. Entretanto estas medidas não podem ser adotadas de forma pontual, pois podem ocorrer de resultados importantes e se dispersar ao longo do tempo dentro da indústria. Elas têm que ser empregadas dentro de um Programa de Eficiência Energética - PEE que visem à otimização da energia através de orientações, direcionamento, ações e controle sobre os recursos humanos, materiais e econômicos reduzindo a quantidade de energia necessária para obtenção de um determinado produto sem interferir em sua qualidade (HADDAD et al., 2001).

A auditoria energética é a primeira etapa de um programa de eficiência energética. Ela tem por objetivo determinar onde, quanto e como está sendo consumida a energia dentro da indústria e a partir destas informações avaliar quais as medidas de eficiência energética a serem adotadas (HADDAD et al., 2001).

A próxima etapa de um programa de eficientização é a adoção de medidas de conservação do uso de energia de fácil implementação e baixo custo que foram levantadas na auditoria energética. Estas medidas estão relacionadas aos principais usos da energia em uma

indústria que, em geral, concentram-se no sistema de iluminação, nos equipamentos de força motriz e aquecimento/refrigeração.

A conservação de energia também envolve o estudo do aproveitamento energético dos resíduos gerados na indústria. Esta medida visa à recuperação de resíduos que são descartados no meio ambiente, minimizando os impactos e reduzindo os custos de transporte dos resíduos (BRASIL, 2009a). Além disto, esta medida pode resultar no incremento da receita e contribuir com o balanço energético positivo da indústria.

Uma das formas mais simples de aproveitamento dos resíduos é através da combustão direta em fornos, caldeiras etc. Este aproveitamento tem baixa eficiência e uma das formas para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais é o desenvolvimento de tecnologias de conversão mais eficientes, tais como a gaseificação e a pirólise. Ressalta-se que estas medidas requerem maior investimento e estudos técnicos mais complexos. Os resíduos também podem ser aproveitados de forma indireta como, por exemplo, a utilização do sebo para produção do biodiesel.

Uma outra medida de conservação que pode ser implementada é a cogeração, ou seja, o aproveitamento de parte do calor perdido de um processo para a geração de energia elétrica.

3.1.1 Aproveitamento de fontes alternativas de energia

Os resíduos gerados pelas agroindústrias, de um modo geral, apresentam valor energético que podem ser aproveitados no sistema de geração de vapor ou eletricidade. Os principais setores com possibilidade de aproveitamento de seus resíduos incluem as indústrias de sucroalcooleira, abatedouros e frigoríficos, papel e celulose, arroz entre outros.

As principais vantagens do aproveitamento dos resíduos agroindustriais são a diminuição do impacto de descarte deste material no meio ambiente e ainda, a redução da dependência da energia comprada (BRASIL, 2009a). Além disto, a substituição dos combustíveis fósseis por biomassa produzida de forma sustentável contribui para reduzir as emissões de CO₂.

No caso da indústria de abatedouro e frigoríficos uma das alternativas é a utilização do sebo, do lodo e do biogás gerado na estação de tratamento de efluentes, para produção de energia elétrica ou calorífica.

3.1.2 Aproveitamento energético do biogás

O biogás é um combustível gasoso com um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural, composto, principalmente, por hidrocarbonetos de cadeia curta e linear. As indústrias que empregam o tratamento anaeróbio no tratamento do efluente geram como subproduto da decomposição da matéria orgânica o biogás que pode ser aproveitado para produção de calor ou energia elétrica. Este aproveitamento é desejável tanto para a indústria, que pode se tornar autossustentável, quanto em termos de otimização do uso dos recursos energéticos de um país. Neste último caso, aproveita-se um gás que normalmente é queimado em *flare* em substituição a outro combustível utilizado pela empresa de geração de energia elétrica.

As duas principais alternativas para o aproveitamento energético do biogás são o aproveitamento térmico e a conversão em energia elétrica. O aproveitamento da energia térmica pode ser realizado através da queima direta em aquecedores, esquentadores, fogões, caldeiras etc. Borges, Godinho e Chernicharo (2005) apresenta como uma promissora alternativa o emprego do biogás gerado em sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos como fonte de energia calorífica para higienização térmica do lodo anaeróbio excedente.

O aproveitamento energético do biogás também pode ser realizado através da conversão da energia térmica em energia elétrica. Neste caso, as tecnologias convencionais para seu aproveitamento são os motores de combustão interna (MCI), ciclo Otto, e as microturbinas (MT) a gás. Estas duas alternativas técnicas serão analisadas neste trabalho.

Os motores de combustão são os equipamentos mais utilizados para a queima do biogás por sua flexibilidade, simplicidade e robustez. Apresentam uma eficiência elétrica entre 30 a 40% e as emissões resultantes podem variar de 250 ppm a 3000 ppm (COELHO et al., 2006).

As microturbinas apresentam tecnologia mais complexa, que exigem a utilização de compressores e mecanismos de purificação do biogás. As turbinas de pequeno porte (30 kW a 100 kW) possuem rendimento menor, variando de 24 a 28%, e custos elevados quando comparados aos motores de combustão. A grande vantagem das microturbinas é o ganho ambiental devido a baixa taxa de emissões (COELHO et al., 2006).

Em princípio, o volume de biogás produzido na ETE pode ser estimado em função do valor da Demanda Química de Oxigênio removida (DQO_r) durante o tratamento, que é definida pela diferença entre a Demanda Química de Oxigênio de entrada (DQO_e) e a Demanda Química de Oxigênio de saída (DQO_s) do tratamento de efluentes. A produção teórica de metano (CH_4) em um reator de fluxo ascendente é de $0,35 \text{ m}^3 CH_4/kg DQO_r$.

Entretanto, na prática, ocorre uma perda de biogás devido à dificuldade de coleta (VERONEZ; GONÇALVES, 2002). Por este motivo, considera-se uma taxa de conversão de CH_4 igual a $0,3 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg DQOr}$.

A potência elétrica resultante de um processo de conversão do biogás pode ser determinada pela equação (10):

$$P_{\text{Biogás}} = \frac{Q_{\text{Biogás}} \cdot \text{PCI}_{\text{Biogás}} \cdot \eta_s}{24} \quad (10)$$

Onde $P_{\text{Biogás}}$ é a potência disponível (em kW), $Q_{\text{Biogás}}$ é a vazão diária de biogás (em m^3/d), $\text{PCI}_{\text{Biogás}}$ é o poder calorífico inferior de biogás (kWh/m^3) e η_s é o rendimento do sistema de conversão de energia.

A escolha entre um motor e outro deve ser feita com base em uma análise de viabilidade econômica e ambiental. A análise de viabilidade econômica pode ser feita através do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL). Alternativamente, ou de forma complementar, pode-se analisar a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* (PB).

3.1.3 Aproveitamento energético do sebo

As indústrias que processam carne produzem como um dos subprodutos o sebo que pode ser empregado como matéria prima na fabricação de cosméticos, sabão, fertilizante, ração, entre outros. Além disto, o sebo possui propriedades que o qualificam como combustível constituindo-se em uma outra alternativa para produção de energia.

O sebo pode ser queimado diretamente em fornalhas ou utilizado na produção de biodiesel. Cárdenas (2011) ressalta que para utilização direta em queimas em fornalhas, a caracterização deve ser minuciosa quanto à facilidade de queima, transferência de calor da chama e emissão de poluentes atmosféricos. A queima correta do sebo contribui para reduzir as emissões de CO_2 para atmosfera, evitar a geração de passivo ambiental ou descarte clandestino (CÁRDENAS, 2011).

O biodiesel é uma fonte de energia renovável promissora como alternativa à queima de diesel de petróleo. As vantagens ambientais do biodiesel em comparação com o diesel de petróleo são significativas, pois constituem uma fonte de energia renovável com um conteúdo energético próximo a do óleo diesel e sua queima emite em média 48% menos monóxido de

carbono, 47% menos material particulado, e 67% menos hidrocarbonetos, EPA (2002). O poder calorífico inferior do sebo de boi é igual a 39.986 kJ/kg (CÁRDENAS, 2011).

Atualmente, a principal fonte de matéria-prima para a produção do biodiesel no Brasil é a soja, seguido pelo sebo bovino. Entretanto, o país é um dos maiores produtores de carne do mundo, o que favorece o aumento da participação do sebo bovino na produção de biodiesel e contribui para o que o biodiesel produzido deste resíduo tenha um baixo custo de comercialização. Atualmente, uma parte do sebo bovino disponível é aproveitada na produção de biodiesel, na indústria de cosméticos, fabricação de borracha entre outros. Porém, existe ainda uma parcela que não é aproveitada e que pode resultar em um grave problema ambiental.

O aproveitamento do sebo bovino também já é uma realidade em outros países, por exemplo, o frigorífico Verkerks na Nova Zelândia substituiu o óleo diesel (7.000 litros de diesel por semana) consumido na caldeira de 1,2 MW pelo sebo bovino (EECA, 2009a).

Ressalta-se que, a adoção de medidas de prevenção à poluição, como a separação da gordura da proteína sólida e a água contida no material cru, é um passo importante para a preservação da qualidade do sebo, assim como práticas adequadas de carregamento, estocagem e manuseio.

3.1.4 Aproveitamento energético do lodo da estação de tratamento de efluentes

O lodo resultante do tratamento do efluente doméstico e de indústrias pode ser empregado como fonte de energia de biomassa para geração de calor em caldeiras e termelétricas.

O tratamento físico-químico de efluentes com alto teor de matéria orgânica gera como subproduto uma grande quantidade de lodo que deve ser submetido ao processo de biodigestão, anaeróbia ou aeróbia, com a finalidade de adequação aos parâmetros sanitários exigidos na legislação. Após o processo de biodigestão, o lodo resultante passa por um processo de desidratação e de inertização para que se possa dispô-lo em aterros sanitários. Em geral, o lodo é transportado em carretas para a disposição em local adequado, o que resulta em gastos com transporte. Uma alternativa que visa à sustentabilidade é o aproveitamento energético do lodo, evitando assim os gastos com inertização e de transporte do mesmo.

O lodo possui poder calorífico elevado, o que viabiliza sua aplicação como fonte de biomassa, mas o excesso de umidade pode prejudicar o processo de combustão, sendo então

necessário um processo de secagem antes de sua utilização. O poder calorífico inferior (PCI) obtido por Sena (2005) com a biomassa centrifugada foi de 5.470 kcal/kg e o poder calorífico superior (PCS) foi de 5.855 kcal/kg.

O lodo residual também pode ser empregado para a produção de biodiesel. Neste caso, pode-se aplicar pirólise rápida para a liquidificação de biomassa e resíduos orgânicos. No processo, o material básico é termicamente decomposto na ausência de oxigênio por aquecimento rápido até 500° C. O biodiesel é o principal produto obtido, mas obtêm-se também carvão vegetal e gás pobre. A pirólise é uma tecnologia recente, mas promissora, visto que possibilita a geração de energia elétrica e a adequada eliminação dos resíduos.

Uma das principais dificuldades do tratamento do lodo proveniente do efluente da agroindústria frigorífica é a presença de sangue, pois este inibe a formação de flocos no tratamento por coagulação e floculação, diminuindo a sua eficiência. Além disto, a presença também de enxofre e cloro no lodo é responsável pela formação de poluentes ácidos durante a combustão do biogás. O cloro pode ainda resultar na formação de compostos organoclorados (SENA, 2005).

A combustão do lodo frigorífico gera, além do SO₂, CO₂ e H₂O, outros compostos como NO_x, CO e compostos orgânicos voláteis, devido à impossibilidade de atingir a combustão completa em condições reais. A produção de SO₂ contribui, entre outros, para a formação de chuvas ácidas.

A utilização adequada do lodo consiste numa importante fonte sustentável de matéria prima para a geração de energia devido à renovação e constante produção de lodo, o que contribui indiretamente para a redução do uso de outros combustíveis.

3.2 Cogeração

A cogeração pode ser definida como a extração combinada de calor útil e potência mecânica de um recurso energético. Em outras palavras, em uma unidade de cogeração, parte da energia que seria perdida em forma de calor é aproveitada em outro processo, aumentando a eficiência térmica em até 90% (PRIETO, 2003). Além da geração de energia mecânica e elétrica, a recuperação de calor residual pode ser empregada em sistemas de aquecimento e resfriamento de fluidos, secagem de produtos agrícolas etc.

A produção combinada de calor e geração de energia inclui uma série de tecnologias conhecidas, confiáveis e custo-eficiente. O emprego desta tecnologia pode oferecer ganhos

energéticos e ambientais pela redução do consumo de energia primária e emissões de gases de efeito de estufa associadas (WESTNER; MADLENER, 2009). A natureza da geração distribuída da tecnologia também tem potencial para reduzir as perdas de transmissão elétrica e ineficiências de distribuição e para aliviar os problemas de pico de demanda de serviços públicos (WESTNER; MADLENER, 2009). Entretanto, é importante ressaltar que a cogeração exige investimentos elevados e a venda dos excedentes de energia produzida requer custos adicionais associados com a integração com o sistema de rede.

A cogeração industrial é uma parte importante da geração de energia em alguns países da União Européia. Segundo Westner e Madlener (2009), a contribuição da cogeração para geração de energia na Alemanha foi de 71,6 GWh em 2005, o que equivale a uma quota de 11,6% em termos de geração total de energia, enquanto que países como Holanda, Dinamarca e Finlândia já cogeram 35% da energia consumida (PRIETO, 2003). Nos Estados Unidos da América, a fragmentação da indústria elétrica facilita o desenvolvimento da cogeração e o governo federal tem como meta a priorização do aproveitamento de fontes de energia locais.

No Brasil, a tradição em cogeração se dá no setor sucroalcooleiro e papel e celulose, consequência do alto consumo de energia, da necessidade de utilização do vapor e da abundância de biomassa produzida. Destaca-se a geração de eletricidade principalmente no setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo e no segmento arrozeiro nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

A indústria, ao dispor de um esquema térmico para a produção de potência elétrica, pode satisfazer parte ou a totalidade da demanda da planta, e ainda estudar a possibilidade de uma produção excedente para venda à rede da concessionária local. O estudo de viabilidade técnico-econômico do emprego da cogeração depende, entre outros, do preço da tarifa de eletricidade e do combustível utilizado, assim como da liquidez da venda de excedentes.

3.3 Análise econômica das medidas de conservação

Os métodos mais comumente utilizados para análise econômica de projetos incluem o Valor Presente Líquido - VLP, a Taxa Interna de Retorno - TIR e o *Payback*.

O método do VPL consiste no cálculo da soma do investimento inicial com os valores atualizados de fluxo de caixa ao longo do tempo para uma dada taxa de desconto, conforme equação (11).

$$VPL = -I_o + \sum \frac{FC}{(1+tx)^{na}} \quad (11)$$

Onde I_o é o investimento, FC é o fluxo de caixa, tx é a taxa de juros e na a vida útil em anos dos equipamentos. Quanto maior o VPL, mais atrativo do ponto de vista econômico é o projeto.

A TIR é o valor de taxa interna de retorno de um investimento para o qual o VPL é nulo. Seu cálculo é feito de forma recursiva utilizando a equação (11) e variando-se o valor de tx. O investimento será atrativo se a TIR for maior do que a taxa mínima de retorno esperada para o investimento.

O *payback* é outra forma de avaliar economicamente um projeto. Trata-se do tempo de recuperação do capital investido e pode ser calculado através da equação (12).

$$PB = \frac{I_o}{\sum FC_{anual}} \quad (12)$$

3.4 Emissão de gases poluentes na geração de energia elétrica

A geração de energia e calor são responsáveis por cerca de 31,1% das todas emissões mundiais dos GEE, de acordo com o *World Resources Institute* (CAIT, 2012). Isto ocorre porque a grande parte da energia é obtida por meio de queima de combustíveis fósseis que resulta na emissão de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), além de materiais particulados (MP). O acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera está alterando o clima da Terra de forma a contribuir para intensificação dos problemas de escassez de água, de perda de biodiversidade e declínio na produtividade agrícola em muitos países (METZ, 2007).

No Quadro 2 estão relacionados os principais gases poluentes e seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente.

Quadro 2 – Principais gases poluentes e seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente

Poluente	Efeitos na saúde humana e no meio ambiente
SO _x	São gases tóxicos que podem causar lesões do aparelho muco-ciliar, uma defesa importante do organismo, provocando traqueobronquite crônica e predisposição a injeções respiratórias, como por exemplo, broncopneumonias. Uma vez lançado na atmosfera, o SO ₂ é oxidado, formando ácido sulfuroso que ao entrar em contato com a umidade atmosférica gera o ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) presente na chuva ácida.
NO _x	Em altas concentrações, causa inflamações graves nas mucosas das vias respiratórias, podendo em alguns casos ser fatal. Além disto, o óxido nitroso (N ₂ O) está diretamente relacionado com efeito estufa e a chuva ácida.
CO	Ele é tóxico, podendo acarretar a diminuição da liberação de oxigênio para os tecidos e células.
MP	Em geral, essas partículas são filtradas pelo nariz e garganta, podendo desencadear processo alérgicos, de asma e bronquite. O MP quando em altas concentrações restringe a visibilidade; contribui na formação da chuva ácida, responsável pela perda de nutrientes do solo e por danificar monumentos e estátuas.
CO ₂ e CH ₄	Não são gases tóxicos, mas o aumento de suas concentrações resulta na intensificação do efeito estufa.

3.4.1 Emissão de gases poluentes pelas usinas termelétricas

Três quartos das emissões mundiais de CO₂ são resultantes da queima de combustíveis fósseis, sendo que 35-36% das emissões totais de CO₂ resultam da combustão de combustível em termelétricas (HAMMONS, 2005; BEARD et al., 2010). A obtenção de eletricidade por meio de combustíveis fósseis é também a principal fonte de metano, monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, material particulado, entre outros. Estes gases afetam diretamente a saúde humana, dos animais e plantas e são responsáveis pelo aumento do efeito estufa.

As usinas termelétricas geram energia elétrica a partir da energia térmica liberada por reações químicas ou nucleares. Os combustíveis mais utilizados são o óleo diesel, óleo combustível, gás natural, carvão mineral, resíduos da indústria de açúcar e álcool etc. Nas usinas termelétricas as emissões vão depender da composição do combustível, tipo e capacidade da caldeira e do método de controle utilizado.

O Quadro 3 apresenta os principais combustíveis empregados em termelétricas e suas emissões. Verifica-se que o carvão é o combustível que apresenta as maiores emissões de material particulado e NO_x. A combustão do óleo residual é a que resulta na maior emissão de CH₄ ao contrário da biomassa em que a emissão de CH₄ é nula.

Quadro 3 – Emissão de poluentes lançados na atmosfera pela geração de eletricidade (g/kWh)

Combustível	Emissão de poluentes					
	CH ₄	CO	MP	SO ₂	NO _x	(CO ₂)eq ⁷
Carvão	4-5	1-1,5	9-10	6-7	16-17	1000-1200
Gás natural	0-1	2-2,5	0-1	-	8-10	500-600
Óleo residual	6-7	2-2,3	0-1	3-4	8-9	800-1000
Biomassa	-	0-0,5	0-1	0-1	0-2	0-200

Fonte: Adaptado de Goldemberg (2003)

3.4.2 Emissão de gases poluentes pelos reservatórios das usinas hidrelétricas

As usinas hidrelétricas, até pouco tempo atrás, eram consideradas como fonte limpa e renovável de produção de energia elétrica. Entretanto, a partir dos anos noventa, começaram a surgir estudos revelando que os reservatórios de usinas hidrelétricas poderiam ser emissores potenciais de gases de efeito estufa, particularmente de metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂). As usinas hidrelétricas emitem quantidades significativas de gases de efeito estufa, em especial, nos primeiros anos após a criação do reservatório, mas a extensão global dessas emissões ainda é pouco conhecida ao longo de sua vida útil (BARROS et. al., 2011).

As emissões originam principalmente da decomposição da matéria orgânica que foi submersa, da biomassa formada pelo processo de fotossíntese nas águas do reservatório e dos fluxos de nutrientes provenientes da bacia hidrográfica a montante do reservatório (SBRISSIA, 2008). Nas camadas mais profundas do reservatório prevalecem as condições anaeróbias e a biomassa presente decompõe-se liberando principalmente CH₄. Nas camadas onde prevalecem as condições aeróbias ocorre a liberação de CO₂ e N₂. Os gases são liberados na atmosfera através de caminhos múltiplos na superfície do reservatório e quando a água é liberada da barragem (MÄKINEN; KHAN, 2010).

A intensidade das emissões é bastante variável, pois é influenciada por diversos fatores incluindo concepção, idade e regras de operação do reservatório, condições climáticas (temperatura, regime de ventos, incidência solar, latitude, etc), parâmetros físico-químicos da água, composição da biosfera e a produtividade do ciclo natural do carbono (BRASIL, 2006). Os reservatórios localizados nas regiões tropicais tendem a ter níveis de emissões mais elevados que os localizados em clima frio em razão dos ciclos naturais de carbono mais

⁷ Dióxido de carbono equivalente – (CO₂)eq é uma medida métrica utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa baseada no potencial de aquecimento global de cada gás (METZ, 2007).

curtos, da matéria orgânica em abundância, e das grandes áreas de superfície e pequena profundidade dos reservatórios (SOUMIS et al., 2005).

A quantidade de gases liberada pelos reservatórios pode ser determinada através de modelos de conservação de massa quando há dados disponíveis da quantidade de biomassa inicial, do modo de decomposição e das trajetórias do carbono (BRASIL, 2006). No entanto, atualmente estas informações são incipientes, sendo necessária a realização de medições diretas em campo de troca de gás na interface ar-água (BRASIL, 2006; SANTOS, 2008). Este trabalho é oneroso, demanda um tempo muito longo e ainda há necessidade de implementação de uma metodologia padrão internacional (SBRISSIA, 2008).

Também não há informações sobre as emissões antes do represamento, visto que os ecossistemas aquáticos naturais também emitem uma certa quantidade de gases de efeito estufa. A falta de dados de emissões no pré-represamento dificulta determinar o impacto líquido da barragem, embora as informações de lagos nas proximidades possam ser usadas como referência (MÄKINEN; KHAN, 2010).

Parte do material orgânico que contribui para as emissões de gases de efeito estufa de um reservatório tem origem na bacia hidrográfica de contribuição. Isto é observado principalmente em reservatórios mais antigos, para os quais a biomassa alagada inicialmente já foi decomposta, e os níveis de emissão continuam elevados. Neste caso, o uso da terra e práticas de gestão nas áreas a montante podem influenciar significativamente a quantidade de carbono que flui para um reservatório (MÄKINEN; KHAN, 2010).

Embora a mensuração das emissões necessite de definição de uma metodologia padronizada e de uma série histórica de dados longa e confiável das emissões dos reservatórios, é necessário estimar valores destas emissões para viabilizar ações de redução de impactos ambientais negativos. Mäkinen e Khan (2010) sugerem que todas as questões sobre as emissões de reservatórios devem ser mais investigadas enquanto se aguarda os protocolos de medição padronizada e os esforços de modelagem multi-escala do ciclo do carbono dos reservatórios e nascentes.

Em função das dificuldades expostas, a UNFCCC (2006) adota um critério para o cálculo das emissões de reservatórios para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL⁸. Logo, para realização de projeto de MDL a emissão de CO₂ é baseada na

⁸ Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL (*Clean Development Mechanism* – CDM) foi definido no Artigo 12 do Protocolo de Quioto e regulamentado pelos Acordos de Marraqueche. Dispõe sobre atividades de projetos de reduções de emissões de GEE ou aumento de remoção de CO₂, implementadas em países em desenvolvimento visando ganhar créditos de redução certificada de emissões. Esses créditos comercializáveis

densidade de potência (capacidade de geração da usina dividida pela área inundada) e considera-se a emissão de 90 kg (CO₂)eq/MWh somente para as centrais hidrelétricas que apresentarem densidade de potência maior ou igual a 4 W/m² e menor ou igual a 10 W/m². Mas, a UNFCCC (2006) recomenda que cada país realize medidas diretas do fluxo de gases de forma a diminuir as incertezas no cálculo das emissões.

Como signatário do Protocolo de Quioto, o Brasil se comprometeu a quantificar suas emissões de gases-estufa por meio de inventários de cada setor de atividade. O primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos brasileiros foi publicado pelo Ministério da Ciência Tecnologia - MCT (BRASIL, 2006). Neste estudo foram medidas as emissões de metano e de dióxido de carbono em nove reservatórios hidrelétricos. Estas hidrelétricas foram escolhidas de acordo com a sua importância e localização geográfica.

O índice de emissão de CO₂ e CH₄ (kgCO₂/km²/dia) das nove usinas hidrelétricas brasileiras estudadas no Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2006) está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Índice de Emissão de CH₄ e CO₂ dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

Hidrelétrica	Área	Latitude	Potência	Índice de emissão de CH ₄	Índice de emissão de CO ₂	Emissão total de carbono C [1]
	km ²		MW	kg/km ² /dia	kg/km ² /dia	10 ³ tC/ano
Tucuruí	2.430	3°45'S	4.240	109,4	8.475,0	2.603,0
Samuel	559	8°45'S	216	104,0	7.488,0	538
Xingó	60	9°37'S	3.000	40,1	6.138,0	42
Serra da Mesa	1.784	13°50'S	1.275	51,1	3.973,0	895
Três Marias	1.040	18°13'S	396	196,3	1.117,0	540
Miranda	51	18°55'S	390	154,2	4.388,0	38
Barra Bonita	312	22°31'S	140	20,9	3.985,0	137
Itaipu	1.549	25°26'S	12.600	20,8	171,0	93
Segredo	82	27°47'S	1.260	8,8	2.695,0	23
Total	7.867		23.517			4.911

Fonte: BRASIL (2006) [1] C = (CH₄x12/16x7,6+CO₂x12/44)x365/1.000

Verifica-se na Tabela 4 que a usina hidrelétrica de Tucuruí tem uma potencia instalada de 4,2 GW o reservatório possui uma área de inundação de 2.430 km² e apresenta o maior índice de emissão de CO₂, 8.475 kg/km²/dia. Entretanto, o reservatório da usina de Samuel apresenta uma área de inundação 4 vezes menor e índice de emissão de CO₂, 7.488

kg/km²/dia, é tanto quanto elevado. O reservatório de Itaipu apresenta a maior área de inundação de 1.549 km², entretanto a menor índice de emissão de CO₂, 171 kg/km²/dia e a potência da usina é de 12,6 GW.

4 INDICADORES AMBIENTAIS

A preocupação com a degradação do meio ambiente em consequência do uso excessivo dos recursos naturais e do lançamento indiscriminado de resíduos no meio ambiente resultou na necessidade de se buscar um modelo de desenvolvimento sustentável. Este conceito foi introduzido pela primeira vez em 1987, com a publicação do Relatório Brundtland, intitulado *Our Common Future* pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (MOLDAN; JANOŮŠKOVÁ; HÁK, 2011).

