

Universidade de São Paulo Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DA VINHAÇA
VIA BIOGÁS OU EVAPORAÇÃO SEGUIDA DE INCINERAÇÃO**

Rafael Ramos Gonçalves Passos

Orientador: Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr.

São Paulo
Novembro, 2009

Universidade de São Paulo Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DA VINHAÇA
VIA BIOGÁS OU EVAPORAÇÃO SEGUIDA DE INCINERAÇÃO**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Rafael Ramos Gonçalves Passos

Orientador: Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr.

São Paulo
Novembro, 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Passos, Rafael Ramos Gonçalves

Avaliação energético-econômica da utilização da vinhaça via biogás ou evaporação seguida de incineração / R.R.G. Passos. – São Paulo, 2009.

47 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Geração de energia elétrica (Análise econômica) 2.Vinhaça
3. Biogás 4.Energia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta propostas de reaproveitamento energético da vinhaça, um resíduo da indústria sucro-alcooleira. O estudo é feito a partir da caracterização de indústrias de açúcar e álcool, da vinhaça gerada no processo de destilação alcoólica, dos métodos de digestão anaeróbia da vinhaça e de concentração da vinhaça. O biogás obtido na digestão anaeróbia é sujeito à análise de