O setor empresarial, preocupado em tornar prático o conceito de desenvolvimento sustentável, busca um modelo de sustentabilidade empresarial, que, apoiado num sistema de gestão socioambiental, visa o aumento e melhoria da produtividade. Este é um processo contínuo e que exige aperfeiçoamento, portanto, é imperativo fixar objetivos e monitorar o desempenho através de indicadores.

Os indicadores ambientais são necessários para aferir e subsidiar a tomada de decisão e ajustar as ações de sustentabilidade e ainda comprovar a eficiência do modelo empregado. Segundo Cantarino citado por Salgado (2004), os indicadores são parâmetros através dos quais é possível obter informações acerca de um processo. Eles fornecem informações quantitativas e qualitativas que permitem verificar a eficácia e a eficiência da indústria na utilização dos recursos naturais sob o aspecto econômico, ambiental e social.

Os indicadores ambientais foram definidos por Gomes (2011) da seguinte maneira:

Os indicadores são ferramentas que podem fornecer informações ao longo do tempo em uma variedade de escalas espaciais que podem mostrar as tendências ambientais, sendo por tais propriedades, cada vez mais usados como uma maneira simples de observar o complexo ambiente, avaliar o impacto e direcionar respostas a estes problemas.

A utilização de indicadores ambientais é uma medida necessária para assegurar transparência das ações ambientais. Os indicadores serão mais valiosos se, através de sua padronização, permitir a comparação com indicadores de outras empresas, e ainda tiverem a sua aceitação pelos usuários. Os resultados positivos na análise dos indicadores se refletirão na redução de riscos para a saúde ambiental e humana, além de trazer benefícios econômicos para o empreendedor, contribuindo sobremaneira para a imagem empresarial e melhoria de competitividade (PACHECO; YAMANAKA, 2006).

O indicador ambiental é um parâmetro que fornece uma informação significativa a respeito do estado ou condição do meio ambiente, das atividades humanas que afetam ou são afetadas pelo meio ambiente ou da relação entre estas variáveis. Nesta classe de indicadores,

encontram-se os indicadores de desempenho ambiental que traduzem os impactos sobre o meio ambiente dos processos e técnicas adotados para realizar as atividades de uma organização. Há também os indicadores de sustentabilidade ambiental que compreendem informações a cerca das dimensões econômicas, sociais, ambientais e institucionais de práticas sustentáveis de uma empresa (MELO, 2006).

Os indicadores de desempenho ambiental apresentam informações provenientes de medidas diretas ou indiretas de qualidade ambiental e expressam o desempenho ambiental das empresas. Estes indicadores são utilizados para avaliar, apontar a situação e as tendências das condições de um dado ambiente, e servir como uma ferramenta útil para tomada de decisão e para comparação de desempenho ambiental de empresas de diferentes países (MELO, 2006).

Há vários estudos que apresentam revisões e análises sobre o estado da arte dos indicadores ambientais. Salgado (2004) apresenta uma série cronológica das diversas iniciativas e programas que têm sido estabelecidos com o objetivo de desenvolvimento de indicadores eficientes. Destaca-se os trabalhos da *World Business Council for Sustainable Development* - WBCSD, que introduziu o conceito de ecoeficiência⁹ e propôs indicadores específicos para apoiar empresas a estabelecerem metas e a acompanhar seu desempenho. A *Organization for Economic Co-operation and Development* – OCDE classificou os indicadores em termos de Pressão-Estado-Resposta. Trata-se de um modelo baseado no conceito de causalidade: as atividades humanas exercem pressões sobre o ambiente, modificando sua qualidade e a quantidade de recursos naturais; a sociedade, por sua vez, responde a estas mudanças por intermédio de políticas ambientais, econômicas e setoriais. O modelo foi expandido para Força Motriz-Pressão-Estado-Resposta pela *US Environmental Protection Agency* – EPA. A série ISO 14000, desenvolvida desde 1993 pelo Comitê Técnico 207 da *International Standardization Organization* (ISO), compreende um conjunto de normas ambientais sobre o estabelecimento de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA). A ISO 14031:2004 objetiva medir e analisar o desempenho ambiental de uma empresa através da adoção de indicadores que permitam comparar os resultados com as metas definidas no estabelecimento do sistema de gestão ambiental. A relevância destes indicadores consiste em possibilitar que os dados coletados sejam avaliados de forma contínua e provejam uma avaliação ambiental atual da empresa bem como a tendência ao longo do tempo.

⁹ Ecoeficiência é uma filosofia de gestão que encoraja a empresa a procurar melhorias ambientais mediante a entrega de mercadorias a preços competitivos e serviços que satisfaçam as necessidades humanas e trazem qualidade de vida, enquanto progressivamente reduz os impactos ambientais e a intensidade de uso dos recursos naturais. Tradução livre do site <http://www.wbcd.org>

A série ISO 14000 estabelece Sistemas de Gestão Ambiental, Auditoria Ambiental, Avaliação de Desempenho Ambiental, Rotulagem Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida e Aspectos Ambientais em Normas e Produtos, além da terminologia utilizada para a compreensão do conjunto das próprias normas. Estas normas não são obrigatórias, mas sua adoção vem aumentando cada vez mais nas indústrias, principalmente naquelas que almejam o mercado internacional e estão preocupadas com sua imagem de responsabilidade com o meio ambiente, como é o caso das indústrias de produção de mercadorias através de processos, matérias-primas e insumos.

A ISO 14001:2004 define o que deve ser feito para estabelecer um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) efetivo. A norma é desenvolvida com objetivo de reduzir os impactos ambientais gerados na produção, transporte, uso e disposição final do produto. Ela visa o equilíbrio entre a manutenção da rentabilidade e a redução do impacto ambiental, juntamente com o comprometimento de toda a organização.

A ISO 14031:2004 estabelece indicadores com objetivo de medir e analisar o desempenho ambiental de uma empresa de forma a prover os tomadores de decisão de informações confiáveis e passíveis de comprovação, e ainda verificar se o desempenho obtido se ajusta às metas estabelecidas no sistema de gestão ambiental.

Em 2002 foi criado pela ISO o Comitê Técnico da ISO/TC 207 sobre Mudanças Climáticas (WG 5) com o objetivo de desenvolver normas internacionais para a medição, monitoramento, comunicação e verificação das emissões e absorção de gases estufa, ao nível de projetos e entidades. A finalidade é atender as necessidades corporativas e facilitar a implementação dos projetos de redução de emissões.

A Norma ISO 14064:2006 é um protocolo para contabilização voluntária de gases de efeito estufa, enquanto a Norma ISO 14065:2007 – Gases de efeito Estufa – trata sobre os princípios e requisitos para organismos internacionais que atuarão na validação e verificação de afirmações de mitigações de GEE. Os Requisitos de Competências para as equipes de validação e de verificação de gases de efeito estufa são tratados na ISO 14066:2011.

O Comitê Técnico 207 da ISO também está desenvolvendo a Norma Internacional ISO 14067 sobre Pegada de Carbono, que é uma medida da quantidade de gases-estufa emitidos durante todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração de recursos naturais, fabricação, transporte, uso e até sua disposição final, em termos de $(CO_2)_{eq}$. Esta medida permite conhecer e gerenciar as emissões de gases-estufa na cadeia de suprimentos.

4.1 Indicadores de desempenho ambiental

Para os estudos de Avaliação de Desempenho Ambiental – ADA, a norma ISO 14031:2004, sugere duas categorias de indicadores, a saber: Indicadores de Desempenho Ambiental - IDA e Indicadores de Condição Ambiental – ICA.

Os Indicadores de Condição Ambiental fornecem informações sobre a qualidade do meio ambiente onde se localiza a empresa industrial, através de resultados de medições efetuadas de acordo com os padrões e regras ambientais estabelecidos pelas normas e dispositivos legais.

Os Indicadores de Desempenho Ambiental proporcionam informações quantitativas e qualitativas que possibilitam a determinação da eficiência e efetividade ambiental da empresa em utilizar os recursos disponíveis. De acordo com ISO 14031:2004, eles podem ser classificados em dois tipos:

- Indicadores de Desempenho de Gestão – IDG - fornecem informações sobre todos os esforços de gestão da empresa que influenciam positivamente no seu desempenho ambiental, por exemplo, redução do consumo de materiais e/ou melhoria a administração de seus resíduos sólidos, sem alterar os valores de produção.
- Indicadores de Desempenho Operacional – IDO – fornecem parâmetros para o monitoramento de todas as etapas de operação do processo produtivo de uma empresa com reflexos no seu desempenho ambiental. As informações são relacionadas de forma lógica, considerando-se entradas e saídas de suas instalações físicas e equipamentos, incluso fornecimento e distribuição (ABNT, 2004b). Estes indicadores têm a finalidade de apoiar as atividades de planejamento e controle de todas as atividades com potencial para gerar impacto e fornecer informações relacionadas às operações do processo produtivo da empresa.

O tipo mais adequado de indicador de desempenho operacional que deve ser aplicado a uma organização vai depender do tipo de avaliação que se queira proceder. Devem ser escolhidos os indicadores mais relevantes, cientificamente válidos, de fácil comprovação, e os custos de medição devem ser adequados ao propósito da avaliação. A Tabela 5 ilustra alguns indicadores de desempenho operacional em função do foco da avaliação.

Tabela 5 – Indicadores utilizados na Avaliação de Desempenho Ambiental

Foco de avaliação	Exemplos de indicadores
Energia	- tipo de energia usada/ano ou produto ou serviço.
Água	- tipo de energia gerada com subprodutos ou correntes de processo
	- água consumida/ano ou por produto.
	- água reutilizada/ano ou por produto.
Fornecimento e distribuição	- consumo médio de combustível da frota de veículos.
Resíduos	- resíduos/ano ou por produto.
	- resíduos perigosos, recicláveis ou reutilizáveis produzidos/ano.
	- resíduos perigosos eliminados através da substituição de materiais.
Efluentes líquidos	- volume de efluente orgânico/produto.
	- volume de efluente inorgânico/produto.

Nesta tese os indicadores tem o propósito de avaliar o desempenho da indústria na utilização dos recursos, água e energia. E também avaliar as medidas de conservação de recursos e de energia de forma a diminuir o impacto sobre o meio ambiente. Portanto são selecionados alguns indicadores de desempenho ambiental capazes de refletir a eficiência dos processos produtivos com relação ao seu consumo de água, energia e resíduos. Através destes indicadores pode-se acompanhar a evolução do desempenho de uma indústria à medida que são eficientizados seus processos produtivos, e desta forma verificar a eficácia das mesmas. Estes indicadores são definidos em função da variável que se deseja monitorar e do produto, conforme mostra a Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Indicadores de desempenho ambiental

Indicadores de desempenho ambiental	Unidade
Energia sist. hid. / Volume	kWh/m ³
Volume de água / Produto	m ³ /produto
Volume de efluentes / Produto	m ³ / produto
Energia sist. hídrico / Produto	kWh hídrico/ produto
Energia total / Produto	MWh/ produto
Emissões / Produto	(CO ₂)e/ produto

4.2 Indicador de poluição

O indicador de poluição foi utilizado por Cardu e Baica (1999a; 1999b) na análise do impacto ambiental das emissões resultantes de usinas termelétricas (gás natural, carvão e óleo combustível) na Romênia. Lora e Salomon (2004) utilizaram este indicador em usinas termelétricas brasileiras para comparar as emissões de uma usina termelétrica a biomassa de vinhaça em relação à de uma usina termelétrica a gás natural, diesel e carvão. A poluição

resultante da combustão de gás natural e óleo diesel em termelétricas de ciclo combinado foi analisada por Villela e Silveira (2006) e Silveira, Carvalho Jr. e Villela (2007).

Sob o ponto de vista ambiental, o melhor combustível é aquele que emite a menor quantidade de dióxido de carbono equivalente por unidade de energia resultante da queima do combustível correspondente. Esta razão foi denominada de indicador de poluição por Cardu e Baica (1999a; 1999b). O indicador de poluição permite quantificar a emissão de gases poluentes CO_2 , NO_x , SO_2 e material particulado na combustão de um quilograma de combustível e pode ser expresso pela equação (13).

$$\pi_g = \frac{(CO_2)_e}{PCI} \quad (13)$$

Onde π_g é o indicador de poluição, expresso em $kg(CO_2)_e/MJ$, e representa a quantidade de dióxido de carbono equivalente, $(CO_2)_e$, expresso em kg de $(CO_2)_e$ por kg de combustível pelo PCI, poder calorífico inferior do combustível, expresso em MJ/kg.

Os gases poluentes emitidos pelas indústrias são vários, o que dificulta comparar as emissões de um processo com outro ou de uma indústria com outras. Assim, os gases emitidos do processo de combustão serão mensurados em termos de dióxido de carbono equivalente $(CO_2)_e$, permitindo que a emissão de diferentes gases seja somada.

Na expressão para o cálculo do $(CO_2)_e$, equação (14), os coeficientes referentes aos gases NO_x , SO_2 e MP , respectivamente 50, 80 e 67, são determinados pela relação do valor da concentração máxima permissível para o CO_2 , que é de 10.000 mg/m³ (CARDU; BAICA, 1999a; 1999b), pelos valores de concentração máxima dados pelos padrões de qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde - OMS correspondentes ao NO_x e SO_2 e do padrão nacional de qualidade do ar para material particulado (LORA; SALOMON, 2004; VILLELA; SILVEIRA, 2006; SILVEIRA; CARVALHO JR; VILLELA, 2007).

$$(CO_2)_e = CO_2 + 50.(NO_x) + 80.(SO_x) + 67(MP) \quad (14)$$

Quando da existência de mecanismos e tecnologias de redução de poluição na usina termelétrica, a equação para cálculo do $(CO_2)_e$ se modifica para equação 15.

$$(CO_2)_e = CO_2 + (1 - \sigma_n) \cdot 50 \cdot (NO_x) + (1 - \sigma_{cz}) \cdot 80 \cdot (SO_x) + 67 \cdot (1 - \sigma_c) \cdot (MP) \quad (15)$$

Onde σ_n , σ_s , e σ_p são as respectivas eficiências de remoção do poluente, expressos em probabilidades.

Uma outra alternativa para determinar dióxido de carbono equivalente é a utilização da medida adotada pelo IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* na quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a tonelada de dióxido de carbono equivalente, $t(\text{CO}_2)_{eq}$, (METZ, 2007). Esta medida é definida como o produto da massa física do GEE (em toneladas) pelo seu Potencial de Aquecimento Atmosférico (GWP), conforme mostra a equação (16).

$$t(\text{CO}_2)_{eq} = tGEE.GWP \quad (16)$$

Onde o GWP de um gás é definido como a sua capacidade de armazenar calor na atmosfera em relação à capacidade do dióxido de carbono. Os valores de GWP estão apresentados na Tabela 7. Segundo a equação (16), a emissão de 10 toneladas do gás metano, cujo GWP é igual a 21, gera o equivalente a 210 toneladas métricas de CO_2 equivalente.

Tabela 7 – Os gases de efeito estufa e os seus respectivos potenciais de aquecimento atmosférico

Gases de Efeito Estufa	Simbologia	Potencial de Aquecimento Atmosférico
Dióxido de Carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	21
Óxido Nitroso	N_2O	310
Hidrofluorocarbonos	HFC 23	11700
	HFC 125	2800
	HFC 134a	1300
	HFC 152a	140
Perfluorocarbonos	CF_4	6500
	C_2F_6	9200
Hexafluoreto de Enxofre	SF_6	23900

Fonte: Metz, 2007.

A vantagem do emprego da medida utilizada pelo IPCC, $t(\text{CO}_2)_{eq}$, é sua ampla utilização a nível mundial e sua relação com o estudo do impacto dos gases poluentes na atmosfera e no clima do planeta. A $t(\text{CO}_2)_{eq}$, tonelada de dióxido de carbono equivalente, também é convencionada como medida de cálculo das Reduções Certificadas de Emissões - RCE¹⁰ em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), segundo o artigo 3 do Protocolo de Quioto (UNFCCC, 2011). Mas a vantagem da equação definida por Cardu e

¹⁰ As Reduções Certificadas de Emissões também são comumente denominadas Créditos de Carbono.

Baica (1999a; 1999b), $(CO_2)_e$, é o foco no estudo do impacto local e na saúde humana das emissões de gases poluentes.

4.3 Indicador de poluição do Sistema Interligado Nacional - SIN

O Ministério da Ciência Tecnologia publica em seu portal o fator médio de emissão de CO_2 do Sistema Interligado Nacional – SIN¹¹, para serem utilizados em inventário de gases de efeito estufa. Este fator expressa a quantidade média de emissões de CO_2 por energia gerada, expresso em $t(CO_2)/MWh$, conforme metodologia sugerida pelo IPCC. No cálculo da média das emissões considera todas as usinas que estão gerando energia e não somente aquelas que estão funcionando na margem. O consumidor de energia elétrica do SIN pode calcular as suas emissões multiplicando a energia consumida por esse fator de emissão, e as emissões do SIN são dadas pelo somatório de todos os consumidores. Assim, o fator de emissão deve ser utilizado sempre que for necessário quantificar as emissões da energia elétrica que está sendo gerada em determinado momento (BRASIL, 2011a).

Logo, o cálculo das emissões médias de CO_2 resultantes do uso da energia elétrica provenientes do SIN pode ser obtido multiplicando o fator de emissão (Tabela 8) pela energia consumida (BRASIL, 2011a). É importante ressaltar que este fator de emissão não considera as emissões provenientes dos reservatórios das hidrelétricas, pois, segundo a metodologia adotada, as emissões de fonte renovável não geram emissões líquidas.

Tabela 8 – Fator Médio anual do Sistema Interligado Nacional $t(CO_2)_{equiv} / MWh$

Ano	Fator Médio Anual	
	tCO_2/MWh	kg/MJ
2006	0,0323	0,0090
2007	0,0293	0,0081
2008	0,0484	0,0134
2009	0,0246	0,0068
2010	0,0512	0,0142

Fonte: (BRASIL, 2011a).

¹¹ O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, denominado Sistema Interligado Nacional - SIN é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O SIN é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Definição obtida do site da ONS <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>.

5 PROPOSIÇÃO DE INDICADOR DE DESEMPENHO ENERGÉTICO-AMBIENTAL

O desempenho ambiental de uma indústria está diretamente relacionado com o uso da água e energia e com a geração de resíduos líquidos, sólidos e gasosos. Estas três variáveis são interdependentes: medidas de conservação eficiência hídrica e energética resultam, além dos ganhos hídricos e energéticos, em uma minimização dos resíduos. Por sua vez, o aproveitamento dos resíduos para produção de energia representa uma medida de conservação de energia elétrica/calorífica. Para avaliar e monitorar o desempenho ambiental, indicadores tem sido propostos na literatura utilizando as variáveis de forma individual ou conjugadas.

De maneira geral, quando se faz a avaliação das emissões de gases poluentes de uma indústria, quantificam-se somente aquelas resultantes dos processos de transformação industrial (emissões internas), não incluindo as emissões provenientes do sistema de geração de energia elétrica necessária para atender a demanda da indústria (emissões externas). A inclusão desta parcela pode contribuir na avaliação ambiental dos projetos de suprimento de energia elétrica.

Em muitos dos indicadores ambientais propostos, as medidas de conservação hídrica e energética são avaliadas de forma independente, negligenciando as sinergias destas medidas, o que pode contribuir sobremaneira para a viabilidade econômica das mesmas e melhoria do desempenho ambiental da indústria.

Nesta tese é desenvolvida a equação de um indicador de desempenho ambiental de indústrias, denominado indicador energético-ambiental, que conjuga os ganhos ambientais das medidas de conservação hídrica e energética e que contabiliza as emissões de gases poluentes referentes à operação do sistema de geração de energia elétrica. Este indicador faz uso do conceito de indicador de poluição descrito no capítulo 4, na seção 4.2, o qual requer o conhecimento do poder calorífico dos combustíveis. Para a aplicação deste indicador no cálculo das emissões provenientes dos reservatórios de usinas hidrelétricas é definido um indicador de poluição específico.

5.1 Proposta do indicador energético-ambiental

Nesta tese, define-se um indicador de desempenho ambiental empregando o indicador de poluição descrito na seção 4.2. Este indicador de poluição, da maneira que foi inicialmente

concebido, restringe-se às aplicações de avaliação ambiental de usinas termelétrica com relação às emissões de gases poluentes. Este indicador é aqui estendido para avaliar tanto as emissões geradas nos processos de transformação industrial quanto na produção de energia elétrica. A interdependência entre o uso da água, uso/produção de energia e a geração de resíduos, permite captar em um único indicador o desempenho ambiental de uma indústria. Em outras palavras, melhoria de eficiência hídrica e minimização dos resíduos através de aproveitamento destes para produção de energia podem ser convertidos em ganhos energéticos. Estes ganhos podem então ser somados àqueles oriundos da implementação de medidas de conservação de energia, e o ganho energético resultante pode ser utilizado para compor um indicador que reflita o desempenho ambiental de forma global.

A demanda de energia elétrica pode ser suprida através de sistemas de geração externos à indústria e/ou através de sistema de geração/cogeração instalados dentro da planta industrial. Medidas de conservação hidro-energética podem reduzir o valor da demanda de energia elétrica/calorífica, e esta demanda reduzida pode ser atendida pelos diferentes sistemas de geração elétrica/calor disponíveis a uma dada indústria.

O indicador de energético-ambiental a ser proposto contabiliza explicitamente as emissões das diferentes fontes de geração, e de forma implícita as reduções de emissões resultantes das medidas de conservação hidro-energética. Para que o indicador possa permitir a comparação de desempenho ambiental entre indústrias do mesmo setor é necessário que ele seja definido por unidade de produto. Matematicamente, o indicador proposto, ε , é expresso pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n E_{Int_i} \cdot \pi_{gInt_i} + \sum_{j=1}^m E_{Ext_j} \cdot \pi_{gExt_j}}{\text{produto}} \quad (17)$$

Onde na primeira parcela E_{Int_i} é a energia média associada aos sistemas geradores de calor ou eletricidade internos à indústria, π_{gInt_i} seu correspondente indicador de poluição e n é o número de sistemas geradores de energia da indústria. Na segunda parcela tem-se que E_{Ext_j} é a energia média associada ao sistema de geração de energia elétrica externo à indústria, π_{gExt_j} é o indicador de poluição do gerador elétrico externo e m é o número de usinas consideradas. As energias são expressas em MJ e os indicadores de poluição em $\text{kg}(\text{CO}_2)_e/\text{MJ}$. Logo, o indicador é dado $\text{kg}(\text{CO}_2)_e/\text{produto}$.

Havendo equipamento de cogeração, a demanda de energia elétrica a ser atendida pela cogeração deve ser deduzida da demanda elétrica a ser atendida pelas outras fontes de energia para evitar dupla contabilização das emissões.

A primeira parcela da equação (17) corresponde ao uso/geração de energia nos sistemas/equipamentos internos à indústria como caldeira, motores a combustão etc. A segunda parcela da equação (17) corresponde a energia que é produzida externamente a indústria para atender a sua demanda, como é caso da energia elétrica. A energia pode ser suprida exclusivamente por uma termelétrica ou uma hidrelétrica ou sistema de cogeração, neste caso m é igual 1. No caso da indústria ser atendida por um conjunto de usinas termelétrica e hidrelétrica ($m > 1$), a segunda parcela é resultado da somatória da energia fornecida proporcionalmente por cada sistema gerador pelo seu respectivo indicador de poluição. No caso de se considerar o Sistema Interligado Nacional esta parcela pode ser substituída pelo Fator Médio anual do SIN, $t(\text{CO}_2)/\text{MWh}$ (Tabela 8).

O indicador energético-ambiental, baseado nos indicadores de poluição de cada sistema energético, é uma ferramenta de tomada de decisão para verificar qual fonte de energia é menos impactante para atender a demanda de energia elétrica da indústria. A fonte de suprimento energético pode ser proveniente de concessionária de energia elétrica ou proveniente de um sistema de cogeração ou de um sistema de auto-geração (termelétrica ou hidrelétrica). Além disto, o indicador energético-ambiental permite avaliar o aproveitamento energético dos resíduos da indústria, medida esta que contribui para diminuir a dependência da indústria da energia elétrica da concessionária e reduzir as emissões.

5.2 Aplicação do indicador de poluição

Neste estudo é proposta a utilização do indicador de poluição para avaliar as emissões de gases poluentes associados às diversas tecnologias de produção de calor e/ou eletricidade que compõem uma instalação industrial. Conforme descrito da seção 4.2 (equação 13), o indicador de poluição π_g é definido pela relação entre o montante de $(\text{CO}_2)_e$ e o correspondente poder calorífico do combustível.

O cálculo do $(\text{CO}_2)_e$ das diversas tecnologias requer a determinação do valor das emissões de CO_2 , NO_x , SO_x e material particulado. No caso de uma caldeira, isto pode ser realizado através de medições diretas ou através de cálculo estequiométrico. As emissões de poluentes vão depender do tipo de combustível empregado (lenha, carvão, óleo combustível,

biodiesel, gás natural etc), das características do equipamento e dos parâmetros de operação da caldeira. No caso do tratamento de efluentes anaeróbio, o $(CO_2)_e$ é determinado em função das emissões resultantes de combustão do biogás. Os gases emitidos vão depender principalmente da composição do efluente. A quantificação dos gases emitidos pode ser feita através de cálculo estequiométrico, ou da análise em laboratório, de amostras coletadas em campo, utilizando métodos analíticos, tais como a cromatografia gasosa ou espectrofotometria de absorção de infravermelho (BOHRZ, 2010).

Uma indústria pode ter sua demanda de energia atendida por uma termelétrica ou de uma hidrelétrica. Nas termelétricas as emissões são resultantes do processo de combustão e estão diretamente relacionadas com a tecnologia adotada e a qualidade e tipo do combustível empregado. A quantificação dos gases poluentes, NO_x , SO_2 e material particulado, necessários para o cálculo do $(CO_2)_e$ podem ser determinados através de relação estequiométrica ou medições realizadas.

No caso de usinas hidrelétricas, as emissões são resultantes da decomposição de vegetação submersa pelo reservatório e da matéria orgânica drenada da bacia a montante, e assim, diferentemente das usinas termelétricas, não dependem somente da quantidade de energia produzida. Conforme apresentado no item 3.4.2 as emissões são difíceis de determinar, assim, é proposto um método simplificado de cálculo das emissões das usinas hidrelétricas, visto que não é objetivo deste trabalho a definição de um método de cálculo dessas emissões, mas a incorporação das mesmas no indicador proposto.

5.3 Proposição do indicador de poluição para reservatórios de usinas hidrelétricas

O suprimento de energia elétrica de uma indústria pode ser proveniente de uma usina hidrelétrica, portanto é necessário determinar o indicador de poluição deste sistema para obter o indicador energético-ambiental da indústria.

Como visto no item 3.4.2 do capítulo 3, as usinas hidrelétricas também são responsáveis pelas emissões de gases poluentes, principalmente gás carbono e metano. Diferentemente das usinas termelétricas, em que as emissões são resultantes da queima de um combustível, nas usinas hidrelétricas as emissões de gases poluentes são resultantes da decomposição da matéria orgânica presente no reservatório da hidrelétrica. E, conforme já discutido no item 3.4.2 há diversas dificuldades em determinar estas emissões. E ainda, como a água não é combustível, não existe o poder calorífico associado a ela, variável necessária para o cálculo

do indicador de poluição. Diante do exposto, propõe-se neste estudo algumas considerações com o objetivo de quantificar as emissões de gases poluentes e determinar o indicador de poluição do uso de energia proveniente do reservatório de uma usina hidrelétrica, π_{gHid} .

Considerando o conceito de energia potencial específica, equação (18), e o conceito do poder calorífico, equação (19):

$$E_{esp} = \frac{E_p}{m_{\text{agua}}} \quad (18)$$

$$PC = \frac{E}{m_{comb}} \quad (19)$$

Verifica-se que a equação (18) é similar a equação (19), visto que a energia específica é a razão entre a energia potencial e a massa de água e o poder calorífico é a razão entre a energia e a massa do combustível. Portanto, para o cálculo do indicador de poluição dado pela equação (13) da seção 3.4.2, o poder calorífico pode ser substituído pela energia específica. Assim o π_{gHid} resulta na equação (20):

$$\pi_{gHid} = \frac{(CO_2)_e}{E_{esp}} = \frac{(CO_2)_e}{E_p / m_{\text{agua}}} \quad (20)$$

Onde, E_p é a energia potencial, dada em MJ , e m_{agua} é a massa de água dada em kg .

Determina-se o $(CO_2)_e$ através da relação entre a massa de CO_2 emitida pelo reservatório da hidrelétrica pela massa de água, conforme equação (21).

$$(CO_2)_e = \frac{m_{(CO_2)}}{m_{\text{agua}}} \quad (21)$$

A massa de CO_2 pode ser determinada através do índice de emissão de CO_2 do reservatório hidrelétrico. Entretanto, como são poucos os dados disponíveis de emissões das hidrelétricas é equacionado um índice de emissão baseado nos dados de emissões apresentados no relatório do estudo realizado para nove usinas hidrelétricas brasileiras do BRASIL (2006). Assim, o índice de emissão de CO_2 ($kgCO_2/km^2/dia$), conforme apresentado na Tabela 4 do item 3.4.2, é dado por:

$$I_{eCO_2} = \frac{m_{co_2}(kgCO_2)}{A(km^2)t(d)} \quad (22)$$

Logo:

$$m_{CO_2} = I_{eCO_2} \cdot A \cdot t \quad (23)$$

Onde m_{CO_2} é a massa de CO_2 , expressa em $kgCO_2$, I_{eCO_2} é o índice de emissão de CO_2 em $kgCO_2/km^2/d$ e A é a área do reservatório, expressa em km^2 . Portanto, o CO_2 equivalente é dado pela equação (24).

$$(CO_2)_e = \frac{m_{CO_2}}{m_{H_2O}} = \frac{I_{eCO_2} \cdot A \cdot t}{m_{H_2O}} \quad (24)$$

Substituindo a expressão do $(CO_2)_e$ na equação (20), tem-se que o indicador de poluição de uma usina hidrelétrica, π_{gHid} , expresso em $kg(CO_2)_e/MJ$, é dado por:

$$\pi_{gHid} = \frac{(CO_2)_e}{E_p / m_{\text{água}}} = \frac{I_{eCO_2} \cdot A \cdot t}{m_{\text{água}}} \cdot \frac{m_{\text{água}}}{E_p} = \frac{I_{eCO_2} \cdot A \cdot t}{E_p} \quad (25)$$

Ou ainda,

$$\pi_{gHid} = \frac{I_{eCO_2} \cdot A \cdot \eta}{P \cdot 86400} \quad (26)$$

Onde I_{eCO_2} é o índice de emissão de CO_2 em $kgCO_2/km^2/d$ e A é a área do reservatório, expressa em km^2 , η é rendimento, expresso em %, P é a potência instalada, em MW . Logo, π_{gHid} é expresso em $kgCO_2/MJ$.

Entretanto, conforme já mencionado são poucas as medições realizadas de gases poluentes provenientes dos reservatórios das hidrelétricas. Assim, propõe-se que seja calculado um indicador de poluição médio das usinas hidrelétricas, equação (27), obtido pela média ponderada dos π_{gHid} de cada hidrelétrica apresentado por Brasil (2006), adotando como fator de ponderação a área de seus reservatórios.

$$\bar{\pi}_{gHid} = \frac{\sum_{i=1}^n \pi_{gHid_i} \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (27)$$

O parâmetro área de reservatório, A , foi escolhido, pois conforme ilustrado no gráfico da Figura 5, verifica-se que há uma correlação, R^2 , igual a 0,65, entre a emissão total de carbono e a área do reservatório da hidrelétrica. Os dados foram obtidos da Tabela 4 do item 3.4.2.

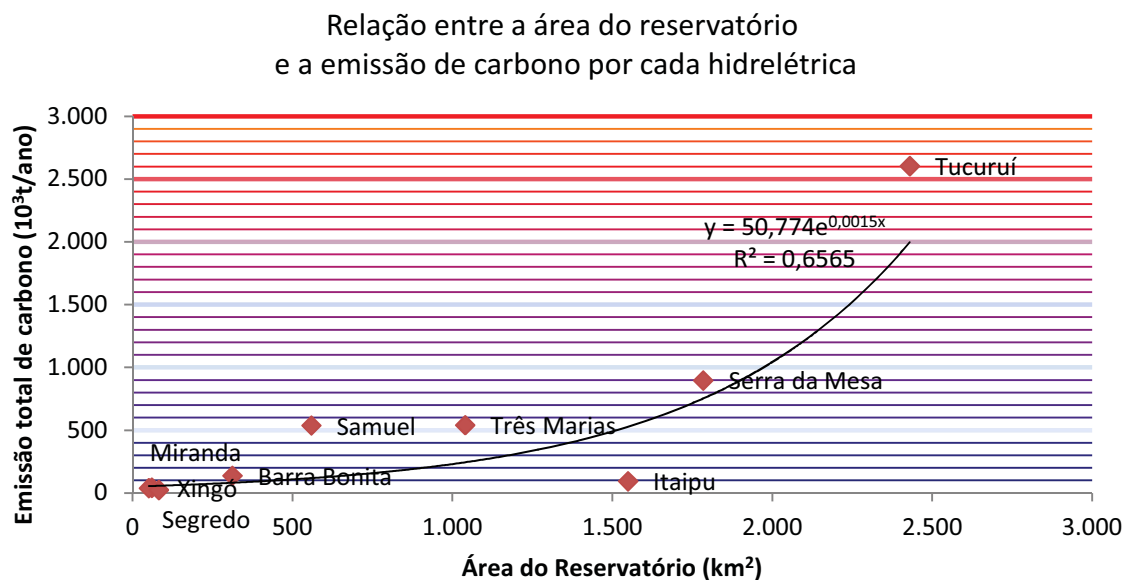


Figura 5 - Correlação entre a emissão de carbono e a área do reservatório da hidrelétrica (elaborado pelo próprio autor).

O indicador de poluição médio das hidrelétricas é uma simplificação, que pode ser aprimorada quando as variáveis que influenciam o grau de emissão de um reservatório forem conhecidas de forma mais precisa. Existem atualmente vários projetos de pesquisa de empresas de geração de energia elétrica para desenvolver melhores técnicas de medição de emissões de gases de efeito estufa de hidrelétricas. A empresa FURNAS Centrais Elétricas S.A. realiza um programa de Pesquisa e Desenvolvimento com o objetivo de determinar as emissões de gases de efeito estufa: gás carbônico, metano e óxido nitroso, dos seus reservatórios, avaliar a influência dos fatores morfológicos, morfométricos, biogeoquímicos e operacionais dos reservatórios na emissão de gases de efeito estufa, determinar o padrão de emissão existente, anteriormente à construção de reservatórios (FURNAS, 2012).

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Agroindústria de Abatedouro e Frigorífico

A escolha de um abatedouro e frigorífico para estudo de caso deve-se às suas características de consumidor de água e energia e geração de resíduos. Além disso, é uma indústria em franca expansão no país e no mercado mundial (ZUCCHI, 2010; CONTINI et al., 2006; BRASIL, 2007).

Historicamente, o setor agropecuário brasileiro tem desempenhado um papel importante na economia do país, atuando como fonte fornecedora de capital, empregos, alimentos, matérias-primas, além de divisas através dos excedentes exportáveis. Sua participação tem sido superior aos setores da indústria e de serviços no desenvolvimento da economia brasileira, e os índices de crescimento verificados para este setor permitem estimar que sua participação continuará significativa nos próximos anos. Por exemplo, no período de 2000 a 2004, o setor do agronegócio cresceu em média 4,64% ao ano, enquanto o crescimento da economia foi de 2,66% (CONTINI et al., 2006). Em 2007, o agronegócio foi responsável por 23,5% PIB, com destaque para o setor pecuário que respondeu por 28,9% (BRASIL, 2007).

Desde 2004 o Brasil é o maior exportador mundial de carne. Entre 1989 e 2007, as exportações do agronegócio praticamente quadruplicaram ao passar de US\$ 13,9 bilhões para US\$ 58,4 bilhões (BRASIL, 2007). Dentro do agronegócio, a exportação de carne é o setor que mais cresce, passando de 7% em 1997 para 19,3% do volume exportado em 2007, ficando atrás somente da exportação de soja 19,5% (BRASIL, 2007).

Segundo Contini et al. (2006), a produção de carne bovina deverá crescer a uma taxa de 4,4% ao ano até 2015, e as exportações 8,6% ao ano, atingindo ao final deste horizonte uma produção de 12,6 milhões de toneladas. Esta expansão da produção é prevista para atender a demanda crescente devido ao aumento populacional e do consumo per capita. Estima-se que com o crescimento da economia, da urbanização e do envelhecimento da população mundial, deverá ocorrer uma diversificação da dieta alimentar, com aumento da demanda, sobretudo nos países em desenvolvimento, por produtos processados (laticínios, etc.), de maior valor protéico (carnes), além de açúcar e frutas.

A carne é considerada o principal produto do abate bovino, mas há diversos subprodutos provenientes do abate bovino que são matéria prima de empresas do setor alimentício, calçadista e de insumos industriais (cosméticos), agropecuário e energético (ZUCCHI, 2010).

Os principais subprodutos são a pele, o sebo, as vísceras e os ossos. O subproduto pele, quando tratado, transforma-se em couro, principal produto da indústria calçadista nacional. Do subproduto osso é fabricada a farinha, utilizada para a ração animal, e o colágeno. O subproduto sebo é utilizado para fazer o sabão, ração animal, biodiesel etc.

O agronegócio brasileiro apresenta um quadro favorável, pois conta com uma combinação de elementos fundamentais para a obtenção de altas taxas de produtividade rural, como clima privilegiado, solo fértil, disponibilidade de água e biodiversidade. Aliado a estas vantagens ressalta-se o expressivo avanço da pesquisa tecnológica nacional nesta área, com desenvolvimento de melhores variedades de plantas cultivadas e de raças de animais.

Porém, com a globalização, a indústria da carne sofre uma contínua concorrência, bem como maiores exigências dos órgãos de controle fitossanitário e dos órgãos ambientais (ZUCCHI, 2010). Dessa forma, é necessário encontrar soluções que torne possível a sua sobrevivência num meio de alta competitividade e com controles sanitários e ambientais mais rigorosos. O uso racional de água e energia, além de reduzir custos pela redução do consumo destes dois insumos, contribui para o desenvolvimento sustentável.

Experiências como a do frigorífico Tegel Foods Ltda na Nova Zelândia que processa 65.000 aves diariamente, revelam as vantagens da adoção de medidas de conservação (EECA, 2009b). Em 2004, a empresa elaborou um projeto de um sistema de recuperação de calor produzido no processo de refrigeração no valor de 230.000 dólares. Com a execução do projeto, a água da planta industrial passou a ser aquecida através de uma combinação entre o calor recuperado do processo de refrigeração e gás natural. Além do aproveitamento de uma parcela do calor recuperado dos compressores de ar. Os resultados mostraram que o novo sistema recupera de 230 a 250 kW de calor e proporciona uma economia de 84.500 dólares na compra de gás natural por ano. O aumento da eficiência do sistema de refrigeração com a remoção do calor proporcionou uma economia 27.400 dólares por ano na conta de energia elétrica. A economia total foi estimada em 110.000 dólares por ano, e um *payback* de apenas dois anos. Espera-se para reduzir as emissões da fábrica de dióxido de carbono em de 628 toneladas por ano.

A agroindústria frigorífica brasileira apresenta um quadro muito favorável a expansão (SANTOS, 2009b). Entretanto alguns obstáculos precisam ser vencidos, tais como superação das barreiras sanitárias, tarifárias e ecológicas, falta de coordenação da cadeia logística agroindustrial, superação de limitantes de exportação (quotas, tarifas, concorrência subsidiada etc), ausências de políticas públicas específicas para o setor, e principalmente número

reduzido de empresas certificadas em gestão da qualidade e ambiental (SANTOS, 2009b; ZUCCHI, 2010).

A pesquisa realizada por Santos (2009b), com o objetivo de identificar as ações de sustentabilidade desenvolvidas na indústria frigorífica exportadora de carne bovina no estado de Mato Grosso do Sul, mostra que na maioria dos frigoríficos não há ações de sustentabilidade ambiental, nem certificação ambiental e nem a adoção de estratégias para conservação de água e energia. Apenas duas empresas de oito pesquisadas têm iniciado estudo de aproveitamento de fontes alternativas de energia, como o sebo, e aproveitamento de resíduos para adubação da lavoura.

Assim, esta tese tem o propósito de contribuir para melhoria do desempenho ambiental da agroindústria de abatedouro e frigorífica.

6.2 Processo produtivo típico de uma agroindústria de abatedouro e frigorífico

A carne é produto altamente perecível. Sua composição rica em proteínas e minerais e a manipulação com muita água favorece o crescimento de microorganismo deteriorantes e patogênicos. Assim, os riscos de contaminação antes, durante e após o abate são altos. As etapas como sangria, esfolamento, evisceração, corte e desossa propiciam a colonização dos tecidos por microrganismos.

As indústrias de abatedouros e frigoríficos são regularmente inspecionadas, com base no Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitário de Produtos de Origem Animal – RIISPOA (BRASIL, 1963). Para minimizar os riscos de contaminação, as indústrias de abatedouros e frigoríficos são dotadas de sistemas de abastecimento de água, produção de vapor e refrigeração, além de sistema de coleta e tratamento de resíduos.

Em todas as etapas do processo industrial, desde a chegada até o abate dos bovinos, há um grande consumo de água. As instalações da indústria dispõem de água fria e quente em quantidades abundantes em todas as dependências de manipulações e preparo, não só de produtos, como de subprodutos não comestíveis. A água é necessária na higienização do produto, do ambiente e dos equipamentos, para a dessedentação e limpeza dos animais, e ainda na limpeza de caminhões e lavanderia. A água também é utilizada nas instalações sanitárias, na produção de vapor e no sistema de refrigeração para resfriamento dos compressores, do gás refrigerante e degelo dos condensadores.

O vapor é utilizado nos principais setores de produção de um frigorífico com o objetivo de cumprir as exigências das normas fitossanitárias e como fonte de calor para cozimento dos produtos. Na sala de abate, o vapor das caldeiras é misturado à água para o fornecimento de água quente, necessária para lavar as mãos, temperatura de 42°C, e para os esterilizadores de facas e serras, temperaturas de 90°C. Na graxaria, o vapor é utilizado diretamente nos digestores, que são os equipamentos responsáveis pelo cozimento dos subprodutos para transformação em farinha e sebo. O vapor também é utilizado na lavanderia, refeitório, sala de desossa e limpeza geral do frigorífico.

Os efluentes líquidos são produzidos em quase todas as etapas do processo industrial, pois somente uma pequena parcela da água utilizada é incorporada ao produto. Para fins de caracterização, eles são divididos em duas linhas distintas. Na Linha verde são agrupados os efluentes que contêm os despejos gerados na operação de lavagem de currais, lavagem e preparo do bucho e tripas. Essa denominação se deve a presença de fezes bovinas que conferem uma cor verde aos despejos. Os demais efluentes líquidos gerados, que estão diretamente relacionados com o abate e as operações de manuseio da carne e lavagens de pisos, equipamentos e paredes, são agrupados na Linha Vermelha. Essa denominação decorre da presença de traços de sangue, que possui uma coloração avermelhada.

Os efluentes são constituídos de alta carga poluidora composta de sólidos em suspensão, nutrientes, material flotável, graxos e sólidos sedimentáveis. Além disto, os efluentes podem conter microorganismos patogênicos e ovos de parasitas intestinais e *ascaris* apresentado como um sério risco a saúde pública. A Tabela 9 apresenta as características típicas dos efluentes gerados por frigoríficos.

Tabela 9 – Parâmetros físico-químicos característicos de um efluente frigorífico

Parâmetro	Unidades	Média	Valores		
pH		7,03	6,24	-	7,85
Condutividade	µS/cm	3459	2650	-	4390
Alcalinidade	mg/l	416	366	-	512
DBO _{5,20}	mg /l	2763	2035	-	4200
DQO	mg /l	5398	3979	-	7125
SS	mg/l	1271	284	-	26660
Nitrogênio Amoniacal	mg/l	22,1	5,5	-	61,8
Nitrogênio total de Kjeldahl	mg/l	71,7	54,7	-	99,8
Fósforo total	mg/l	71,5	53,9	-	91,7

Fonte: Aguilar et. al. (2002) modificado por Sena (2005).

Para atender as exigências da legislação ambiental, Resolução do CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011c), e diminuir os riscos de contaminação é necessário realizar o tratamento dos efluentes antes do lançamento no corpo receptor. Como o efluente é composto por matéria orgânica facilmente degradável o processo de tratamento anaeróbio é o mais eficiente e mais econômico (von SPERLING, 2005). Uma das vantagens da digestão anaeróbia é a produção de biogás, que pode ser utilizado para produzir energia elétrica e/ou térmica enquanto que o material sólido se transforma em biofertilizante ou biomassa.

Em abatedouros os resíduos sólidos a serem descartados são aqueles em que não há qualquer tipo de reaproveitamento para a fabricação de subprodutos, tais como esterco de currais, vômitos, conteúdo estomacal, conteúdo intestinal, resíduos do tanque de purificação de gorduras. Estes são destinados a incineradores, compostagem, etc.

Em geral, em abatedouros a emissão de efluentes gasosos e/ou particulados é proveniente da queima de combustível pela caldeira e os gases liberados pelo processo de tratamento anaeróbio dos resíduos líquidos. Na graxaria (produção de sebo e farinha), também há emissão de efluentes gasosos pelos digestores.

Os principais usos de energia elétrica devem-se ao funcionamento de motores elétricos, iluminação, recarga de baterias das câmeras frigoríficas dos caminhões, e principalmente para o sistema de refrigeração visto que é o maior consumidor de energia.

A Tabela 10 apresenta a quantidade diária e por unidade de produção dos principais recursos utilizados na indústria de abatedouro e frigorífico com capacidade de abate de 1.000 bois por dia.

A Figura 6 apresenta o Fluxograma do abate bovino com a indicação dos principais usos de água, energia, vapor e a geração de resíduos líquidos, sólidos e gasosos.

Apresenta-se no Anexo A a descrição de todas as etapas do setor produtivo de um abatedouro e frigorífico.

Tabela 10 – Recursos empregados e resíduos gerados em um abatedouro típico¹²

Recursos usados		Quantidade diária	Por unidade de produção
Água		1.000 m ³	7m ³ /tcarça
Energia	Carvão	8 t	53 kg/tcarça
		65.741 kWh	0,8 m ³ /tcarça
	Eletricidade	40.833 kWh	400 kWh/tcarça
Produtos químicos	Limpeza	0,2 m ³	1,3 l/tcarça
	Tratamento de efluentes	30 kg	0,2 kg/tcarça
	Óleos e lubrificante	0,030 m ³	0,2 l/tcarça
Efluentes	Volume	850 m ³	6 m ³ /tcarça
	Carga orgânica	DBO	38 kg/tcarça
		SS	13,7 kg/tcarça
		N	1,7 kg/tcarça
		P	0,6 kg/tcarça
Resíduos sólidos	Pança e estrume	7 t	47 kg/tcarça
	Lodo	6 t	40 kg/tcarça
	Cinza	0,7 t	5 kg/tcarça

Fonte: Adaptado de Pagan, Renouf e Prasad (2002)

¹² A “planta típica” de abatedouro de bovino é definida como uma unidade de transformação equivalente a 150 toneladas peso padrão da carcaça quente (Hot Standard Carcase Weight - HSCW) por dia, o que equivale a 625 cabeças de gado por dia, com base numa taxa de conversão de 240 kg/cabeça. A produção é de 5 dias por semana, 250 dias por ano, e ocorre desossa e processamento (PAGAN; RENOUEF; PRASAD, 2002).

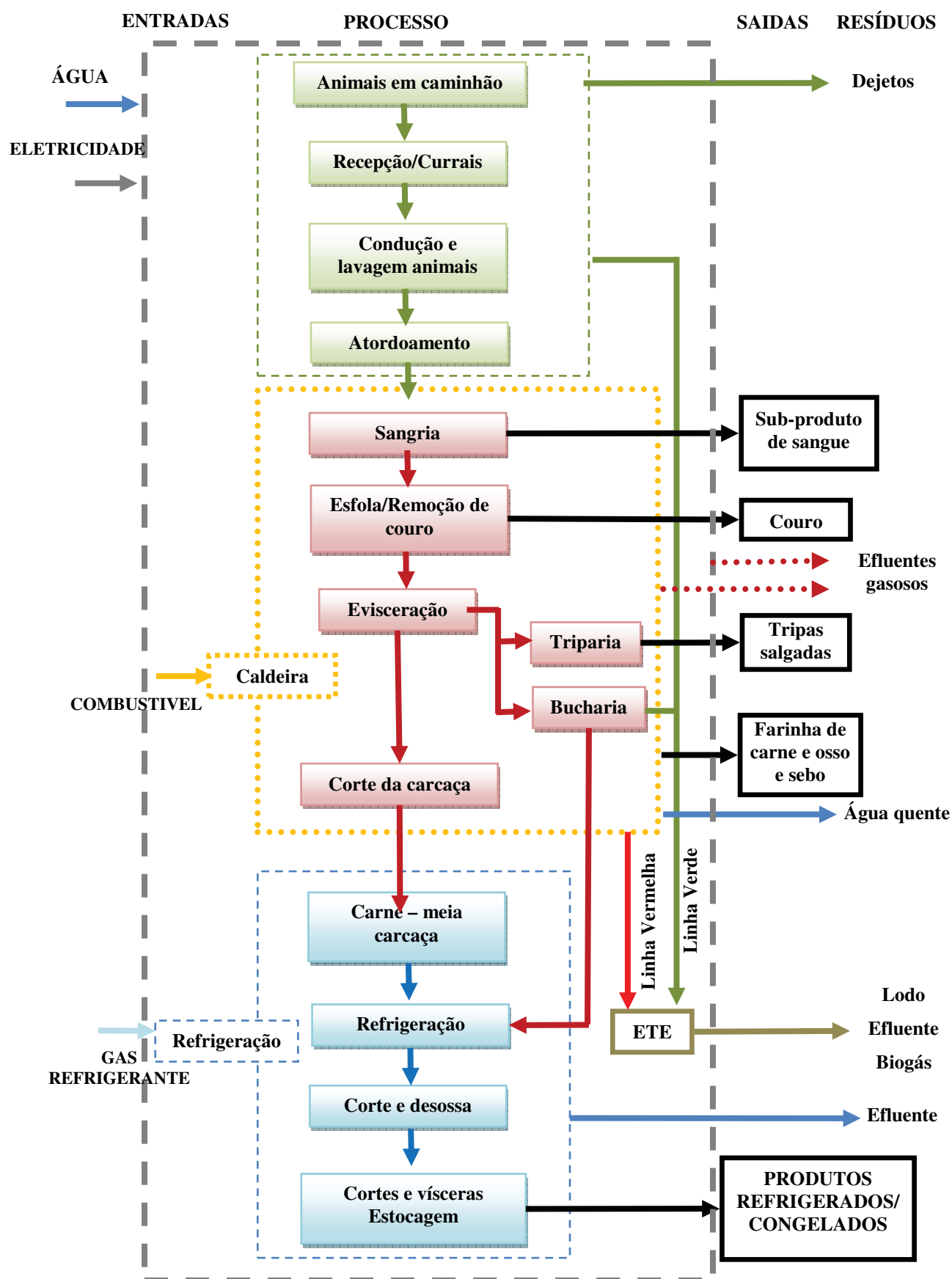


Figura 6 - Fluxograma do processo de abatedouro e frigorífico adaptado de SENAI (2003)

6.3 Aplicação prática na agroindústria

A agroindústria de abatedouro e frigorífico de bovinos, Frigorífico Vale do Sapucaí – FRIVASA, em estudo está localizada no município de Itajubá, Minas Gerais, a margem do Rio Sapucaí (Figura 7).



Figura 7 - Localização do abatedouro e frigorífico em estudo (imagem satélite do Google maps).

A agroindústria de abatedouro e frigorífico considerada para análise neste trabalho recebe mensalmente em média 8.000 cabeças de gado bovino de várias regiões (que totalizam aproximadamente 1.665 toneladas de carne). A indústria foi projetada para a capacidade de abate de 400 bovinos por dia. Os produtos fabricados e sua respectiva produção são mostrados na Tabela 11, e refere-se ao abate médio mensal de bovinos.

Tabela 11 – Discriminação dos produtos fabricados

Discriminação	Quantidades (kg)	
	Mensal	Anual
Cortes de carne bovina	144.000	1.728.000
Costela com osso	128.000	1.536.000
Dianteiro e traseiro com osso	368.000	4.416.000
Couro salgado	240.000	2.880.000
Farinha de carne e osso	134.400	1.612.800
Miúdos bovinos comestíveis	104.000	1.248.000
Sebo industrial	134.400	1.612.800

As informações apresentadas foram obtidas através do levantamento de dados, relatórios técnicos, projetos disponibilizados pela agroindústria, visitas às instalações, medições e entrevistas com o pessoal de manutenção. Foram analisadas as possibilidades de conservação hidro-energética e o impacto econômico das mesmas com base nas informações do sistema produtivo e hábitos de utilização de água e energia fornecidas pela indústria.

Durante as visitas realizadas à indústria foi verificada a inexistência de equipamentos de medição (vazão, temperatura, pressão etc) que devem ser instalados nos condutos e nas salas, de modo a permitir aos próprios encarregados identificar as inevitáveis perdas nos equipamentos, bem com verificar se as condições de operação estão de acordo com aquelas definidas no projeto. Segundo a Lei Federal de Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal – RIISPOA (BRASIL, 1963), é de toda conveniência a instalação de hidrômetros em pontos adequados para o controle volumétrico do gasto de água na Sala de Matança e dependências anexas. Também é obrigatória a instalação de termômetro para o controle de temperatura da água. De um modo geral, todas as dependências desta indústria encontram-se em estado precário de conservação. Há vazamentos de água nas tubulações, válvulas, registros, equipamentos etc.

O sistema hídrico da agroindústria de abatedouro e frigorífico em estudo é composto pelo sistema de abastecimento, tratamento e distribuição de água e pelo sistema de coleta e tratamento de efluentes. A Figura 8 ilustra o diagrama esquemático do sistema hídrico da agroindústria analisada.

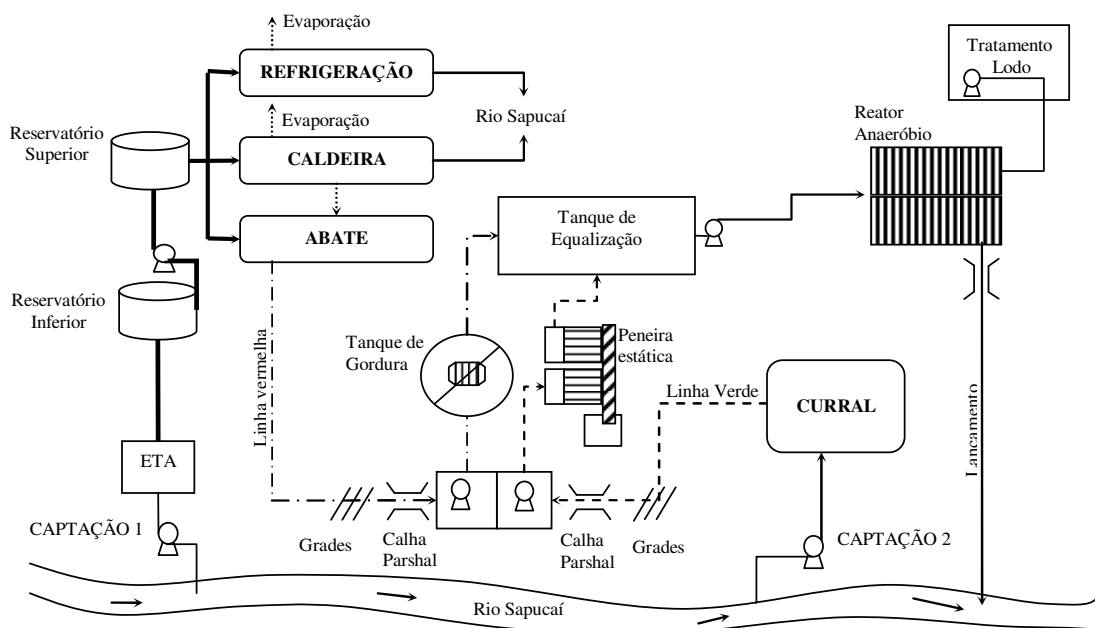


Figura 8 - Diagrama esquemático do sistema hídrico da agroindústria de abatedouro e frigorífico (elaborado pelo próprio autor).

A principal fonte de abastecimento d'água é o rio Sapucaí e há duas captações distintas. Na captação 1 (Figura 9) o fluxo d'água é bombeado (Figura 10) para a estação compacta de tratamento de água (ETA) para sua potabilização. Na captação 2 a água bruta é bombeada diretamente para os pontos de consumo.



Figura 9 - Fotografia da captação de água bruta no rio Sapucaí: Ponto 1.



Figura 10 - Fotografia do sistema de bombeamento de água bruta: Ponto 1.

Na captação 1, a vazão é igual a $750 \text{ m}^3/\text{d}$ e a potência de conjunto motor bomba é de 15 kW (Figura 10). A ETA (Figura 11) tem capacidade de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ e é composta por tanque de mistura, um floccodecantador e filtro.

O consumo médio anual de sulfato de alumínio utilizado no tratamento da água é de 7.200 kg, de cal hidratada é 7.200 kg e de cloreto de cálcio é de 14.400 kg, sendo R\$1,00/kg, R\$1,72/kg, e R\$0,94/kg seus respectivos custos unitários.



Figura 11 - Fotografia da Estação de Tratamento de Água - ETA.



Figura 12 - Fotografia da operação incorreta do floccodecantador - ETA.

Em condições adequadas, a operação do sistema de floccodecantação e lavagem de filtros deve gerar um efluente com vazão média de 38,3 m³/d. Entretanto, devido a vazamentos e operação incorreta, o efluente resulta em 241 m³/d (Figura 12). Este efluente é lançado diretamente no rio Sapucaí.

O consumo médio registrado na ETA durante o período de medição foi de 57 m³/h, 12% acima de sua capacidade (50 m³/h), em decorrência da maior necessidade de água da indústria. No entanto, este procedimento pode comprometer a qualidade da água potável produzida.

Após o tratamento, a água é armazenada e posteriormente recalçada para os reservatórios superiores. A água potável é distribuída para o processo industrial de abate bovino (429,7 m³/d), o sistema de geração de vapor (47,2 m³/d) e o sistema de refrigeração (32,2 m³/d). No sistema de refrigeração a perda de água, 14 m³/d, devido ao arraste e evaporação nas torres de resfriamento e degelo dos condensadores. A geração de vapor necessária no processo de matança e digestão dos resíduos demanda 25,2 m³/d de água. Na matança, ocorre um total de perdas e desperdícios de 24,5 m³/d devido a transbordamento de tanques, excesso de água nos esterilizadores e vazamentos.

Na captação 2, a vazão de 530 m³/d é destinada diretamente ao processo de limpeza de veículos, currais e de animais em pé. Neste sistema de limpeza há uma perda d'água de 104 m³/d devido à evaporação e ao consumo de água pelos animais, além de um desperdício de 10,4 m³/d resultante de vazamentos.

Na sala de matança são identificados diversos vazamentos nas válvulas e registros (Figura 13). Foi observado também que a água quente dentro dos esterilizadores verte contínua e excessivamente para os ralos, e as mangueiras não dispõem de gatilho na ponta. No processo de lavagem de tripas foi observado que o fluxo de água é contínuo, ou seja, o registro é mantido aberto durante todo o processo de limpeza, ocasionando o transbordamento e, conseqüentemente, o desperdício de água (Figura 14). Além disto, a legislação não exige que a limpeza das tripas e buchos seja feita com água potável, pois após este processo as tripas e os buchos passarão para os tanques de clarificação e cozimento, para eliminar os riscos de contaminação.

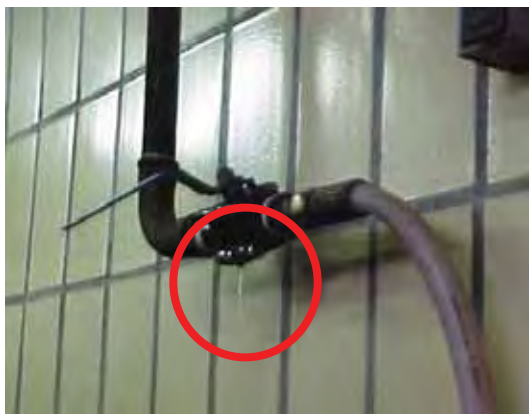


Figura 13 - Fotografia: vazamento na mangueira da sala de matança.



Figura 14 - Fotografia: tanque de limpeza de tripas água transbordando.

Os efluentes líquidos industriais somam $1.118,4 \text{ m}^3/\text{d}$, entretanto, os efluentes da ETA ($241,0 \text{ m}^3/\text{d}$), do sistema de refrigeração ($19,2 \text{ m}^3/\text{d}$) e do resfriamento dos motores caldeira ($21,6 \text{ m}^3/\text{d}$) são lançados sem tratamento no rio Sapucaí. Os efluentes da matança ($410,2 \text{ m}^3/\text{d}$) e do setor limpeza do curral ($426,4 \text{ m}^3/\text{d}$) são coletados e depois tratados.

Com base nos dados levantados de consumo de água, perdas e de geração de efluentes é apresentado na Figura 15 o balanço hídrico dos principais processos.

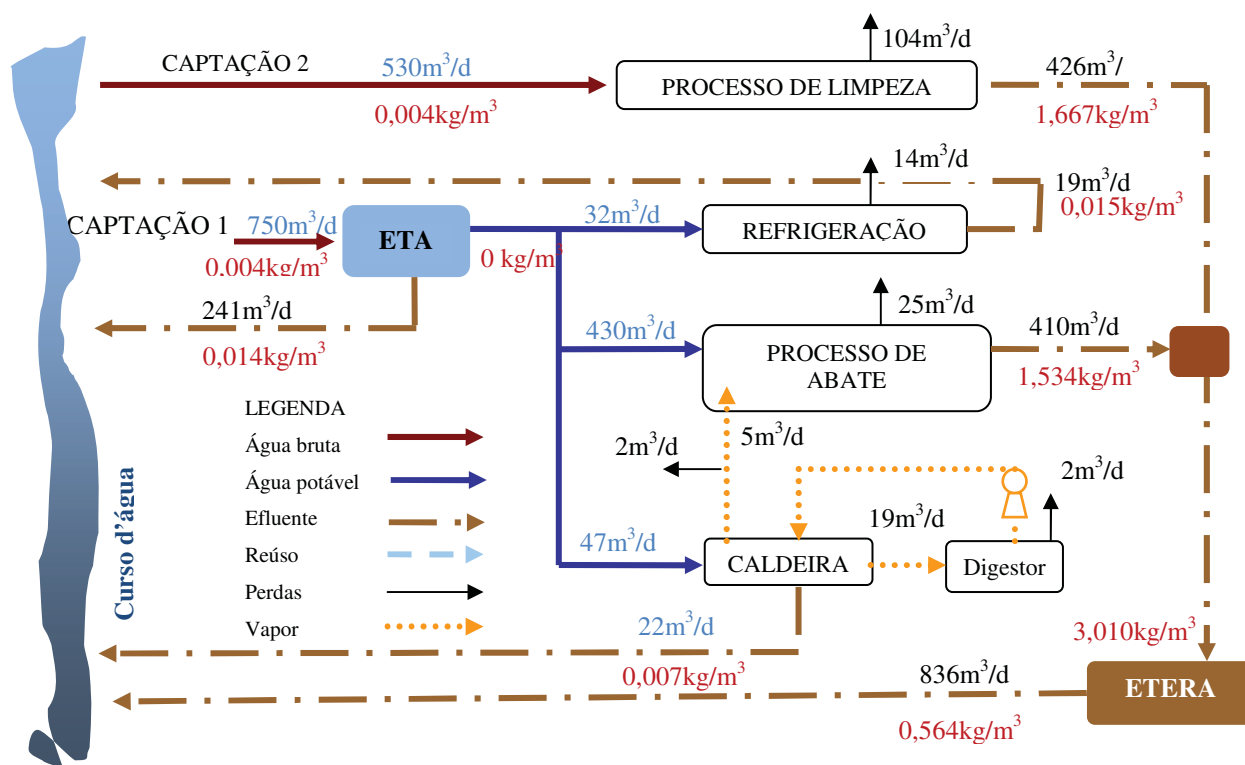


Figura 15 - Balanço hídrico e concentração das correntes líquidas da agroindústria (elaborado pelo próprio autor).

O sistema de coleta e tratamento de efluentes (Figura 16) é composto por duas linhas de coleta, linha verde e linha vermelha, e pelo sistema de tratamento. Os despejos da Linha Verde passam por grade, calha Parshall e em seguida são recalcados para a peneira estática e bombeados para o tanque de equalização. Os despejos da Linha Vermelha passam pelo gradeamento e são recalcados para a caixa de gordura, e encaminhados para o tanque de equalização. No tanque de equalização os despejos são reunidos para promover uma equalização em suas qualidades para posteriormente serem recalcados para o tratamento biológico, que é realizado na Estação de tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de fluxo ascendente - ETERA (Figura 17 e 18). Os gases formados são colhidos e queimados no *Flare* sem qualquer aproveitamento energético, o excesso de lodo é desidratado em filtro prensa, e o efluente líquido tratado é lançado no Rio Sapucaí.

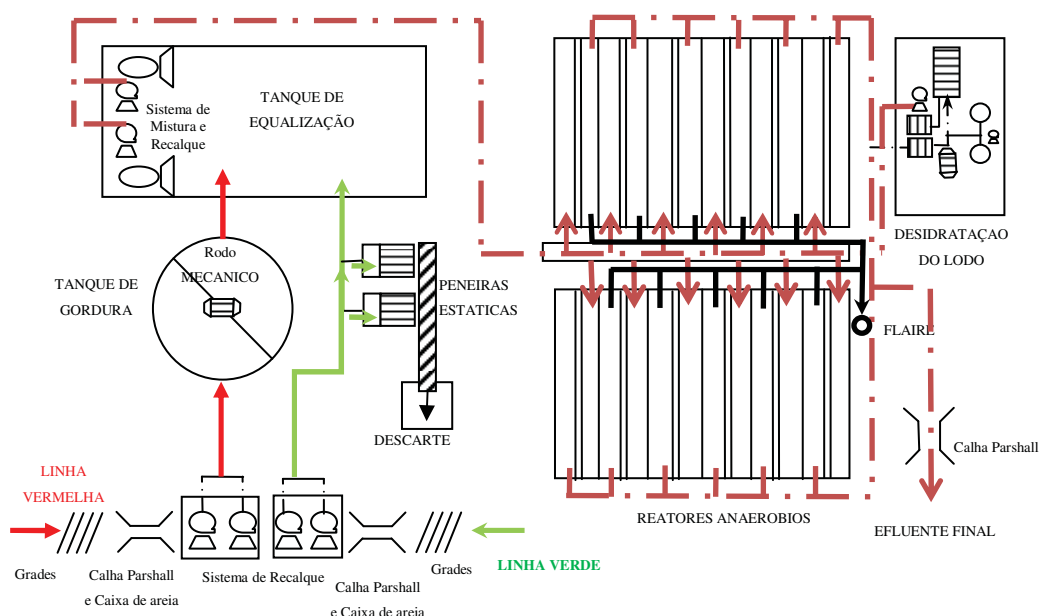


Figura 16 - Esquema do sistema de coleta e tratamento de efluentes (elaborado pelo próprio autor).



Figura 17 - Vista geral da Estação de Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - ETERA



Figura 18 - Vista superior ETERA

Os parâmetros do efluente analisados regularmente pela agroindústria estão apresentados na Tabela 12. Verifica-se que os valores de $\text{DBO}_{5,20}$ e DQO, 9% e 62%, respectivamente, estão acima dos valores médios apresentados na Tabela 6 o que indica a possibilidade de redução de carga orgânica com implementação das medidas de conservação. A eficiência do tratamento de efluentes é em média 81%.

Tabela 12 – Parâmetros físico-químicos do efluente da agroindústria.

Parâmetros	Unidades	Entrada da ETE	Saída da ETE
pH	-	7,05	7,25
$\text{DBO}_{5,20}$	mg/l	3.010	564
DQO	mg/l	8.760	1.538
Sólidos sedimentáveis	mg/l	97,5	30
Sólidos suspensos	mg/l	4.941	1.521
Sólidos Totais	mg/l	7.470	2.480
Óleos e graxas	mg/l	2.491	51,175
Sulfetos	mg/l	7	2

A concentração média de carga orgânica na entrada da ETA é de $0,004 \text{ kg/m}^3$ e concentração máxima aceitável de carga orgânica é de $0,005 \text{ kg/m}^3$. A carga orgânica do efluente da ETA é $0,014 \text{ kg/m}^3$, do efluente do sistema refrigeração da caldeira é $0,007 \text{ kg/m}^3$ e do efluente do sistema de refrigeração é $0,015 \text{ kg/m}^3$. Os efluentes de maior concentração de carga orgânica são o do processo de abate e do processo de limpeza, respectivamente, $1,534 \text{ kg/m}^3$ e $1,667 \text{ kg/m}^3$. Estes valores estão representados na Figura 15.

Para auxiliar o tratamento de efluente são utilizados 811 kg de cloreto férrico por mês na caixa de gordura, e a cada descarte de lodo são utilizados 900 kg de carbonato de cálcio e 900 ml de polímero. O efluente final é lançado no rio Sapucaí. Os resíduos sólidos provenientes do tratamento de efluente são dispostos em caminhões e transportados para local adequado. Segundo dados fornecidos pela agroindústria, para o abate de 400 bovinos são preenchidos em média 2 caminhões para Linha Verde (fezes), 1 caminhão para Linha Vermelha (sangue) e 1/3 caminhão para gordura. Os caminhões percorrem uma distancia média de 60 km a um custo de R\$1,50/km.

O sistema de abastecimento de água potável possui duas estações elevatórias para adução de água bruta e água potável. Uma estação é composta por dois conjuntos motor-bomba de 7,5 kW, e a outra é composta por dois conjuntos motor-bomba de 37,3 kW. O sistema de água *in natura* possui um conjunto motor-bomba 15 kW. Os dados dos

equipamentos estão apresentados no Anexo B. Estes sistemas de bombeamento encontram-se em péssimo estado de conservação e há falhas na instalação que prejudicam a eficiência dos conjuntos elevatórios, tais como a disposição incorreta do barrilete de sucção, conjuntos elevatórios sem fixação na base, válvula e registro de gaveta com defeito, conexões das tubulações fora de padrão, ausência de uma purga de ar ou ventosa no sifão, diâmetro reduzido da tubulação, motores com mais de 15 anos de uso, entre outros.

O sistema de tratamento de efluente possui um conjunto de motores elétricos que totalizam uma potência de 64 kW.

A indústria em estudo pertence ao sub-grupo B3 de consumidor de energia elétrica e está contratada com classe tarifária horo-sazonal verde. As contas de energia elétrica analisadas abrangem o período de janeiro a dezembro de 2007 a 2009. A demanda média registrada de energia é de 732 kW e os consumos médios mensal são 246.748 kWh no horário fora de ponta (HFP) e 3.434 kWh no horário de ponta (HP), conforme descrito na Tabela 13. O valor da tarifa de energia considerado é de R\$0,19/kWh no horário fora de ponta e R\$1,72/kWh no horário de ponta.

Tabela 13 – Histórico do consumo médio mensal de energia no HP e HFP no período de 2007 a 2009.

Mês	Demanda máxima no HFP (kW)	Consumo médio mensal (MWh)	
		HP	HFP
Jan	680	3,33	245
Fev	680	3,17	233
Mar	680	4,20	254
Abr	732	3,33	249
Mai	744	3,49	244
Jun	762	3,33	253
Jul	750	3,17	232
Ago	774	3,33	265
Set	762	3,33	277
Out	738	3,33	206
Nov	726	4,20	267
Dez	756	3,02	236
Média mensal	732	3,43	247

A Tabela 14 apresenta a potência instalada por cada setor de produção da agroindústria. Verifica-se que a área da refrigeração é que possui a maior potência instalada, 492 kW, que corresponde a 37% da potência total conforme ilustrado na Figura 19.

Tabela 14 – Potência instalada por setor de produção

Sector de produção	Potência (kW)	%
Estação de tratamento de água	49	4
Estação de tratamento de efluentes	64	5
Produção de carne	411	31
Refrigeração	492	37
Utilitários	303	23
Total	1.319	100

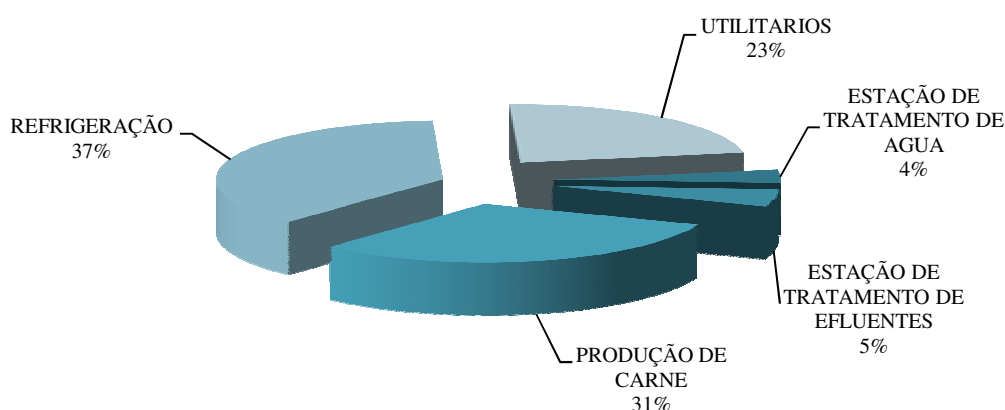


Figura 19 - Potência instalada por área (elaborado pelo próprio autor).

O empreendimento possui uma caldeira flamotubular, tipo Parede d'água, fabricante ATA COMB. TEC, com capacidade de produção de vapor de 10.000 kgV/h. O combustível utilizado é a lenha. As principais características técnicas da caldeira estão descritas na Tabela 15.

Tabela 15 – Características técnicas da caldeira

Características técnicas da caldeira	
Produção de vapor: água de alimentação a 20°C (ambiente)	10.000 kg/h
Produção de vapor: água de alimentação a 80°C (condensado)	11.000 kg/h
Pressão de trabalho admissível	170 psig
Pressão de operação	153 psig
Volume de água normal	15 m ²
Volume de água cheia	18 m ²
Tipo de combustível	Lenha em toras
Consumo médio de combustível	2.692 kg/h
Densidade da lenha	280 kg/m ³
Período de funcionamento	6 as 18 h
Eficiência térmica	87%
Teor de CO ₂	13%

O principal consumo de vapor é no setor de produção de farinha (5,58 kg/s). Os demais usos do vapor são na matança (0,14 kg/s) e na lavanderia (0,06 kg/s). Na sala de Farinha, o vapor é utilizado diretamente nos digestores, à pressão de 5 kgf/cm² e à temperatura de 158,1⁰C, com a finalidade de cozimento dos restos bovinos para fins de produção de farinha e sebo. Neste setor, 85% do vapor condensado gerado nos digestores, prensas e clarificador de sebo é coletado e retorna para o tanque de retorno de condensado através de uma bomba a vapor.

Na sala de matança, o vapor é incorporado à água, através de misturadores (água e vapor), com a finalidade de fornecer água quente para a lavagem de carnes, lavagem da sala de abate, lavagem de equipamentos, ferramentas e bancadas de serviço e higiene das mãos. Além disto, o vapor é empregado no processo de cozimento das unhas, do bucho e no processo de clarificação do rim, baço e pulmão. Durante as visitas, verificou-se que as tubulações de vapor encontram-se enferrujadas e sem o revestimento térmico (Figuras 20 e 21). As perdas são estimadas em 7% do consumo de vapor.



Figura 20 - Fotografia do estado de conservação das tubulações de vapor



Figura 21 - Fotografia do misturador de água com tubulação de vapor sem revestimento térmico

O sistema de refrigeração é por compressão e expansão e utiliza como gás refrigerante a amônia (R717). A capacidade frigorífica de congelamento é 283.000 kcal/h, a potência consumida nos eixos dos compressores é 95,3 BHP, a capacidade frigorífica de resfriamento, no regime -100°C a +35°C, é de 684.000 kcal/h e a potência consumida nos eixos dos compressores é 281,2 BHP. O período de operação é de segunda a domingo durante as 24 horas diárias.

7 RESULTADOS

Neste capítulo são descritos os resultados do estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental das medidas de conservação hídrica e energética aplicadas à indústria de abatedouro e frigorífico, quais sejam: eliminação de perdas e desperdícios (água e energia); reúso de efluentes; aproveitamento de água de chuva; aproveitamento do biogás; e cogeração.

Os indicadores de poluição são calculados considerando as emissões de gases poluentes geradas no sistema de produção de vapor e estação de tratamento de efluentes, e aquelas referentes à geração de energia elétrica. Considera-se o suprimento de energia elétrica sendo feito por uma fonte de geração exclusiva, que pode ser ou uma usina termelétrica (gás natural, diesel e carvão), ou uma usina hidrelétrica, ou mesmo através de cogeração.

O indicador energético-ambiental é determinado em função dos indicadores de poluição e dos valores de demanda de energia de cada sistema levantados na seção 6.3. O cálculo do indicador energético-ambiental possibilita a análise do desempenho ambiental de uma agroindústria para as diversas medidas de conservação hídricas e energéticas propostas, considerando as diferentes usinas de geração de energia elétrica.

7.1 Eliminação de perdas e desperdícios

As medidas para redução das perdas e desperdícios de água e energia levantadas na auditoria técnica foram avaliadas e as reduções do volume de água obtidas são apresentadas na Tabela 16. Com a aplicação destas medidas de conservação hidro-energética, a demanda de água da indústria reduz de 1.280 m³/d para 1.032 m³/d, aproximadamente 19%. O efluente diminui de 1.118,4 m³/d para 890,9 m³/d. Estas reduções acarretam uma diminuição no consumo de energia elétrica devido principalmente à redução do tempo de operação das bombas. As reduções das perdas e vazamento de calor no sistema de produção de vapor diminui a demanda de energia calorífica de 167.598 MJ para 160.894 MJ.

Com base nas reduções obtidas com estas medidas é derivado um novo balanço hídrico ilustrado no fluxograma da Figura 22.

Tabela 16 – Oportunidades de redução de vazão através da aplicação de medidas para eliminação de perdas e desperdícios de água e energia.

Setor	Medidas	Vazões (m ³ /d)
Matança	Eliminação de vazamentos de água	14,3
	Instalação de gatilhos na mangueira	
	Diminuição do fluxo de água e aproveitamento da ultima água dos esterilizadores	
	Instalação de válvula de controle automático (banho de aspersão lavadouro gabinete)	
Refrigeração	Eliminação da água de degelo	3,6
	Desligamento da câmara frigorífica	
	Eliminação de vazamentos de água	
Caldeira	Reposição do revestimento térmico das tubulações de vapor	4,0
	Eliminação de vazamentos	
ETA	Correções do sistema de operação	216,1
	Adequação do sistema de bombeamento	
	Eliminação de vazamentos	
Limpeza	Limpeza a seco curral	10,4
	Adequação do sistema de bombeamento	
	Eliminação de vazamentos	
Total		245,8

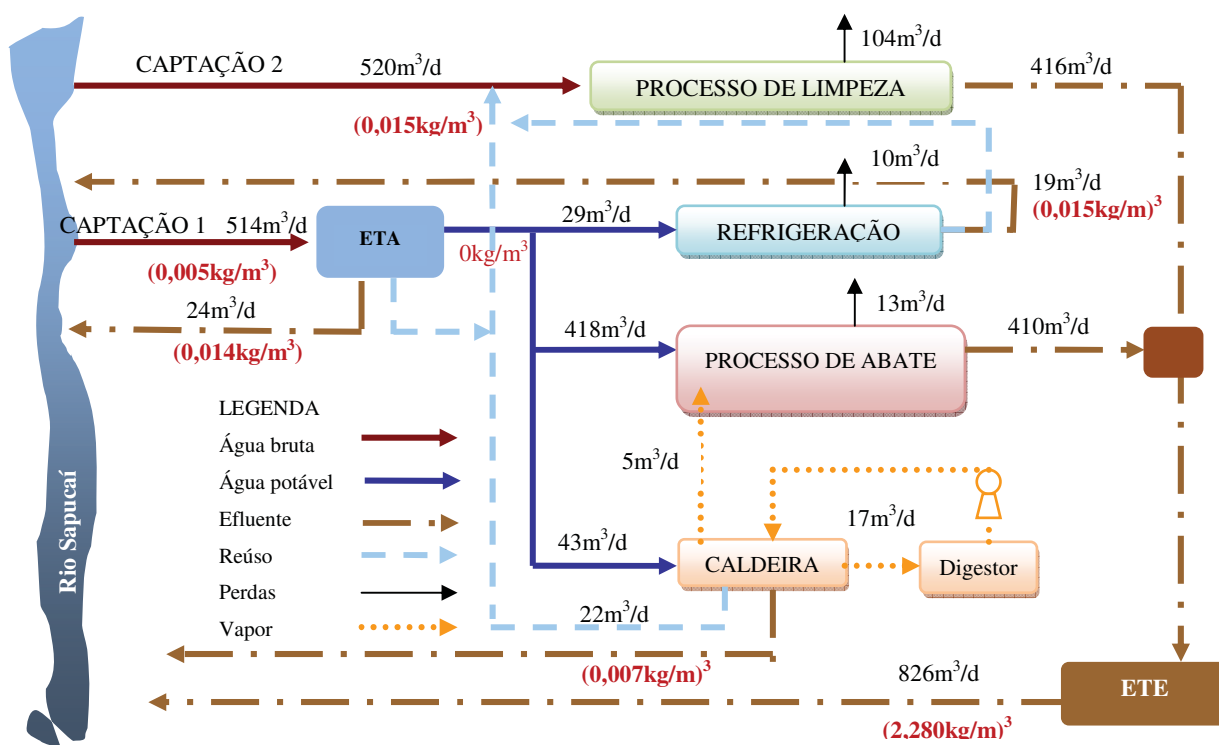


Figura 22 - Fluxograma do Balanço Hídrico após eliminação de perdas e desperdícios de água (elaborado pelo próprio autor).

A concentração da carga orgânica das correntes de água - DBO_{5,20} (valores descritos entre parêntesis na Figura 22) é baseada em dados de projeto ou em valores definidos pela

indústria, que serão utilizados nos cálculos para determinação das possibilidades de reúso descritos na seção seguinte.

7.2 Otimização do uso de água

As possibilidades de otimização do uso água são determinadas neste trabalho através do método *water pinch* descrito no Capítulo 2 item 2.2. A primeira etapa deste método consiste na determinação do balanço hídrico dos principais processos da agroindústria em estudo. O método é iniciado com o balanço hídrico considerando os resultados das medidas de conservação da seção anterior (Figura 22).

A $DBO_{5,20}$ é o poluente escolhido como parâmetro limitante para água ser reutilizada, pois atende as condições de qualidade de água para os processos que utilizam água *in natura*, isto é, o processo de limpeza externa. Este processo foi escolhido por consumir 52% da água utilizada na indústria.

A Tabela 17 apresenta, para os principais processos, as vazões requeridas e correspondentes valores de concentração máxima aceitável, ordenados em ordem decrescente da concentração do poluente. Com base nestes valores, foi construída a curva de demanda interna ilustrada no gráfico da Figura 23.

Tabela 17 – Demandas de vazão e concentrações máximas aceitáveis de entrada do poluente DBO

Afluente	Vazão de entrada (m ³ /d)	Concentração máxima aceitável de entrada de DBO (kg/m ³)
Limpeza	520	0,015
Abate	418	0
Produção de vapor	43	0
Refrigeração	29	0

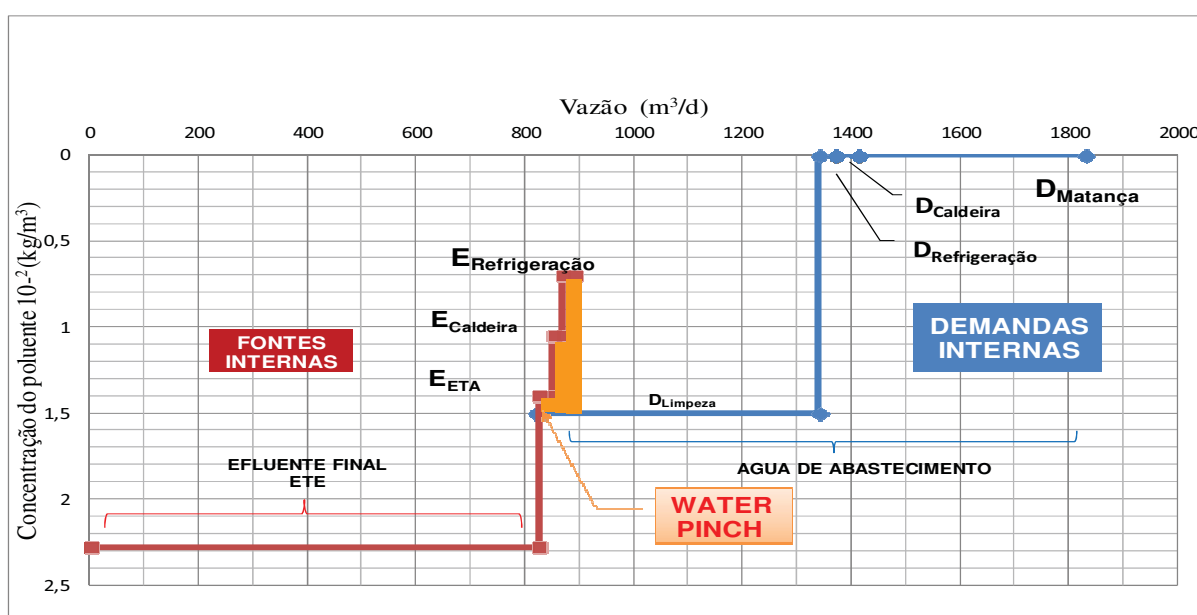
A Tabela 18 apresenta os efluentes gerados em cada processo e sua concentração máxima de saída, ordenados em ordem decrescente da concentração do poluente. Estes efluentes são considerados como ofertas de vazões disponíveis para reutilização, e com base nestes valores é construída a curva de oferta (Figura 23).

Tabela 18 – Ofertas de vazão e concentrações máximas de saída do poluente $\text{DBO}_{5,20}$

Efluente	Vazão de saída (m^3/d)	Concentração máxima de saída de $\text{DBO}_{5,20}$ (kg/m^3)
ETE	826	2,28
ETA	24	0,014
Refrigeração	19	0,011
Produção de vapor	22	0,007

Com os dados de taxa de escoamento e concentração de poluente dos principais fluxos de água, foi construído o gráfico do *water pinch*, ilustrado na Figura 23. A área sombreada no gráfico indica as oportunidades de reúso.

Da análise do gráfico *water pinch* (Figura 23) verifica-se que o efluente da caldeira, o efluente do sistema de refrigeração e o efluente do processo de tratamento de água podem ser reutilizados para atender parte da demanda do processo de limpeza, pois a concentração do poluente no efluente da caldeira, da refrigeração e da ETA é menor que a concentração máxima aceitável do poluente na entrada do processo de limpeza. Esta reutilização reduz o consumo de água de no setor de limpeza de $520 \text{ m}^3/\text{d}$ para $455 \text{ m}^3/\text{d}$, o que representa uma economia de água de aproximadamente 12,5%. No consumo total de água da indústria ocorre uma redução de 6% do consumo de água bruta. O gráfico da Figura 23 também mostra que o efluente final que era de $826 \text{ m}^3/\text{dia}$ reduz para $815 \text{ m}^3/\text{d}$, o que representa uma redução de 7%.

Figura 23 - Análise gráfica de reúso da água pelo método *Water Pinch* (elaborado pelo próprio autor).

A vazão de reúso está indicada pela linha tracejada no balanço hídrico da agroindústria representado na Figura 22.

O método do *water pinch*, em princípio, requer a repetição dos cálculos até que a configuração ótima (de maior conservação hídrica) seja encontrada. No entanto, a cada iteração os ganhos são menores e obtidos a um custo maior. Portanto, usualmente o processo iterativo é considerado convergido quando se encontra uma solução de economia de água a custo razoável. O método também é válido para processos complexos com múltiplos poluentes, mas neste caso requer um modelo matemático computacional.

7.3 Aproveitamento de água de chuva

O dimensionamento do sistema de aproveitamento de água de chuva é feito aplicando o método aproximado australiano, descrito no Anexo C. Este método é de fácil aplicação e resulta em menor volume de reservatório, o que contribui para viabilidade econômica da implementação deste sistema.

São utilizados os dados médios mensais de chuva descritos na Tabela 19. Estes dados foram obtidos da série histórica de dados de chuva da estação Hidrometeorológica PCD 1486, situada na bacia do Rio Sapucaí, no município de Itajubá.

Tabela 19 – Precipitação média mensal

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação média mensal (mm)	263	220	166	84	59	45	36	51	92	148	197	261

A área disponível para captação da água de chuva, 7.662 m², corresponde à área de cobertura do telhado do setor de matança, farinha, congelamento e câmaras de estocagem. Nestes setores o telhado situa-se, em média, a 15 m do nível do piso térreo, favorecendo o abastecimento por gravidade do reservatório de água de chuva. O tipo de cobertura é telha de fibrocimento, com *runnoff* igual a 0,8. Com base nestes dados, o potencial de aproveitamento de água de chuva resulta em 745 m³/mês. Este valor não é suficiente para atender a demanda da agroindústria, que é igual 26.000 m³/mês, mas pode atender uma parcela da demanda do setor de limpeza de curral (1.040 m³/mês) e assim contribuir para diminuir o volume de água captado no manancial hídrico. Além disto, este setor utiliza água *in natura*, não requerendo

tratamento adicional para água da chuva, apenas requer a instalação dos dispositivos previstos na ABNT NB 15.527:2007.

A viabilidade econômica de implementação do sistema de aproveitamento de água de chuva é função do custo do reservatório e da economia obtida com a diminuição do volume de água captado.

O dimensionamento do volume do reservatório é realizado considerando dois cenários de atendimento à demanda, quais sejam, 100% e 50% da demanda de água necessária para a limpeza dos caminhões, ou seja, 728 m³/mês e 364 m³/mês, respectivamente.

O custo do reservatório é determinado considerando o reservatório de concreto armado apoiado, que na região Sudeste é estimado em R\$ 1.500 /m³ (PINI, 2009). A economia obtida foi avaliada para quatro cenários de custo da água para agroindústria, definidos em função de: (i) custo de bombeamento de água; (ii) custo de bombeamento e de tratamento de água; (iii) custos definidos em (ii) adicionado à cobrança pelo uso da água; (iv) preço da tarifa de água cobrado pela concessionária de água. Os resultados do custo da água para cada cenário estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Custo da água considerando os diversos cenários

Cenários		Custo da água R\$/m ³
(i)	Custo da água bombeada	0,16
(ii)	Custo da água bombeada e tratada	0,53
(iii)	Custo (ii) acrescido da cobrança pelo uso da água	0,54
(iv)	Preço tarifa da concessionária	1,87

Para cada volume de reservatório e para cada cenário de custo da água, são calculadas as economias obtidas e descritas na Tabela 21. Adicionalmente, para cada resultado de economia, calcula-se o *payback* referente ao investimento na construção do reservatório. Verifica-se que o investimento não é economicamente atrativo quando se considera somente o custo de bombeamento da água, cenário (i), tanto para o atendimento de 100% da demanda, que resultou em um *payback* igual à 17 anos, quanto para o atendimento de 50% (*payback* igual a 10,3 anos). O cenário mais favorável à implementação é quando se considera o preço da tarifa da concessionária, cenário (iv), conforme mostra a Figura 24. No cenário (iii), verifica-se que a inserção da cobrança pelo uso da água contribui para tornar o projeto do reservatório mais atrativo economicamente, embora menos que no cenário (iv).

Tabela 21 – Resultados da análise econômica do sistema de aproveitamento de água de chuva.

Variáveis		Unidades	Variação da demanda	
			100%	50%
Demanda da área de limpeza		m ³ /mês	728	364
Volume Reservatório		m ³	1.600	280
Confiança		%	83,0	92,0
Volume de concreto		m ³	190,7	57,5
Preço do reservatório		R\$	286.000,00	86.257,5
Custo evitado com água de abastecimento	Cenário (i)	R\$/mês	1.401,4	700,7
	Cenário (ii)	R\$/mês	4.600,0	2.300,0
	Cenário (iii)	R\$/mês	4.719,1	2.359,5
	Cenário (iv)	R\$/mês	16.336,3	8.168,2
Payback	Cenário (i)	anos	17,0	10,3
	Cenário (ii)	anos	5,2	3,1
	Cenário (iii)	anos	5,1	3,0
	Cenário (iv)	anos	1,5	0,9

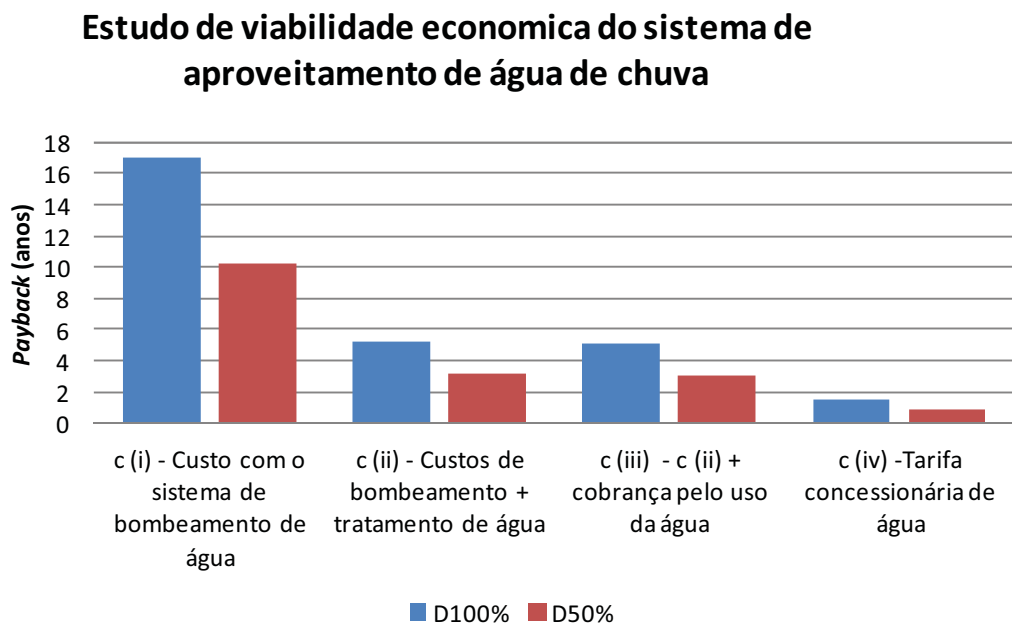


Figura 24 - Payback do sistema de aproveitamento de água de chuva para os diversos cenários de custo da água (elaborado pelo próprio autor).

7.4 Análise econômica

Nesta seção é analisado o impacto econômico das medidas de conservação de água nos custos do sistema hídricos, que é composto pelos custos dos sistemas de abastecimento de água e tratamento de efluentes. Os benefícios da redução do consumo de água e energia são estimados comparando os custos do sistema hídrico para dois cenários: cenário *base*, o custo

do sistema hídrico é determinado para a situação existente na agroindústria; e cenário *com conservação*, são consideradas a aplicação das medidas de conservação hidro-energética (eliminação de perdas e desperdícios de água e energia, reúso de água e aproveitamento de água). O custo do sistema hídrico foi determinado conforme detalhado na seção 2.7.2 do capítulo 2.

Os custos referentes ao sistema de abastecimento de água são apresentados na Tabela 22. Estes custos foram calculados com base nos dados levantados no capítulo 6, seção 6.3, e nas reduções de água e energia obtidas nas seções anteriores.

Com relação ao cenário base, verifica-se no cenário com conservação uma redução de 24,6% no custo do sistema de abastecimento de água (sendo a maior redução no custo de bombeamento do ponto 2 de captação de água), uma redução de 27,8 % no volume de água consumida, além de uma redução de cerca de 10,6% no custo do tratamento de água.

Tabela 22 – Custo do sistema de abastecimento de água, volume de água e consumo de energia.

Parâmetros	Variáveis	Unidade	Quantidade	
			Cenário base	Cenário conservação
Custo do sistema de abastecimento de água	C _{Sist.Agua}	R\$/ano	204.680,09	134.954,15
Custo de bombeamento da água	C _{Bomb}	R\$/ano	118.840,09	58.186,15
▪ Custo de bombeamento - ponto 1 (água tratada e bruta)	C _{Bomb1}	R\$/ano	92.213,27	53.745,25
▪ Custo de bombeamento - ponto 2 (água bruta)	C _{Bomb2}	R\$/ano	26.626,83	3.556,80
▪ Custo de bombeamento – Reúso	C _{Reúso}	R\$/ano	0	884,10
Custo do tratamento da água	C _{ETA}	R\$/ano	85.840,00	76.768,00
▪ Custo de manutenção e operação	C _{Manut}	R\$/ano	37.200,00	37.200,00
▪ Custo de depreciação dos equipamentos	C _{Depre}	R\$/ano	18.400,00	18.400,00
▪ Custo com produtos químicos	C _{TratQuim}	R\$/ano	30.240,00	21.168,00
Volume anual de água	Vol _{Total}	m ³	400.430	289.157
▪ Volume de captado, ponto 1	Vol _{P1}	m ³	234.446	152.484
▪ Volume de captado, ponto 2	Vol _{P2}	m ³	165.984	136.673
▪ Volume de reúso	Vol _R	m ³	0	24.278
Consumo anual de energia	Cons _{Energ}	kWh	264.758	138.948

Apresentam-se na Tabela 23 os custos do sistema de coleta e tratamento de efluentes. Estes custos foram obtidos com base na formulação apresentada no item 2.7.2, nos dados levantados no capítulo 6, item 6.3, e nas medidas de conservação hidro-energética propostas.

As medidas de conservação hidro-energética propiciam uma redução no volume de efluentes na estação de tratamento de efluentes de 13.530 m³ por ano, ou seja, cerca de 5,2%. Entretanto as reduções no custo do tratamento de efluentes são menos significativas, cerca de

2,3%. Isto ocorre devido ao fato de que no cenário atual da indústria uma parcela do efluente é lançada diretamente no corpo receptor sem nenhum tratamento e custo, em desacordo com a legislação vigente.

Tabela 23 – Custo do sistema de coleta e tratamento de efluente, o volume de água e a energia consumida.

Parâmetros	Variáveis	Unidade	Quantidade	
			Cenário base	Cenário com conservação
Custo do sistema de coleta e tratamento de efluente	$C_{Sist.Eflu}$	R\$/ano	93.392,06	91.243,30
▪ Custo de bombeamento no sistema de efluentes	$C_{Bomb.Eflu}$	R\$/ano	29.800,51	28.259,45
▪ Custo de produtos químicos	$C_{Trat.Eflu}$	R\$/ano	11.751,55	11.143,85
▪ Custo de transporte de resíduos	$C_{TResiduo}$	R\$/ano	51.840,00	51.840,00
Volume anual de efluente	Vol_{Eflu}	m ³	261.642	248.112
Energia consumida anual	$Cons_{Energ}$	kWh	156.845	148.734

Para os dois cenários, cenário base e com conservação, também são apresentados os custos do sistema hídrico com e sem cobrança pelo uso da água e pelo lançamento de efluentes. A fórmula de cobrança pelo uso d'água definida pelo CEIVAP na bacia do rio Paraíba do Sul é adotada neste trabalho para a bacia hidrográfica do rio Sapucaí por não ter sido ainda estabelecida para esta bacia tal tipo de cobrança. Isto possibilita estimar o impacto da cobrança nos custos de produção e ainda analisar a eficácia da cobrança como um instrumento de estímulo ao uso racional da água.

Para determinar os valores de $Valor_{Total}$, $Valor_{Cap}$, $Valor_{cons}$, e $Valor_{DBO}$, respectivamente equação (1), (2), (4) e (5), são adotados os custos de PPU_{cap} , PPU_{cons} , e PPU_{DBO} , iguais a R\$0,01/m³, R\$0,002/m³ e 0,07kg/m³ respectivamente, o volume anual de água captada (Ponto 1 e Ponto 2) é o mesmo apresentado para o sistema de abastecimento de água e valor de 0,9 para $K_{cap\ classe}$ (valor definido na DN65 para a classe 2 na qual se enquadra o rio Sapucaí). O volume anual captado total, Q_{capT} , adotado é o mesmo volume captado pelo sistema de bombeamento e o volume de lançamento é igual ao volume medido no lançamento dos efluentes. Os resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Custos da cobrança pelo uso dos recursos hídricos no cenário base e com conservação

Parâmetros	Variáveis	Un	Valores	
			Cenário base	Cenário com conservação
Valor pela cobrança do uso da água	Valor _{Total}	R\$	18.183,46	12.386,10
▪ Pagamento anual pela captação de água	Valor _{CAP}	R\$	3.891,37	4.091,66
▪ Pagamento anual pelo consumo de água	Valor _{cons}	R\$	1.555,63	1.548,32
▪ Pagamento anual pelo lançamento de carga orgânica	Valor _{DBO}	R\$	12.736,46	6.710,13
Concentração média anual de DBO _{5,20} lançada	C _{DBO}	kg/m ³	0,564	0,457

A cobrança pelo uso da água e pelo lançamento de efluentes no corpo hídrico no cenário base (sem conservação) seria de R\$18.183,46, sendo que 70% deste valor corresponde ao lançamento da carga orgânica, R\$12.736,46. No cenário com conservação, este custo reduz cerca de 32%. Entretanto, vale ressaltar que o Valor_{cap} para o cenário com conservação resultou maior que no cenário base. Isto ocorre porque no cenário de conservação a vazão medida é muito menor que a vazão outorgada, e de acordo Tabela 3 quando $Q_{\text{capmed}}/Q_{\text{capout}}$ é menor que 0,7 tem-se K_{medextra} igual a 1. Esta variável tem a finalidade de inibir que se tenha uma outorga muito maior que a vazão utilizada. Mas neste estudo isto ocorre porque houve uma redução no valor da vazão medida devido a adoção das medidas de conservação, portanto para reduzir o custo tem que também ser solicitada uma retificação no pedido de outorga.

O custo do sistema hídrico calculados com a cobrança e sem a cobrança pelo uso da água, equação (9) e (6), respectivamente, são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Custos do sistema hídrico com e sem cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

Parâmetros	Variáveis	Unidade	Quantidade	
			Cenário base	Cenário com conservação
Custo do sistema hídrico sem considerar a cobrança	C _{Sist Hid}	R\$/ano	298.072,15	226.197,45
Custo do sistema hídrico considerando a cobrança pelo uso da água	C _{Sist HidT}	R\$/ano	316.255,61	238.583,55
Consumo de energia anual	C _{consEnerg}	kWh	421.603	287.682

Verifica-se que sem considerar a cobrança pelo uso da água, as medidas de conservação hidro-energética reduzem o custo do sistema hídrico de R\$298 mil para R\$226 mil, que representa uma redução igual a 24,1%. Quando considerada a cobrança pelo uso da água a redução é de 24,6%. A cobrança resulta no aumento de 6% no custo do sistema hídrico no cenário base e 5% no cenário com conservação.

A economia de energia obtida é de 133.921 kWh, cerca de 32% da energia no sistema hídrico. O impacto ambiental desta redução da demanda de energia será analisado posteriormente através do indicador energético-ambiental.

7.5 Estudo de viabilidade de aproveitamento do biogás

A primeira etapa para definir o aproveitamento energético do biogás consiste na avaliação do seu potencial. Para isto é necessário conhecer a composição do biogás e seu PCI. Para a agroindústria em estudo, considera-se a composição do biogás igual a 60% de CH_4 , 35% de CO_2 , 0,5% de NH_3 , 1% de H_2O , 1% de O_2 e 2% de N_2 . Para o biogás com 60% de CH_4 tem-se o PCI igual a $6,5 \text{ kWh/m}^3$.

Segundo dados da agroindústria, a DQO de entrada (DQO_e) média é igual a $8,76 \text{ kg/m}^3$ e a DQO de saída (DQO_s) média do reator anaeróbio é igual a $1,54 \text{ kg/m}^3$, o que resulta numa DQO removida (DQO_r) igual a $7,22 \text{ kg/m}^3$. Considerando a taxa de conversão de DQO_r em metano igual a $0,3 \text{ m}^3 CH_4/\text{kg} DQO_r$ e o volume diário de efluentes igual 1.000 m^3 (dado de projeto da ETE), a produção de metano é igual a $2.167 \text{ m}^3/\text{d}$. Dada a porcentagem de 60% de metano no biogás, conclui-se que a produção diária de biogás na agroindústria é igual a $3.611 \text{ m}^3/\text{d}$.

São analisadas duas possibilidades de aproveitamento de biogás, uma utilizando um sistema composto por motor de combustão interna (ciclo Otto) e gerador elétrico e outra utilizando uma microturbina. No primeiro caso, considerando o rendimento igual a 30%, obtém-se uma potência resultante igual a 293 kW (equação 10, item 3.1.3). No segundo caso, a potência resultante é igual a 273 kW, para um rendimento igual a 28%.

Considerando os valores de potência calculados e o número total de horas de operação no ano (3.744 horas), a energia anual disponível pelo motor-gerador é de 1.097 MWh, enquanto que para o sistema considerando o emprego da microturbina é igual a 1.022 MWh. Estes valores representam os montantes de energia que a agroindústria deixará de comprar da concessionária de energia. Foi considerado preço da tarifa de energia elétrica no horário fora de ponta igual R\$0,19/kWh e no horário de ponta igual a R\$1,72/kWh. Para o motor-gerador, a receita proveniente da economia de energia elétrica é de R\$488.851,30 e para a microturbina, a receita proveniente da economia de energia elétrica é de R\$456.261,21.

As estimativas dos custos de investimentos e de operação são baseadas no estudo realizado por Costa (2006), considerando um motor-gerador TRIGAS com potência de 25 kW

e vida útil de 5.000 horas e uma microturbina Capstone de 30 kW e vida útil de 40.000 horas. Costa (2006) obtém os custos totais de investimentos e operação por kW gerado para o sistema motor-gerador e microturbina iguais a R\$2.761,95/kW e R\$6.501,42/kW¹³, respectivamente. Logo, o custo de operação e manutenção unitário para o motor-gerador e para a microturbina considerados neste estudo são iguais a R\$0,0285/kWh e R\$0,1904/kWh, respectivamente.

O custo de manutenção e operação anual do motor-gerador resulta em R\$31.297,47 e o custo total anual de operação e manutenção da micro-turbina é igual a R\$195.200,34.

Considerando uma taxa de juros de 8% ao ano, e horizonte de 15 anos, o *VPL* para o sistema de motor-gerador é de R\$3.106.026,87 e para a microturbina é de R\$454.111,37.

Para o grupo motor-gerador a *TIR* é 132% e o *payback* é igual 1,7 anos, em enquanto que para a microturbina estes valores são de 1% e 6,8 anos, respectivamente.

7.6 Estudo de viabilidade da cogeração

Neste trabalho, o sistema de cogeração é feito com o emprego de uma turbina a vapor de tipo contrapressão e de uma caldeira aquatubular com superaquecimento, utilizando como combustível a lenha. A escolha deste tipo de combustível resulta do fato de ele já ser utilizado pela indústria na produção de vapor, pelo seu baixo custo e de sua grande disponibilidade na região.

O emprego de uma turbina a gás natural, embora mais atraente do ponto de vista ambiental, não foi considerado devido à inexistência de gasodutos de distribuição na região. A grande distância entre a indústria em estudo e os centros de produção de gás natural, requer alto investimento para construção e operação de um gasoduto, inviabilizando economicamente o uso de gás natural no sistema de cogeração.

Apresenta-se no Anexo D o equacionamento para o dimensionamento do sistema de cogeração considerando o aproveitamento do calor liberado da caldeira para geração de eletricidade. Nos cálculos de dimensionamento da cogeração a lenha foram considerados a eficiência para caldeira (η_{cal}) igual a 80%; perda de carga nas caldeiras de 0,2 MPa; aumento de 3°C do vapor de processo na saída da bomba por efeito de atrito mecânico; perda de 5% na

¹³ Valores dados em US\$/kW , convertidos para reais utilizando taxa de câmbio igual a 1,925 US\$/R\$, 2007.

conversão elétrica; poder calorífico inferior da lenha (PCI_{lenha}) igual a 3100 kcal/kg; eficiência isentrópica da turbina a vapor igual a 85% e a da bomba igual a 80% (WYLEN, 2003).

A cogeração foi dimensionada para dois cenários de atendimento a demanda de energia elétrica. No primeiro cenário é aceitável que parte da demanda seja atendida pelo sistema de cogeração e a restante atendida pela rede elétrica local. No segundo cenário, a demanda é plenamente atendida pelo sistema de cogeração e pode haver excedentes para a venda. Esses cenários são definidos em função de distintos parâmetros termodinâmicos empregados.

Um ciclo de cogeração com emprego de turbinas a vapor de contrapressão é ilustrado na Figura 25.

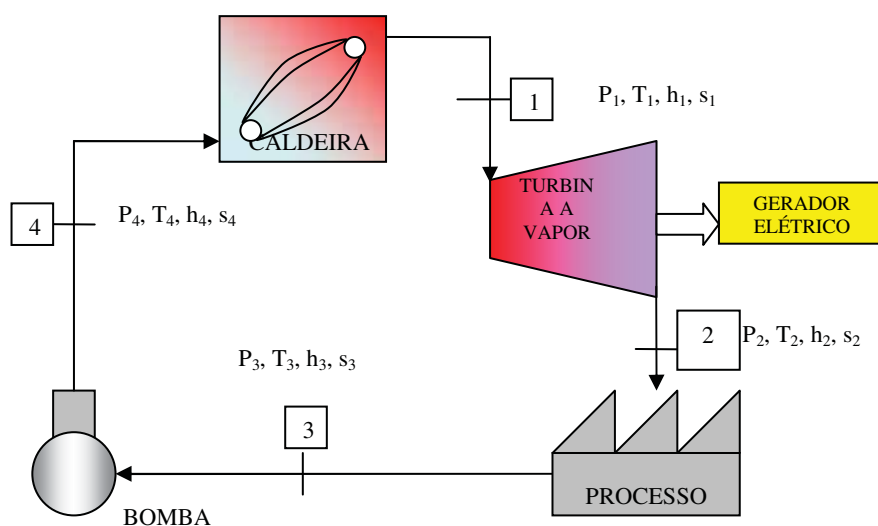


Figura 25 - Ciclo de cogeração com turbina a vapor de contrapressão (elaborado pelo próprio autor)..

Na Tabela 26, apresentam-se os principais parâmetros termodinâmicos do ciclo apresentado na Figura 25, vazão mássica ($\dot{m}$), pressão (P), temperatura (T), entalpia (h) e entropia específica (s), referentes ao cenário de eventual atendimento parcial da demanda de energia elétrica.

Tabela 26 – Principais parâmetros termodinâmicos com atendimento parcial da demanda.

Ponto	Vazão ($\dot{m}$) kg/s	Pressão (P) MPa	Temperatura (T) °C	Entalpia específica (h) kJ/kg	Entropia (s) kJ/kg
1	2,78	4,5000	350,0	3081	6,513
2	2,78	1,0810	193,9	2808	6,618
3	2,78	0,1013	100,0	419	1,307
4	2,78	4,7000	100,6	425	1,310

Na Tabela 27 são apresentados os principais parâmetros termodinâmicos para o segundo cenário de pleno atendimento da demanda e produção de excedentes.

Tabela 27 – Principais parâmetros termodinâmicos com pleno atendimento da demanda e com excedentes

Ponto	Vazão (m) kg/s	Pressão (P) MPa	Temperatura (T) °C	Entalpia específica (h) kJ/kg	Entropia (s) kJ/kg
1	2,78	5,5000	400,0	3186	6,591
2	2,78	1,0810	193,9	2854	6,618
3	2,78	0,1013	100,0	419	1,307
4	2,78	4,7000	100,6	425	1,310

A Tabela 28 apresenta os resultados do dimensionamento da cogeração considerando com o atendimento parcial (cenário 1) e o pleno atendimento da demanda de energia e com excedentes (cenário 2), conforme o dimensionamento apresentado no Anexo D.

Tabela 28 – Principais parâmetros termodinâmicos com pleno atendimento da demanda e com excedentes

Variável		Unidade	Valor		Equação
			Cenário 1	Cenário 2	
Trabalho de eixo	W_{eixo}	kW	759	923	Equação (30)
Potência elétrica produzida	E_p	kW	703	858	Equação (31)
Potência térmica do processo	E_{cv}	kW	6.636	6.763	Equação (32)
Trabalho da bomba	W_{Bomba}	kW	18,5	18,52	Equação (33)
Calor fornecido para água na caldeira	E_v	kW	7.378	7.669	Equação (34)
Energia fornecida pelo combustível	E_{comb}	kW	9.922	9.587	Equação (35)
Massa de combustível	m_{comb}	kg/s	0,71	0,74	Equação (36)
Rendimento elétrico	(η_{EL})	%	0,076	0,090	Equação (37)
Rendimento térmico	(η_T)	%	0,720	0,705	Equação (38)
Rendimento global	(η_G)	%	0,80	0,80	Equação (39)
Custo da caldeira	C_{Cal}	R\$	1.939.770	2.005.956	Equação (40)
Custo da turbina a vapor	C_{TV}	R\$	1.470.170	1.691.255	Equação (41)
Custo da bomba	C_B	R\$	152.668,88	152.669	Equação (42)
Custo de manutenção	C_M	R\$/h	15	16	(1)
Custo de operação	C_{op}	R\$/h	6,4	6,4	(2)
Número de horas de operação	N_h	horas		7.200	Adotado
Custo do vapor convencional	C_{cv}	R\$/kWh		0,0385	Dado da
Custo do combustível	C_{comb}	R\$/kWh		0,0242	indústria
Custo da eletricidade	C_{EL}	R\$/kWh	0,0715	0,067	Equação (43)
Custo do vapor	C_v	R\$/kWh	0,0424	0,043	Equação (44)

(1) 3% do custo dos equipamentos; (2) É considerado 1 funcionário para operar a planta, com salário de R\$3.850,00.

O custo total de implementação do sistema de cogeração com sistema funcionando em paridade térmica, considerando os resultados anteriores é de R\$4.620.991,76.

Com os parâmetros termodinâmicos referentes ao cenário de atendimento parcial da demanda, obtém-se um sistema de cogeração capaz de produzir 702,5 kW, portanto inferior à demanda contratada de 710 kW. Com base nestes resultados, é feita uma análise de viabilidade econômica considerando as taxas de juros variando entre 6% a 14%, e valores de *payback* de 0 a 20 anos e os valores de receita anual resultantes são ilustrados no gráfico da Figura 26.

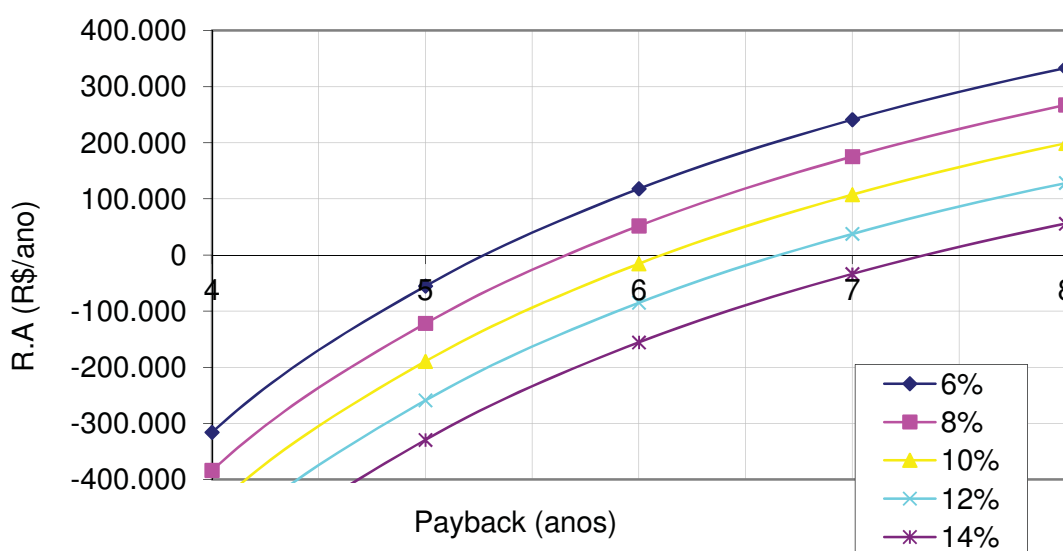


Figura 26 - Receita anual do sistema de cogeração operando com déficit de energia (elaborado pelo próprio autor).

Para o segundo conjunto de parâmetros termodinâmicos, o sistema de cogeração é capaz de produzir 858 kW, valor superior a demanda de 710 kW, e este excedente pode ser vendido à concessionária de energia elétrica ou a outro consumidor, gerando ganhos para a indústria. De forma análoga ao caso anterior, na Figura 27 são apresentados os valores da receita anual para os vários valores de taxa de juros e *payback*. Da análise dos dois gráficos pode-se verificar que, para uma taxa de juros de 6%, o retorno de investimento que no primeiro caso era de 5,3 anos, reduz para 4,8 anos com as vendas dos excedentes de energia.

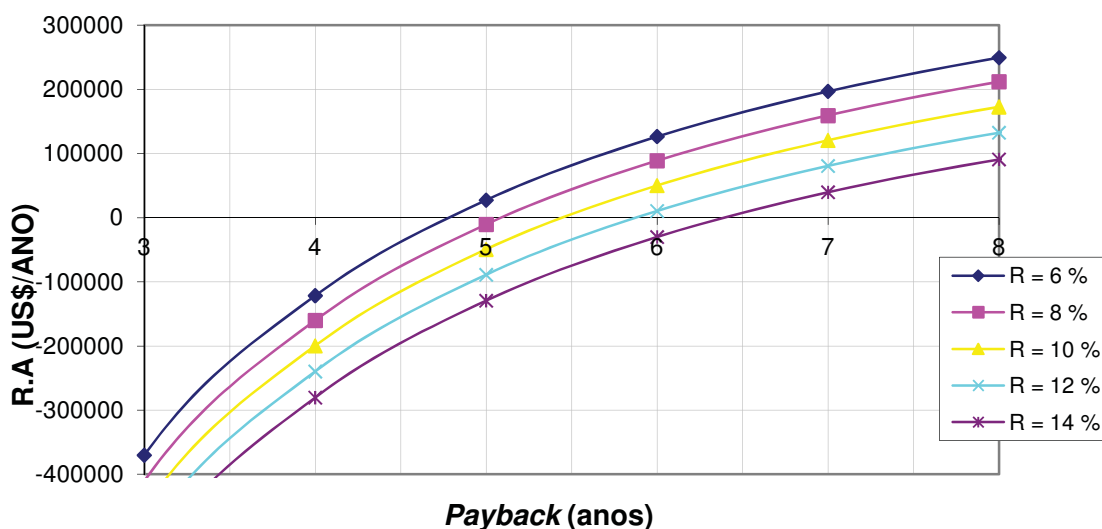


Figura 27 - Receita anual do sistema de cogeração operando com excedente de energia (elaborado pelo próprio autor).

7.7 Cálculo do $(CO_2)_e$ e do π_g

Nesta seção, o dióxido de carbono equivalente $(CO_2)_e$ e o indicador de poluição (π_g) são determinados para os processos de combustão da lenha da caldeira e do biogás no *flare* da estação de tratamento anaeróbia de efluentes da agroindústria. O $(CO_2)_e$ e π_g também são determinados para os casos de uso de energia elétrica provenientes dos seguintes sistemas de geração: termelétricas a gás natural, a diesel e a carvão, usina hidrelétrica e sistema de cogeração a lenha.

Para o cálculo do $(CO_2)_e$ e do π_g do sistema de produção de vapor considera-se o emprego de uma caldeira aquatubular utilizando a lenha, com taxas de emissões de CO_2 e SO_2 iguais a $1,83 \text{ kgCO}_2/\text{kg}_{\text{Comb}}$ e $0,00078 \text{ kgSO}_2/\text{kg}_{\text{Comb}}$, respectivamente, determinadas através de cálculos estequiométricos considerando excesso de ar de 100%. São adotadas taxas de emissão de NO_x igual $0,0052 \text{ kgNO}_x/\text{kg}_{\text{Lenha}}$ e de MP igual $0,0155 \text{ kgMP}/\text{kg}_{\text{Lenha}}$, definidas em ECA (2005). Os resultados de π_g e $(CO_2)_e$ são obtidos através das equação (13) e (14), respectivamente, conforme metodologia proposta no capítulo 5, item 5.2, e estão apresentados na Tabela 29.

O cálculo do indicador de poluição referente ao processo de queima do biogás gerado na ETERA é realizado considerando a composição do biogás igual a 60% de CH_4 , 35% de CO_2 , 0,5% de NH_3 , 1% de H_2O , 1% de O_2 e 2% de N_2 . Do cálculo estequiométrico da equação de

combustão do biogás no *flare* (excesso de ar igual a 100%) obtém-se que a emissão de CO_2 é igual $1,5884 \text{ kgCO}_2/\text{kg}_{\text{biogás}}$ e a emissão do SO_x igual a $0,0122 \text{ kgSO}_2/\text{kg}_{\text{biogás}}$. A emissão de NO_x é igual a $0,0147 \text{ kgNO}_x/\text{kg}_{\text{Comb}}$. Os resultados de π_g e $(\text{CO}_2)_e$, obtidos pelas equações (13) e (14), respectivamente, também estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Indicador de poluição para a caldeira a lenha e queima de biogás no *flare*

Tecnologia	Comb.	Emissões (kg/kgComb)				$(\text{CO}_2)_e$	PCI	Π_g
		(CO_2) kg/kgComb	(SO_2) kg/kgComb	(NO_x) kg/kgComb	MP kg/kgComb	kg(CO ₂)/kg _{comb}		
Caldeira	Lenha	1,83	0,0008	0,0052	0,0155	3,192	12,97	0,246
Flare	Biogás	1,59	0,0122	0,0161	0,0000	3,367	29,847	0,113

Na Tabela 30 são apresentados os valores de PCI e $(\text{CO}_2)_e$ adotados e os resultados obtidos para os indicadores de poluição para termelétricas a ciclo combinado sem queima de combustível suplementar com emprego de gás natural, diesel e carvão CE4500. Os dados de PCI e $(\text{CO}_2)_e$ apresentados foram obtidos na literatura referenciada.

Tabela 30 – Indicador de poluição de energia elétrica considerando a geração termelétrica exclusiva

Tecnologia e combustível	η	PCI MJ/kg	$(\text{CO}_2)_e$ kg(CO ₂)/ kgComb	Π_g kg(CO ₂)/MJ	Fonte
Termelétrica GN	51	49,81	2,77	0,056	Silveira, Carvalho Jr. e Villela (2007)
Termelétrica Diesel	51	42,95	5,10	0,119	Silveira, Carvalho Jr. e Villela (2007)
Termelétrica Carvão CE4500	41	19,00	2,33	0,123	Lora e Salomon (2004)

Para o caso da energia elétrica da agroindústria sendo suprida por uma hidrelétrica é determinado o indicador médio de poluição para uma hidrelétrica, $\bar{\pi}_{g \text{ Hid}}$ (Tabela 31). Conforme apresentado no item 5.2 do Capítulo 5, este indicador é determinado pela média ponderada dos indicadores de poluição de várias usinas hidrelétricas (equação 27), visto que não há um único índice de emissão para hidrelétricas. A Tabela 31 apresenta o valor do indicador de poluição de cada hidrelétrica. O valor de $\pi_{g \text{ Hid}}$, conforme equação (26), é função do índice de emissão de cada usina, $(I_{e\text{CO}_2})$, da área do reservatório (A), do rendimento (η) e da potencia instalada (P). Neste trabalho estes valores são obtidos das usinas hidrelétricas

apresentadas no Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2006).

Tabela 31 – Cálculo do indicador de poluição médio das hidrelétricas

Usinas Hidrelétricas	I_{eCO_2} kgCO ₂ /km ² .d	Área km ²	P MW	Π_{gHid} kg(CO ₂) _e /MJ
Tucuruí	8.475,0	2.430	4.240	0,0169
Samuel	7.488,0	559	216	0,0673
Xingó	6.138,0	60	3.000	0,0004
Serra da Mesa	3.973,0	1.784	1.275	0,0193
Três Marias	1.117,0	1.040	396	0,0102
Miranda	4.388,0	51	390	0,0020
Barra Bonita	3.985,0	312	140	0,0308
Itaipu	171,0	1.549	12.600	0,0001
Segredo	2.695	82	1260	0,0006
$\bar{\pi}_{gHid}$				0,0170

Verifica-se que o maior valor de indicador de poluição refere-se à usina de Samuel, igual a 0,067 kg(CO₂)_e/MJ. O $\bar{\pi}_{gHid}$ (valor médio) das hidrelétricas resulta em 0,0170 kg(CO₂)_e/MJ, e é menor que qualquer um dos indicadores de poluição das termelétricas apresentados anteriormente. Ressalta-se que este valor é próximo ao valor médio do Fator Médio anual do Sistema Interligado Nacional, 0,0103 kgCO₂/MJ.

Os indicadores de poluição calculados para cada sistema de geração de energia calorífica/elétrica da agroindústria apresentados nas Tabelas 29, 30 e 31 estão representados no gráfico da Figura 28. Verifica-se que o sistema de produção de vapor (caldeira a lenha) possui o pior indicador de poluição, π_g é igual a 0,246 kg(CO₂)_e/MJ. Em relação sistema de geração de energia elétrica, a termelétrica a carvão é o que apresenta pior indicador, isto é, π_g igual a 0,1230 kg(CO₂)_e /MJ (Figura 28). Por outro lado, o indicador de poluição mais favorável é aquele referente à usina hidrelétrica.

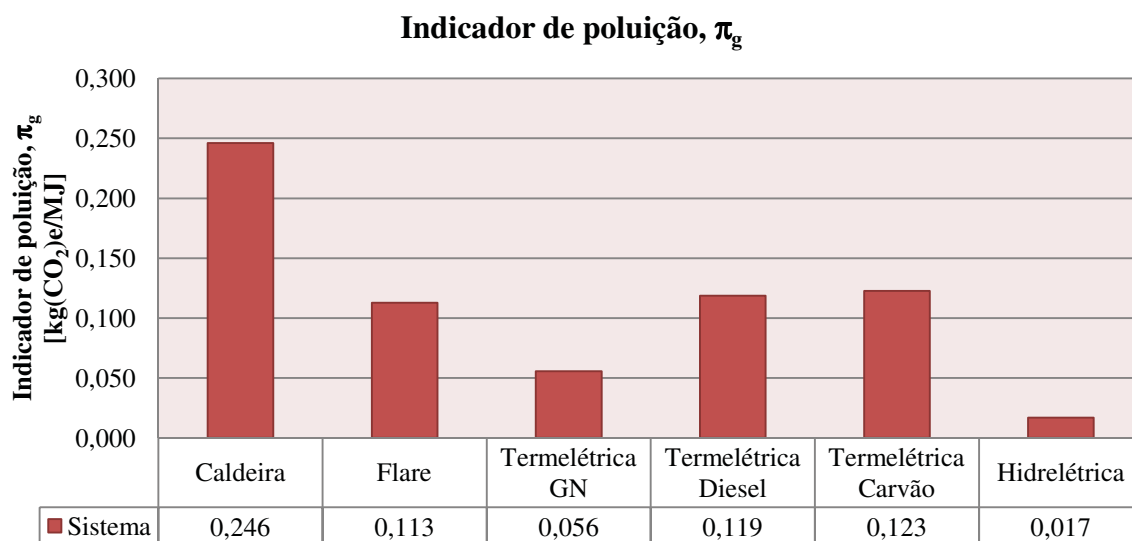


Figura 28 - Gráfico do indicador de poluição de cada sistema energético da agroindústria (elaborado pelo próprio autor).

7.8 Cálculo do indicador energético-ambiental (ϵ)

Nesta seção são calculados os indicadores energético-ambiental para atual condição de operação da indústria e para as aquelas em que as diversas medidas de conservação propostas são implementadas.

O indicador energético-ambiental (ϵ) é obtido em função do indicador de poluição (π_g), do uso da energia (E) proveniente de fontes internas e externas e do produto, conforme apresentado na equação (17). Os indicadores de poluição referem-se às emissões geradas diretamente e indiretamente pela agroindústria apresentadas nas seções anteriores. As emissões diretas são provenientes da queima de combustível na caldeira para produção de vapor e da queima de biogás no *flare* proveniente do processo de tratamento anaeróbico de efluentes. As emissões geradas indiretamente pela indústria são resultantes do sistema de geração de energia elétrica. Neste trabalho foram consideradas as fontes de geração de energia elétrica sendo proveniente de uma termelétrica, considerando o uso de gás natural, diesel e carvão ou de uma hidrelétrica ou de cogeração.

As Tabelas de 32 a 35 descrevem os valores dos indicadores energético-ambiental (ϵ) obtidos considerando para cada tabela uma determinada fonte de geração de energia elétrica. Em cada tabela também são mostrados os valores dos indicadores obtidos considerando as seguintes aplicações das medidas de conservação estudadas, sendo (a) sem aplicação de

medida de conservação; (b) aplicação das medidas de conservação hídrica; (c) aplicação das medidas de conservação no sistema de produção de vapor; (d) aproveitamento do biogás; (e) aplicação de todas as medidas de conservação; e (f) aplicação da cogeração considerando que há pleno atendimento da demanda de energia elétrica.

Conforme resultados apresentados nas seções anteriores as medidas de conservação hidro-energética (eliminação de perdas e desperdícios de água e energia, reúso de água, aproveitamento da água de chuva), reduzem a demanda de energia elétrica de 30.022 MJ para 25.157MJ, as medidas para redução das perdas de calor no sistema de produção de vapor reduzem a demanda diária de calor de 43.581 MJ para 41.837 MJ, enquanto que o aproveitamento energético do biogás reduz em 9.503 MJ a demanda diária de energia elétrica. A implementação de todas as medidas de conservação resultam numa redução 11.512 MJ da demanda diária de energia elétrica e 1.744 MJ da demanda de calor.

Tabela 32 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a termelétrica a gás natural.

Medidas de conservação aplicadas	Sistema	Π_g $\frac{kg(CO_2)_e}{MJ}$	Energia MJ	ϵ $\frac{kg(CO_2)_e}{cabeça}$
a) Sem aplicação de medida de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,514
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica GN	0,056	30.022	
b) Conservação Hídrica	Combustão biogás	0,113	10.559	5,500
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica GN	0,056	28.013	
c) Redução das perdas no sistema de produção de vapor	Combustão biogás	0,113	10.559	5,307
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Termelétrica GN	0,056	30.022	
d) Aproveitamento do Biogás	Combustão biogás	0,113	10.559	5,448
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica GN	0,056	19.463	
e) Todas as medidas de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,227
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Termelétrica GN	0,056	18.510	
f) Cogeração	Combustão biogás	0,113	10.559	5,305
	Cogeração	0,246	167.598	

Tabela 33 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a termelétrica a diesel.

Medidas de conservação aplicadas	Sistema	Πg $\frac{kg(CO_2)_e}{MJ}$	Energia MJ	ϵ , $\frac{kg(CO_2)_e}{cabeça}$
a) Sem aplicação de medida de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,751
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica Diesel	0,056	30.022	
b) Conservação Hídrica	Combustão biogás	0,113	10.559	5,721
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica Diesel	0,056	28.013	
c) Redução das perdas no sistema de produção de vapor	Combustão biogás	0,113	10.559	5,544
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Termelétrica Diesel	0,056	30.022	
d) Aproveitamento do Biogás	Combustão biogás	0,113	10.559	5,610
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica Diesel	0,056	19.463	
e) Todas as medidas de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,375
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Termelétrica Diesel	0,056	18.510	
f) Cogeração	Combustão biogás	0,113	10.559	5,305
	Cogeração	0,246	167.598	

Tabela 34 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a termelétrica a carvão.

Medidas de conservação aplicadas	Sistema	Πg $\frac{kg(CO_2)_e}{MJ}$	Energia MJ	ϵ , $\frac{kg(CO_2)_e}{cabeça}$
a) Sem aplicação de medida de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,765
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica Carvão	0,056	30.022	
b) Conservação Hídrica	Combustão biogás	0,113	10.559	5,734
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica Carvão	0,056	28.013	
c) Redução das perdas no sistema de produção de vapor	Combustão biogás	0,113	10.559	5,559
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Termelétrica Carvão	0,056	30.022	
d) Aproveitamento do Biogás	Combustão biogás	0,113	10.559	5,620
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Termelétrica Carvão	0,056	19.463	
e) Todas as medidas de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,383
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Termelétrica Carvão	0,056	18.510	
f) Cogeração	Combustão biogás	0,113	10.559	5,305
	Cogeração	0,246	167.598	

Tabela 35 – Cálculo do indicador energético-ambiental para a agroindústria para as diversas aplicações das medidas de conservação e considerando como fonte geração de energia elétrica a hidrelétrica.

Medidas de conservação aplicadas	Sistema	Πg $\frac{kg(CO_2)_e}{MJ}$	Energia MJ	ϵ , $\frac{kg(CO_2)_e}{cabeça}$
a) Sem aplicação de medida de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,369
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Hidrelétrica	0,056	30.022	
b) Conservação Hídrica	Combustão biogás	0,113	10.559	5,365
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Hidrelétrica	0,056	28.013	
c) Redução das perdas no sistema de produção de vapor	Combustão biogás	0,113	10.559	5,163
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Hidrelétrica	0,056	30.022	
d) Aproveitamento do Biogás	Combustão biogás	0,113	10.559	5,349
	Caldeira a lenha	0,246	167.598	
	Hidrelétrica	0,056	19.463	
e) Todas as medidas de conservação	Combustão biogás	0,113	10.559	5,138
	Caldeira a lenha	0,246	160.894	
	Hidrelétrica	0,056	18.510	
f) Cogeração	Combustão biogás	0,113	10.559	5,305
	Cogeração	0,246	167.598	

O gráfico da Figura 29 apresenta o indicador energético-ambiental obtidos nas Tabelas de 32 a 35. Os indicadores são agrupados considerando as diversas fontes de geração de energia elétrica e aplicação de uma determinada medida de conservação. Verifica-se que os valores mais baixos do indicador energético-ambiental ocorrem quando há aplicação de todas as medidas de conservação em conjunto, o que era se de esperar, e que as medidas de conservação no sistema de produção de vapor são as que mais contribuem individualmente para a redução do indicador.

Da Tabela 35, quando a geração elétrica é feita através de uma hidrelétrica, verifica-se que a redução das perdas no sistema de produção de vapor é a medida que mais contribui para redução das emissões da indústria, com valor de indicador, ϵ , é igual a $5,163 \frac{kg(CO_2)_e}{cabeça}$. Por outro lado, as medidas de conservação hídrica são as que têm o menor impacto positivo, ϵ igual a $5,365 \frac{kg(CO_2)_e}{cabeça}$. Resultados semelhantes são obtidos quando se utilizada termelétrica a gás natural, a diesel e a carvão, conforme pode-se verificar nas Tabelas de 32 a 35 e na Figura 29.

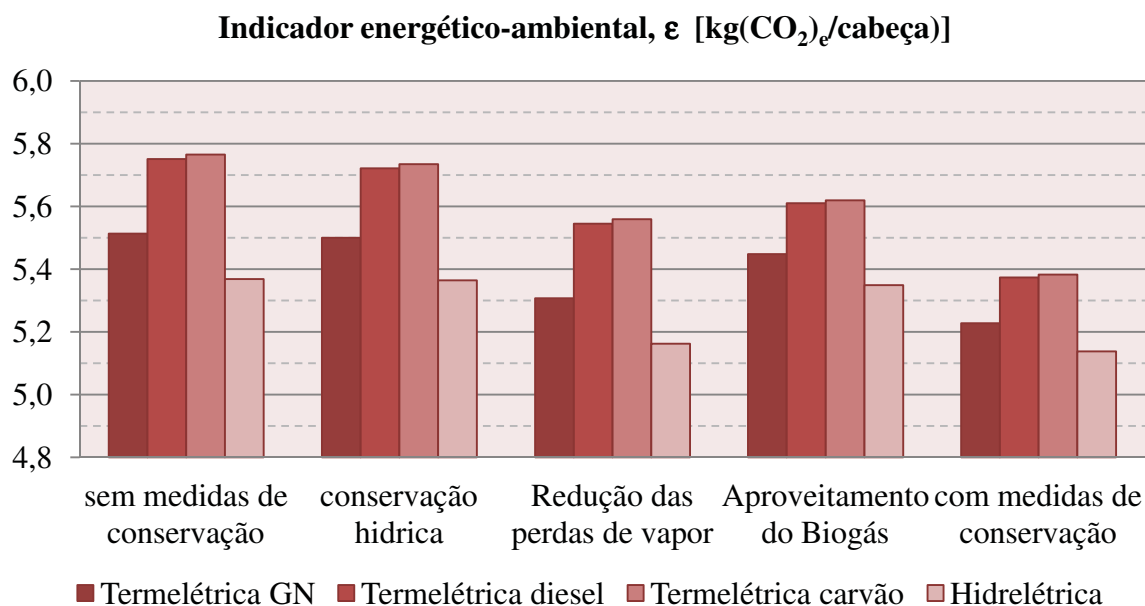


Figura 29 - Gráfico do indicador energético-ambiental da agroindústria calculado considerando as diversas fontes de geração de energia elétrica e a aplicação das medidas de conservação (elaborado pelo próprio autor).

O gráfico da Figura 30 apresenta os indicadores energético-ambiental obtidos considerando a implementação de todas as medidas de conservação hidro-energética para as diferentes fontes de energia elétrica analisadas, assim como o do sistema de cogeração a lenha. Verifica-se que o melhor indicador energético-ambiental é obtido quando o suprimento de energia elétrica é feito por uma usina hidrelétrica. Verifica-se também que o indicador energético-ambiental apresenta valores mais elevados quando se considera a demanda de energia elétrica sendo atendida por uma termelétrica a diesel e a carvão. O indicador obtido para termelétrica a gás natural é mais próximo do indicador do sistema hidrelétrico. O indicador referente ao caso em que se emprega a cogeração é maior que aquele obtido quando se utiliza a hidrelétrica ou termelétrica a gás natural como fonte de geração elétrica, o que inviabiliza ambientalmente sua implementação, exceto se comparado ao fornecimento de energia por uma termelétrica a diesel ou carvão.

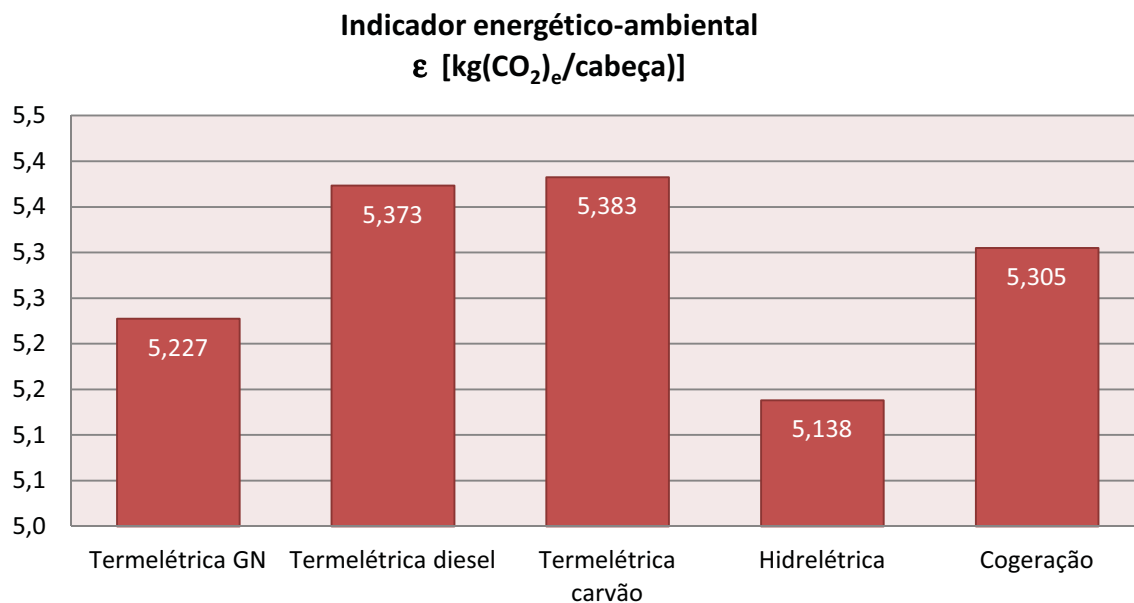


Figura 30 - Gráfico do indicador energético-ambiental para as diferentes fontes de energia elétrica (elaborado pelo próprio autor).

Se todas as medidas de conservação forem implementadas, o indicador energético-ambiental melhora significativamente, o que representa uma redução em média de quase 6% de emissões de (CO₂)_e por cabeça. Vale destacar que as medidas de efficientização reduzem o consumo total de energia de 208 GJ para 190 GJ, que correspondem a uma redução de 9%.

8 CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para análise da eficiência hidro-energética e ambiental de uma indústria. Foram estudadas diversas medidas de eficiência hídrica e energética e analisadas as melhorias advindas com a implementação destas medidas sob o ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Para avaliar a eficiência e a eficácia da implantação das medidas de conservação foi proposto um indicador energético-ambiental dado em função produto do indicador de poluição pelo uso de energia por seu insumo principal.

As medidas de conservação de recursos hídricos constituíram-se de medidas para diminuir as perdas e o desperdício de água e do aproveitamento de fontes alternativas de água. O método *water pinch* foi proposto como ferramenta para implementação do reúso de água e concepção de rede hidráulica otimizada. Também foi realizada uma simulação da cobrança pelo uso da água com a finalidade de avaliar o impacto desta sobre o custo do processo produtivo e sua eficácia como instrumento de racionalização do uso da água.

As medidas de conservação de energia constituíram de medidas de efficientização energética e do aproveitamento de fontes alternativas de energia. Resíduos sólidos e gasosos, como o sebo e o biogás, apresentaram como fontes promissoras para reduzir a dependência de energia elétrica externa e minimizar o impacto no meio ambiente.

O indicador de poluição foi aplicado aos diversos sistemas de uso/geração de energia, sejam estes internos ou externos à planta industrial. A inclusão das emissões dos sistemas de geração externa permite contabilizar as emissões relacionadas à indústria de forma mais ampla. No caso da geração externa foi considerada a demanda de energia elétrica sendo suprida por uma termelétrica ou uma hidrelétrica. No caso das usinas hidrelétricas foi apresentado o equacionamento específico para o cálculo do indicador de poluição, visto que os reservatórios também são responsáveis pela emissão de gases poluentes.

O indicador energético-ambiental juntamente com o indicador de poluição constituíram na principal ferramenta para avaliar o desempenho ambiental de uma indústria, além de auxiliar na tomada de decisão da aplicação de medidas de conservação dos recursos naturais. Adicionalmente, o indicador energético-ambiental permitiu avaliar qual fonte de energia é menos impactante para atender a demanda de energia elétrica da indústria.

Um estudo de caso foi apresentado para a agroindústria de abatedouro e frigorífico em vista de seu insumo básico para a produção de carne ser a água e energia e de sua importância para a economia do país. Inicialmente foi realizada uma auditoria técnica na agroindústria que

permitiu a identificação dos diversos sistemas energéticos e a definição de uma série de medidas de racionalização do uso da água e de energia. Para cada sistema energético da indústria (caldeira, *flare*, termelétrica, hidrelétrica) foi calculado o indicador de poluição, tendo sido verificado que a combustão da lenha na caldeira é o sistema que apresenta o pior indicador de poluição, $\pi_{gCaldeira}$ igual a 0,125 kg(CO₂)_e/MJ. Por outro lado, o indicador de poluição mais favorável é aquele referente ao cenário de oferta de energia de uma usina hidrelétrica, π_g igual a 0,016 kg(CO₂)_e/MJ. Em relação às termelétricas, a que utiliza carvão é a que apresenta pior indicador, π_g igual a 0,123 kg(CO₂)_e/MJ. Estes resultados mostram que o indicador de poluição permite contabilizar as emissões de cada sistema energético, inclusive no caso de uma usina hidrelétrica.

A aplicação das medidas de conservação para redução do desperdício de água, energia e resíduos diminui a vazão da captação de água em 248 m³/d, o que representa uma economia de aproximadamente 19% e a vazão do efluente reduziu em 20%. A economia de energia é devida principalmente à diminuição do tempo de bombeamento corresponde a 5% do consumo diário de energia (424 kWh). A redução das perdas de calor no sistema de produção de vapor diminui em 6.704 MJ o consumo de energia, o que representa cerca de 4% do consumo de energia deste sistema.

Foi realizado um estudo de viabilidade técnica e econômica de implementação de um sistema de coleta de água de chuva. O método aproximado australiano foi utilizado para o dimensionamento do reservatório de acumulação. Verificou-se que esta medida pode proporcionar uma economia de água de cerca de 12 m³/d. Entretanto a implementação deste projeto não é viável economicamente para cenário atual em que não ocorre o tratamento da água para área dos currais e nem há cobrança pelo uso da água.

As possibilidades de reúso da água foram identificadas utilizando o método *water pinch*. Este método permitiu determinar a demanda mínima de água para o sistema industrial e determinar uma rede hidráulica otimizada. Foi verificado que o reúso da água proveniente do setor de utilidades (caldeira, refrigeração e ETA) resulta na economia de água bruta de aproximadamente 6% e reduz o efluente final em 7%.

Em termos totais as medidas de conservação resultaram na diminuição de aproximadamente 25% do volume de água bruta e na economia de 533 kWh/d de energia, cerca de 6% do consumo total de energia. Nesta condição, foram calculados indicadores energético-ambiental considerando o atendimento de energia elétrica sendo feito por usinas termelétricas a gás natural ou a diesel ou a carvão ou por uma hidrelétrica. Os indicadores

calculados mostram que a indústria apresenta melhor desempenho ambiental quando se considera a demanda de energia elétrica sendo atendida por uma hidrelétrica. Nesta condição, o indicador energético-ambiental resultou em ε igual a $5,365 \text{ kg}(\text{CO}_2)_e/\text{cabeça}$.

Outra medida de conservação de energia analisada foi o aproveitamento do biogás. Verificou-se que implementação do motor de combustão interna é a alternativa mais atrativa economicamente, com um *payback* igual a 1,7 anos. A adoção desta medida possibilita o aproveitamento de 10.559 MJ diários de energia da indústria que estavam sendo desperdiçados, que pode atender 32 % da demanda de energia elétrica da indústria. Com a adoção desta medida o indicador energético-ambiental é igual a $5,163 \text{ kg}(\text{CO}_2)_e/\text{cabeça}$ (considerando a usina hidrelétrica como fonte geradora de energia elétrica).

Também foi analisada a possibilidade do emprego de um sistema de cogeração para atender as demandas de energia elétrica e calorífica da agroindústria. A análise de viabilidade econômica indicou um *payback* de aproximadamente cinco anos, valor este considerado atrativo para um empreendimento deste porte. O indicador energético-ambiental mostrou que a implementação deste sistema contribui para a redução das emissões da indústria, quando se compara com os indicadores obtidos considerando a demanda de energia elétrica atendida por uma termelétrica a diesel e a carvão. Entretanto, quando se considera o atendimento sendo feito por uma usina hidrelétrica ou por uma termelétrica a gás natural juntamente com a implementação das medidas de conservação propostas, a cogeração se mostra inviável ambientalmente.

Os resultados apresentados mostraram que o indicador energético-ambiental associado ao indicador de poluição constituiu numa ferramenta importante para auxiliar a tomada de decisão na adoção de medidas de conservação e ainda comprovar a eficiência da metodologia empregada. E que juntamente com a avaliação técnica e economicamente permitiu definir o conjunto de medidas a ser implementado. No caso da agroindústria em estudo se todas as medidas de conservação selecionadas técnica, econômica e ambientalmente forem implementadas, o indicador energético-ambiental melhora significativamente, o que representa uma redução em média de quase 6% de emissões de $(\text{CO}_2)_e$ por cabeça. Vale destacar que as medidas de efficientização reduzem o consumo total de energia de 208 GJ para 190 GJ, que correspondem a uma redução de 9%.

O indicador de poluição proposto para avaliar as emissões provenientes do reservatório de uma hidrelétrica mostrou-se adequado, entretanto, ressalta-se que este indicador pode ser

aprimorado à medida que as variáveis que afetam o processo de conversão de matéria orgânica em metano e dióxido de carbono nos reservatórios das hidrelétricas sejam melhores avaliadas.

Em trabalhos futuros outras medidas de conservação cabíveis para uma indústria de abatedouro podem ser analisadas visto que não foram todas exploradas. Logo, pode-se concluir que maiores economias de energia e água ainda são possíveis, bem como maiores reduções dos resíduos industriais, e principalmente redução da emissão de gases poluentes.

Também pode-se avaliar o emprego de outros combustíveis no sistema de cogeração para verificar qual é o mais adequado ambientalmente. Também é possível verificar através do indicador energético-ambiental qual sistema de aproveitamento de fontes alternativas de abastecimento de água é mais viável do ponto de vista energético.

O indicador energético-ambiental também pode ser aplicado a outras indústrias dos mais diversos setores visto que é uma ferramenta efetiva para o aprimoramento do sistema de gestão ambiental.

E por fim, as medidas exploradas neste trabalho podem ser estendidas para outras indústrias com processos produtivos semelhantes, e desta forma possibilitar a determinação do potencial de conservação no país, o que consiste em importante informação nos estudos de planejamento de recursos hídricos e energéticos.

REFERÊNCIAS

ABIEC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS CARNE. **Brasil lidera ranking de exportação de carne bovina**. Informe técnico, São Paulo, 15 maio, 2009. Disponível em: < http://www.abiec.com.br/news_view.asp?id=%7BCAACE975-B5D1-4337-9F3B-580E7118CB45%7D>. Acesso em: 22 jul. 2010.

AMORIM, S. V.; PEREIRA D. J. A. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 53-66, abr./jun., 2008. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/5359>>. Acesso em 10 mar. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: Sistema de gestão ambiental: especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14031**: Gestão Ambiental – Avaliação de Desempenho Ambiental – Diretrizes. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: Água de chuva: aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis. Rio de Janeiro, 2007.

BARROS, N. et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. **Nature Geoscience**, London v. 4, n. 2, p. 593–596, aug. 2011. Disponível em: <<http://www.nature.com/ngeo/journal/v4/n9/full/ngeo1211.html>>. Acesso em: 8 dez. 2011.

BEARD, L. M., et al. Key technical challenges for the electric power industry and climate change. **IEEE Xplore**: Transactions On Energy Conversion, New York, 25, n. 2, jun. 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5353612&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5353612>. Acesso em: 8 dez. 2011.

BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia**: um estudo de caso em abatedouro de bovinos. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Processos) - Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Processos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Disponível em <http://w3.ufsm.br/ppgepro/dissertacoes/Gabrieli_Irrigaray_Bohrz.pdf>. Acesso em 22 nov. 2011.

BORGES, E. S., M.; GODINHO, V. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Balanço energético referente ao biogás gerado em reatores UASB objetivando avaliar a higienização térmica

auto-sustentável do lodo anaeróbico excedente - II-202. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, n. 23. 2005. Campo Grande. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABES. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-202.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2011

BRAGA, P. F. et al. Pacto Federativo e Gestão das Águas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63. 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200003>. Acesso em: 18 jun. 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: Informe 2011. Brasília: ANA, 2011. p. 112. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/>>. Acesso em 03 fev. 2012.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA - **Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas** – PRODES. Disponível em <http://www.ana.gov.br/prodes/>> Acesso em 12 set. 2010

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BICOMBUSTÍVEIS - ANP. Superintendência de refino e processamento de gás natural – SRP. **Boletim mensal de biodiesel**. Julho de 2010. Disponível em <http://www.anp.gov.br/?pg=59453&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1332349455398>> Acesso em: 6 set. 2011.

BRASIL. Decreto nº 1.255, de 25 de junho de 1962. Altera o decreto nº 30.691, de 29 de 1952 que aprovou o regulamento de inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 4 jul. 1963.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 09 jan. 1997, p. 470.

BRASIL. Lei nº. 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 out. 2001, p. 1.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009a. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 dez. 2009, p. 109.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010, p. 2.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. **Balança Comercial do Agronegócio 2007**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 18 mar. 2011.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. **Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**. 2011a. Disponível em: < <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em 2 jun. 2011.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa relatórios de referência emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia – COPPE. 2006. Disponível em <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8855.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2011.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento. Programa de Modernização do Setor Saneamento - PMSS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos (2007)**. Brasília: MCIDADES. SSNSA, 2009b. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 28 mar. 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de eficiência energética 2010/2030**. Brasília: MME, 2011b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: 02 fev. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MME. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 mai. 2011c, n.92, p. 89.

BROUCKAERT, C. J.; BUCKLEY, C. A. Water pinch analysis: a strategic tool for water management in the food processing industry. In: WATER RE-USE SYMPOSIUM, 1, 2000, Durban. **Proceedings...** Durban: University of Natal, 2000. Disponível em: <[http://www.ce.siu.edu/589/notes/T7%20Water re-use Water Pinch.pdf](http://www.ce.siu.edu/589/notes/T7%20Water%20re-use%20Water%20Pinch.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2011.

CAIT - CLIMATE ANALYSIS INDICATORS TOOL. Version 9.0. Washington, DC: World Resources Institute - WRI, 2012. Disponível em: <<http://cait.wri.org/cait.php?page=sectors>>. Acesso em: 23 mar. 2012.

CANADA. Energy Technology Centre of Natural Resources Canada - CANMET. **Pinch analysis: for the efficient use of the energy, water e hydrogen**. Catalogue #M39-96-2003E. 2003. Disponível em <<http://cetc-varennnes.nrcan.gc.ca>>. Acesso em: 02 out. 2011.

CÁRDENAS, O. **Estudo comparativo da combustão de sebo bovino e diesel em fornalha calorimétrica flamotubular**. 2011. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-07072011-172456/pt-br.php>>. Acesso em: 02 fev. 2011.

CARDU, M.; BAICA, M. Regarding a global methodology to estimative the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 40, n.1, p. 71-87. 1999a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000387>>. Acesso em: 12 abr. 2010.

CARDU, M.; BAICA, M., Regarding a new variant methodology to estimative globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 40, n.14, p. 1569-60. 1999b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499000412>>. Acesso em 12 Abr. 2010.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Deliberação Normativa DN 65**. 2006.

CNUMAD - CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Agenda 21**. 3.ed. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições, 2001. 598 p.

COELHO, S. T., et. al.. Projeto, instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. In: CONGRESSO DE BRASILEIRO DE ENERGIA – CBE, 21, 2006. Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: COPPE, 2006. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/7_purefa.pdf>. Acesso em 29 abr. 2010.

CONTINI, et. al. **Revista de política agrícola**. Brasília: Secretaria de Política Agrícola do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Ano XV, n. 1. p. 7-28. Jan./Fev./Mar. 2006. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/35c89813e27f49020da5b45dafbb50d6..pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

COOPER D. C.; SEHLKE G. Sustainability and energy development: influences of greenhouse gas emission reduction options on water use in energy production environ. **Environ. Sci. Technol.**, Eastons, v. 46, n.6, p. 3509–3518. 2012. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es201901p>>. Acesso em: 2 fev. 2012.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir da produção e biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissemtacoes/costa.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2010.

EECA - ENERGY EFFICIENCY AND CONSERVATION AUTHORITY. **Energy efficient technology**, Verkerks: converting boiler to burn tallow means savings (Case study), mar. 2009a. Disponível em <<http://www.eeca.govt.nz/node/1408>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

EECA - ENERGY EFFICIENCY AND CONSERVATION AUTHORITY. **Energy efficient technology**: Heat recovery system pays off (Case study), mar. 2009b. Disponível em <<http://www.eeca.govt.nz/node/1418>>. Acesso em: 09 nov. 2011.

EL-HALWAGI, M. M.; MANOUSIOUTHAKIS, V. Synthesis of mass-exchange networks. **AIChE Journal**, v. 35, n. 8, p. 1233-1244. 1989. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690350802/pdf>>. Acesso em: 2 maio 2010.

EMPRESA DE CONSULTORIA AMBIENTAL - ECA. **Tabela fatores de emissão**. Disponível em: <<http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos.asp?pagina=4>>. Acesso em: 28 maio 2010.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions**. Draft Technical Report. EPA 420-P-02-001 Oct. 2002. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/models/analysis/biodsl/p02001.pdf>>. Acesso em 09 nov. 2011.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Making every drop count FAO heads UN water initiative**. 14 Feb. 2007. Disponível em: <<http://www.fao.org/newsroom/en/news/2007/1000494/index.html>>. Acesso em 23 mar. 2010.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. O balanço de carbono nos reservatórios de Furnas. 2012. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/projetofurnas/>>. Acesso em 30 fev. 2012.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. 2 ed. rev. São Paulo: Edusp, 2003. 226 p.

GOMES, P. R. **Indicadores Ambientais de desempenho na discussão da sustentabilidade: uma proposta de análise estratégica no contexto do etanol da cana de açúcar no estado de São Paulo**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Engenharia de São Carlos, Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-25042011-094123/pt-br.php>>. Acesso em: 3 fev. 2012.

HADDAD, J. et. al. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: Editora da EFEI, 2001. 467 p.

HAMMONS, T. J. Greenhouse gas emissions from power generation in Europe. In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE - UPEC, 39, 2004, Bristol. **Conference Proceedings....** Bristol: IEEE, 2005. v.1 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?reload=true&punumber=9986>>. Acesso em: 3 fev. 2012.

HUANG H.-F.; LO S.-L. Review and classify the GHGs-related indicators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 594-602. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002030>>. Acesso em: 08 dez. 2011.

LABORATORIE DE RECHERCHE EM DIVERSIFICATION ÉNERGÉTIQUE – CANMET - LRDEC. Reduction de la consommation d'eau des procédés industriels en utilisant l'intégration des procédés. In : CONFÉRENCE ANNUELLE DE L'ASSOCIATION QUÉBÉCOISE DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE.1999. Disponível em: <<http://cetc-varenn.es.nrcan.gc.ca/>>. Acesso em 23 jun. 2010.

LIU L. et. al. Unexpected CH₄ emission from the three gorges reservoir and its implications. **Acta Ecologica Sinica**, v. 31, n. 5, p. 233–234, oct. 2011, Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872203211000357>>. Acesso em 12 dez. 2011.

LORA, E. E. S.; SALOMON, K. R. Estimate of ecological efficiency for thermal power plants in Brazil. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 46, n. 7–8, p. 1293–1303, may. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890404001670>> Acesso em 19 Jul. 2010.

MÄKINEN, K.; KHAN, S. Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs. **Water Alternatives**, France, v. 3 n.2. p. 91-105. 2010. Disponível em http://researchoutput.csu.edu.au/R/?func=dbin-jump-full&object_id=25320&local_base=GEN01-CSU01> Acesso em 12 jan. 2012

MELO, D. A. **Gestão Ambiental**: indicadores de desempenho ambiental: um estudo sobre a utilização dos indicadores nos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) em empresas catarinenses certificadas pela NBR ISO 14001. 2006. 200 f. Dissertação (Mestre em Administração) - Universidade do Vale do Itajaí, Biguaçu, 2006. Disponível em: <http://en.scientificcommons.org/21471813>> Acesso em: 20 mar. 2011.

METZ, B. et al. (Eds.). **Climate change 2007: mitigation of climate change**. New York: Cambridge University Press, 2007. Disponível em http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html. Acesso em 03 mar. 2011.

MOLDAN, B.; JANOUŠKOVÁ, S.; HÁK, T. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. **Ecological Indicators**, v. 17, p. 4-13, jun. 2012. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X11001282>>. Acesso em: 9 jan. 2012.

OLESEN, S. G.; POLLEY G. A simple methodology for the design of water network handling single contaminants. **Chemical Engineering Research and Design**, Emsford, v. 75, n. 4, p. 420-426, may. 1997. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876297715466>>. Acesso em 20 mai. 2010

PACHECO, J. W.; YAMANAKA, H. T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno)** - Série P + L. São Paulo: CETESB, 2006. 98 p. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/documentos/abate.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2010.

PAGAN, R, RENOUF M.; PRASAD, P. **Eco-efficiency manual for meat processing**. Australia: Meat and Livestock, 2002. Disponível em: <http://infohouse.p2ric.org/ref/22/21981.pdf>> Acesso em: 20 mar. 2010.

PARLAMENTO EUROPEU. Conselho da União Européia. Directiva 2000/60/CE, de 23 de Outubro de 2000. Estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da água. **Jornal Oficial das Comunidades Europeias**, Luxemburgo, p. 01 – 73. 2000. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:pt:HTML>>. Acesso em: 12 nov. 2011.

PESSÔA, C. A.; JORDÃO, E P. **Tratamento de esgotos domésticos: concepções clássicas** de tratamento de esgotos domésticos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. v. 1. 683 p.

PINI - Serviços de engenharia. **Preço do metro cúbico de estrutura de concreto armado** Disponível em: <http://www.sistrut.com.br/Profissionais/thm_PINI.html> Acesso em 21 jun. 2010.

PRIETO, M. G. S. **Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira**, estudo de caso. 2003. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Prieto_Mario_Gabriel_Sanchez.PDF>. Acesso em: 30 out. 2010.

SALGADO, V. G. **Proposta de indicadores de ecoeficiência para o transporte de gás Natural**. 2004. 248 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/vgullo.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2010.

SANTOS, M. A. et. al. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. **O ecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 1, 2008. p. 116-129, 2008. Disponível em: <<http://www.oecologiaaustralis.org/ojs/index.php/oa/article/view/88>>. Acesso em 20 mar. 2010.

SANTOS, M. F. L. Sistema de aproveitamento de águas pluviais para usos não potáveis. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 147, jun. 2009a. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/133/artigo77982-6.asp>>. Acesso em: 2 jun. 2010.

SANTOS, M. G. **Análise da sustentabilidade nas indústrias frigoríficas exportadoras de carne bovina do estado de Mato Grosso do Sul**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009b. Disponível em: <<https://sistemas.ufms.br/sigpos/portal/trabalhos/buscarPorCurso/page:2/cursoId:61>>. Acesso em: 18 nov. 2011.

SAUTCHÚK, C. A. et al. **Conservação e reúso de água: manual de orientações para o setor industrial**. São Paulo: Fiesp/Ciesp, 2005. v. 1, 92 p. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/reuso.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2010.

SBRISIA R. C. **Emissão de gases de efeito estufa de reservatórios de pequenas centrais hidrelétricas: estudo de caso PCH Salto Natal, Campo Mourão – Paraná**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em:

<http://www.ppgerha.ufpr.br/dissertacoes/files/148-Rita_Christianne_Sbrissia.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2011.

SENA, R. F. S. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=151646>. Acesso em: 1 dez. 2011.

SENAI - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Princípios básicos de produção mais limpa em matadouros frigoríficos**. Porto Alegre: Centro Nacional de Tecnologias Limpas, SENAI, 2003. 59p. (Manuais de Produção mais limpa). Disponível em: <http://wwwapp.sistemafiergs.org.br/portal/page/portal/sfiergs_senai_uos/senairs_uo697/proximos_cursos/Princ%EDpios%20B%E1sicos%20de%20PmaisL%20em%20Matadouros%20Frigor%EDficos.pdf>. Acesso em: 23 Ago. 2010.

SIITONEN S.; TUOMAALA M.; AHTILA P. Variables affecting energy efficiency and CO₂ emissions in the steel industry. **Energy Policy**, v. 38, n. 5, Greater China Energy: Special Section with regular papers, p. 2477–2485, may. 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509009987>. Acesso em: 9 Jan. 2012.

SILVEIRA, J. L. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário**. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas. 1994.

SILVEIRA, J. L.; CARVALHO JUNIOR, J. A; VILLELA, I. A. C. Combined cycle versus thousand diesel power plants: pollutant emissions, ecological efficiency and economics analysis. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 11, n.3 p. 524-535, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000432>>. Acesso em: 23 ago. 10.

SOUMIS, N et. al. Hydroelectric reservoirs as anthropogenic sources of greenhouse gases. In: LEHR, J. (Ed.). **Water Encyclopedia**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2005. p. 203-210. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/047147844X.sw791/abstract>>. Acesso: em 09 dez. 2011.

TAINSH, R.A.; RUDMAN A. R. R. Practical techniques and methods to develop an efficient water management strategy. In: IQCP CONFERENCE: water recycling and effluent re-use, 1999. Disponível em: <http://dev-kbcat.contentactive.com/default/documents/technical%20papers/IQPC_Water_Paper.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2010.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis**. São Paulo: Navegar Editora, 2003.

TUNA, C. E. **Um método de análise exergoeconômica para otimização de sistemas energéticos**. 1999. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

UNESCO - UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UN Water). **Water in a changing world**. 2009. Disponível em: <<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/tableofcontents.shtml>> Acesso em: 08 set. 2011.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. Protocolo de Quioto, Versão Traduzida pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, Brasília. Disponível em < <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/28739.html>>. Acesso em: 01 de nov. de 2011.

UNFCCC - UNITED NATION FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources**. ACM0002 / Version 12.2.0 Sectoral Scope: 01. EB 65. 2006. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/C505BVV9P8VSNNV3LTK1BP3OR24Y5L/view.html>> Acesso em 18 nov. 2011.

VERONEZ, F. A.; GONÇALVES, R. F. Produção de biogás em um reator UASB tratando esgoto sanitário e lodo de descarte de biofiltros aerados submersos - II-063. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6, 2002, Vitória. **Anais...** 2002. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/sicuat.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2010.

VILLELA, I. A. C.; SILVEIRA, J. L. Ecological efficiency in thermoelectric power plants. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 840-847, apr. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431106003279>>. Acesso em: 13 Mai. 2010.

von SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005. v. 1. 456 p.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimization. **Chemical Engineering Science**. New York, v. 49, n. 7, p. 981-1006. 1994.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Time pinch analysis. **Chemical Engineering Research & Design**, Emsford Trans. IChemE, v. 73, n.8, p. 905-914. 1995. Disponível em: <<http://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=51691>>. Acesso em: 18 jun. 2010.

WEBER, C. C.; CYBIS, L. F.; BEAL, L. L. Reúso da água como ferramenta de revitalização de uma estação de tratamento de efluentes. **Revista de Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 119-128. abr/jun. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n2/a04v15n2.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2011.

WESTNER, G.; MADLENER R. **Development of cogeneration in germany**: a dynamic portfolio analysis based on the new regulatory framework. FCM Working paper n. 4/2009 nov. 2009. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=1620490>>. Acesso em 02 fev. 2012.

WYLEN, V. **Fundamentos da termodinâmica**. 6 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003. 577p.

ZBONTAR, L; GLAVIC P. Total site: wastewater minimization. Wastewater reuse and regeneration reuse. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 30, p. 261–275, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344900000641>>. Acesso em 09 mai. 2010.

ZUCCHI, J. D. **Modelo locacional dinâmico para a cadeia agroindustrial da carne bovina brasileira**. 2010. 201f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. Disponível em: <<http://log.esalq.usp.br/home/uploadfiles/arquivo3607.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2011

ANEXO A - Descrição do processo industrial de abate

Apresenta-se no Quadro 4 as descrições gerais das principais etapas do processo industrial de abatedouro e frigorífico.

Quadro 4 – Descrição do processo de abate bovino

Processo	Descrição
Recepção	Inicialmente os animais são recebidos em currais, onde há um descanso de 24 horas antes do abate. Nesse período eles não recebem alimentação, apenas água. Eventualmente há um banho de aspersão sobre os animais para auxiliar no processo “anti-stress” e de pré-lavagem do couro. É realizada uma limpeza seca dos currais de recepção removendo-se o esterco e outras sujidades, separando-os para disposição adequada, e posteriormente é feita uma lavagem com água e se necessário adiciona-se um produto sanitizante. Os despejos líquidos são decorrentes das lavagens de pisos e os resíduos sólidos das fezes dos animais são conduzidos para a ETE. Os caminhões transportadores são encaminhados para o lavador e os efluentes desta lavagem são encaminhados a estação de tratamento.
Lavagem de animais	Antes de serem abatidos, os animais são conduzidos em pequenos grupos para a seringa onde recebem um banho de água clorada por meio de aspersores ou <i>sprays</i>. Os efluentes são provenientes do banho do animal e limpeza de pisos.
Abate	O animal é posicionado em boxe especial, onde é efetuado o atordoamento com pistola pneumática. Em seguida o animal é guinchado pelas patas traseiras ao transportador aéreo (nória), e através de sistemas mecanizados é transferido para as demais fases do abate.
Sangria	O animal atordoado chega de cabeça para baixo à calha de sangria, e tem a sua cabeça posicionada na calha de coleta de “vômitos”. O sangue é coletado de forma independente do “vômito”, 15 a 20 litros por animal, sendo transferido para o coagulador onde se tem a separação do plasma da parte vermelha. O plasma é juntado aos despejos líquidos e a parte vermelha é encaminhada para coagulação e posteriormente para compostagem ou desidratação. O sangue também pode ser encaminhado in natura para indústrias de beneficiamento para produção de albumina, fribina e plasma. E ainda, o sangue pode ser processado no abatedouro ou por terceiros para obtenção de farinha de sangue. Utiliza-se água para limpeza da canaleta de sangria e água quente para esterilização dos utensílios e os efluentes gerados são consequências destas ações.

Continua

Remoção do Couro	Antes da remoção do couro tem-se a retirada dos chifres e das unhas. O couro é removido através do rolete (cilindro horizontal mecanizado). O
------------------	--

Processo	Descrição
	couro é conduzido por gravidade através de tubulações denominadas “chutes”, para a secção de descarte e salga e/ou encaminhado para curtumes.
Decapitação	A cabeça é separada do corpo do animal e conduzida pela nória ao lavador de cabeças onde é limpa com água e removidos os miolos, língua, carnes e ossos e encaminhados à secção de miúdos para a devida preparação antes da expedição.
Remoção das Visceras	As carcaças dos animais são abertas manualmente com facas e com serra elétrica para a remoção de todas as vísceras do animal. Os intestinos são conduzidos para a Triparia, onde se faz o esvaziamento, lavagem, remoção de gorduras e da mucosa. Em seguida são classificados, salgados e expedidos. Os subprodutos gerados, principalmente gorduras, são encaminhados para a Graxaria. Os estômagos são tratados na Bucharia, onde são esvaziados e limpos. No processo úmido os buchos são lavados em água corrente ou recirculada. Já no processo seco a remoção do conteúdo interno do bucho é quase toda realizada sem a utilização de água. Em seguida, a seguir são fervidos, dessebados, lavados, embalados e congelados.
Limpeza e Lavagem de Carcaças	Após a completa evisceração, a carcaça bovina é dividida com auxílio de serras elétricas em meias carcaças e submetida à inspeção detalhada, pesagem, e lavagem com água pressurizada. Em seguida são encaminhadas às câmaras de resfriamento. Após cada animal as serras são limpas com um “spray” de água.
Resfriamento	As meias carcaças são submetidas ao resfriamento mínimo de 24 horas, em temperaturas entre 0 e 4°C com objetivo de minimizar o crescimento microbiano. Em seguida são levadas à secção de corte onde são divididas em três partes, a saber: Quarto traseiro, Quarto dianteiro e Costelas. Essas partes são encaminhadas para câmaras frias (0°C) e posteriormente seguem para o mercado consumidor ou para desossa.
Desossa	Os quartos bovinos destinados a desossa são separados com auxílio de facas em cortes especiais (alcatra, filet mignon, paleta, acém, maminha, picanha, etc) dos quais são removidos gorduras e pelancas, quando então são embalados em polietileno e dispostos em caixas de papelão e conduzidos ao túnel de congelamento e às câmaras de estocagem, e daí ao mercado consumidor. As aparas resultantes desta operação podem ser aproveitadas na produção de derivados de carne. As partes não comestíveis e os ossos e são encaminhados às graxarias, para serem transformados em sebo ou gordura animal industrial e farinhas para rações.
Produção de farinha	Todos os ossos, gorduras, vísceras, pelancas e outros rejeitos similares são encaminhados ao triturador quando são finamente moídos todos os subprodutos antes do cozimento no digestor. O digestor é carregado por intermédios de chutes, transportadores diversos, e por compressão (ar comprimido). O emprego do sistema pneumático <i>Blow tank</i> para compressão dos resíduos triturados diminui os riscos de contaminação.
Produção de farinha	O digestor é alimentado por vapor e o cozimento se processa a pressão de 4 a 5 atm e temperatura de 120°C. O tempo de cozimento varia entre 2 e 3

Continua

Processo	Descrição
	horas em função da pressão. Durante a operação deve-se verificar o funcionamento do condensador, cuja purga deve ser controlada. O descarregamento do digestor se dá pela inversão da chave elétrica do motor, assim obtém-se o movimento do mexedor em sentido contrário e a descarga mecânica do material para dentro do percolador. O percolador é mantido quente de forma a propiciar a separação da gordura da parte sólida. A parcela líquida, ainda quente sofre uma clarificação, seguida de filtração em filtros prensa. A gordura é encaminhada para o depósito. A parcela sólida resultante do cozimento é a farinha de carne e ossos propriamente dita, esta ainda é prensado em prensa hidráulica ou centrifugados para eliminar a gordura restante. Por ultimo, há uma operação de moagem, seguida de ensacamento e encaminhamento para o armazenamento antes de sua expedição ao mercado consumidor.

ANEXO B - Características dos equipamentos do sistema de recalque de água

Apresenta-se no Quadro 5, 6 e 7 as descrições gerais das estações elevatórias da agroindústria.

Quadro 5 – Dados do conjunto elevatório de água bruta

Sistema	Variáveis	Quantidade	Unidade
Motor	Potência	25	CV
Bomba, Fabricante/Modelo	Vazão	50	m³/h
KSB 50/20	Altura Manométrica	60	mca
Ano de Fabricação:1977	Rotação	3500	rpm
OP 145264			

Quadro 6 – Dados do conjunto elevatório de água tratada

Sistema	Variáveis	Quantidade	Unidade
Motor Fabricante Búfalo	Potência	25	CV
Carcaça	Tensão	220/380	V
T 254T	Corrente	51/29,5	A
Cat. B	Rotação	3510	rpm
Nº de Série: A1861 33	Temperatura	80	°C
Bomba Fabricante/Modelo	Não possui placa de		
IMBIL 50/200	identificação.		

Quadro 7 – Dado de tubos, peças e conexões existentes

Sistema	Variáveis	Quantidade	Unidade
Sucção (aço)	DE	145	mm
	DN	132	mm
	Curva de aço soldada 90°	2	un
	Tê de aço soldado	2	un
	Válvula de Gaveta f°f° flangeada DN 5"	2	un
	Redução de aço flangeada	5 x 3	polegadas
Recalque (aço)	DE	116	mm
	DN	104	mm
	Curva de aço soldada 90°	5	un
	Tê de aço soldado	1	un
	Válvula de retenção portinhola única 4"	1	un
	Válvula de gaveta f°f° flangeada DN 4"	2	un
	Redução de aço flangeada	4" x 2"	polegadas

ANEXO C - Método prático australiano

O método aproximado australiano é empregado para determinação do volume do reservatório de água de chuva. O primeiro passo deste método consiste no cálculo do volume de chuva coletado, V_{ch} (em m^3), dado pela equação (28):

$$V_{ch} = A_c \cdot C \cdot (P_m - I_{Inf}) \quad (28)$$

Onde A_c é a área de coleta (em m^2), C é o coeficiente de escoamento superficial, P_m é a precipitação média mensal (em mm), e I_{Inf} é a interceptação da água que molha as superfícies e perdas por evaporação, para o qual se adota o valor de $2mm$ se não houver disponível valores medidos.

O cálculo do volume do reservatório (equação 29) é determinado de forma recursiva, através da expressão:

$$V_{R_t} = V_{R_{t-1}} + V_{Ch_t} - D_t \quad (29)$$

Onde V_{R_t} é o volume de água que está no reservatório no fim do mês t , $V_{R_{t-1}}$ é o volume de água que está no reservatório no início do mês t , V_{Ch_t} é o volume mensal produzido pela chuva no mês t , e D_t é a demanda mensal. O processo iterativo é inicializado considerando um dado valor de volume do reservatório, os valores de volume esperado de chuva para cada mês t , os valores de demanda de água, e volume nulo de reservatório no primeiro mês. Ao final de cada de iteração, calcula-se o nível de confiabilidade através da relação entre número de meses em que a demanda não foi atendida e o número total de meses do ano. O processo é considerado convergido quando o volume de reservatório resulta em um valor de confiança maior ou igual ao nível desejado. Em geral, recomendam-se valores de confiança entre 90% e 99%.

ANEXO D - Dimensionamento da Cogeração

Um ciclo de cogeração com emprego de turbinas a vapor de contrapressão é ilustrado na Figura 31.

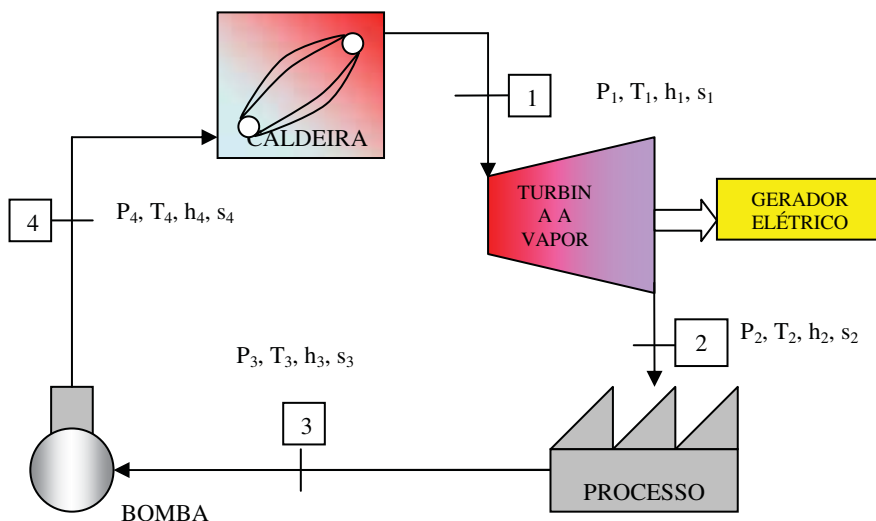


Figura 31 - Ciclo de cogeração com turbina a vapor de contrapressão (elaborado pelo próprio autor).

Da teoria da termodinâmica, é descrita a seguir de forma sucinta, a sequência de equações que permite dimensionar um sistema de cogeração. Inicialmente, determina-se o trabalho no eixo da turbina W_{eixo} através da equação (30):

$$W_{eixo} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \quad (30)$$

Onde $\dot{m}$ é vazão mássica e h_1 e h_2 são as entalpias nos pontos 1 e 2, respectivamente. Por sua vez, a potência elétrica produzida (P_{el}) e a energia térmica fornecida ao processo (E_{CV}) são calculadas pelas equações:

$$P_{el} = \eta_{GERADOR} \cdot W_{EIXO} \quad (31)$$

$$E_{CV} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (32)$$

O trabalho realizado pela bomba (W_{BOMBA}) é calculado por:

$$W_{BOMBA} = \dot{m} \cdot \frac{(h_4 - h_3)}{\eta_{bomba}} \quad (33)$$

O calor fornecido para água na caldeira (E_V) e a energia suprida pelo combustível (E_{COMB}) podem ser calculados pelas equações:

$$E_V = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (34)$$

$$E_{COMB} = \frac{E_V}{\eta_{CAL}} \quad (35)$$

Finalmente, a massa de combustível (m_{comb}) pode ser calculada pela relação entre a energia suprida pelo combustível e o poder calorífico inferior do mesmo (PCI):

$$m_{COMB} = \frac{E_{COMB}}{PCI} \quad (36)$$

Para avaliar a adequação do dimensionamento definido pelas equações anteriores, calculam-se as eficiências elétrica (η_{EL}), térmica (η_T) e global (η_G) do sistema de cogeração através das seguintes equações:

$$\eta_{El} = \frac{E_P - W_{bomba}}{E_{COMB}} \quad (37)$$

$$\eta_T = \frac{E_{CV}}{E_{COMB}} \quad (38)$$

$$\eta_G = \frac{W_{EIXO+} E_{CV}}{E_{COMB}} \quad (39)$$

Após o dimensionamento técnico, determinam-se os custos de cada equipamento para realização dos estudos de viabilidade econômica. No caso de não haver disponíveis os custos de aquisições de caldeiras ($CCAL$), turbinas a vapor de condensação (C_{TV}) e bombas (C_B), estes podem ser calculados pelas seguintes equações (FRANGOPOULOS, 1992; LAZZARRETTO e MACOR, 1995 apud TUNA, 1999):

$$C_{CAL} = 784 \cdot E_{COMB}^{0.8} \cdot \left[1 + \left(\frac{1 - 0.90}{1 - \alpha} \right)^7 \right] \cdot \left[1 + 5 \cdot \exp\left(\frac{T_{SAIDA} - 866}{10.42} \right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{P_{SAIDA} - 28}{150} \right) \right] \quad (40)$$

$$C_{TV} = 7.490 \cdot E_p^{0,7} \left[1 + \left(\frac{1-0,95}{1-\eta_{TV}} \right)^3 \right] \left[1 + 5 \cdot \exp \left(\frac{T_{entrada} - 886}{10,42} \right) \right] \quad (41)$$

$$C_B = 3540 \cdot \dot{W}_{Bomba}^{0,71} \cdot \left[1 + \left(\frac{1-0,80}{1-\eta_{bomba}} \right)^3 \right] \cdot 1,41 \quad (42)$$

Onde T_{SAIDA} E P_{SAIDA} são a temperatura e pressão de saída, respectivamente, $T_{ENTRADA}$ e $P_{ENTRADA}$ são a temperatura e pressão de entrada, respectivamente. O custo de manutenção da planta de cogeração (C_M) é dado pela soma dos custos de manutenção da caldeira, da turbina e da bomba, os quais, segundo Tuna (1999), podem ser calculados como sendo aproximadamente 3% dos seus correspondentes custos de implementação.

O custo de operação da planta de cogeração (C_{OP}) é função do número de pessoas encarregadas pela operação e seus correspondentes salários. O custo de investimento (I_{PL}) é dado pela soma dos custos dos componentes principais do sistema acrescidos de 30% para contabilizar os custos de transporte, seguro, administração de obras, projetos de engenharia etc, Silveira (1994). Nesta mesma referência, os custos da eletricidade (C_{EL}) e do vapor (C_v) produzidos pelo sistema de cogeração são definidos através das seguintes equações:

$$C_{EL} = \frac{[I_{PL} \cdot f]}{Nh \cdot E_p} \cdot F_{EP} + \frac{C_{COMB} \cdot \left(E_{COMB} - E_{CV} - \frac{Perda}{2} \right)}{E_p} + \frac{C_M \cdot F_{EP}}{E_p} + \frac{C_{OP} \cdot F_{EP}}{E_p} \quad (43)$$

$$C_v = \frac{[I_{PL} \cdot f]}{Nh \cdot E_{CV}} \cdot F_{EC} + \frac{C_{COMB} \cdot \left(E_{CV} + \frac{Perda}{2} \right)}{E_{CV}} + \frac{C_M \cdot F_{EC}}{E_{CV}} + \frac{C_{OP} \cdot F_{EC}}{E_{CV}} \quad (44)$$

Onde:

$$f = \frac{[q^{PB} \cdot (q-1)]}{(q^k - 1)} \quad (45)$$

$$q = 1 + \frac{tx}{100} \quad (46)$$

$$F_{EP} = \frac{P_{El}}{P_{El} + E_{CV}} \quad (47)$$

$$F_{EC} = \frac{E_{CV}}{P_{El} + E_{CV}} \quad (48)$$

$$Perda = E_{COMB} - P_{El} - E_{CV} \quad (49)$$

Onde tx é a taxa anual de juros e N_h o número de horas.

Os ganhos que a cogeração pode produzir a uma indústria onde ela seja implementada incluem os ganhos referentes ao que deixa de pagar à concessionária de energia elétrica e as eventuais vendas dos excedentes de energia. Estes ganhos constituem as duas parcelas do lado direito equação (50) a seguir:

$$G_{Pel} = E_r \cdot Nh \cdot (T_{conc.EE} - C_{cog}) + (E_p - E_r) \cdot Nh \cdot (P_{VendaEE} - C_{cog}) \quad (50)$$

Onde E_r é a potência requerida pela indústria, $T_{conv.EE}$ é a tarifa de energia elétrica, $P_{VendaEE}$ é o preço de venda da energia excedente e C_{cog} é o custo de operação e manutenção do sistema de cogeração.

Ganhos na produção de vapor podem ocorrer em função dos melhores rendimentos das máquinas do sistema de cogeração e podem ser calculados pela equação (51):

$$G_{Pv} = E_v \cdot Nh \cdot (C_{VC} - C_v) \quad (51)$$

Onde C_{VC} é o custo de produção de vapor pela máquina convencional.

Se a soma dos ganhos com a produção de energia elétrica e de vapor for negativa significa que os custos associados à planta de cogeração são maiores do que os custos associados aos sistemas convencionais de atendimento (TUNA, 1999).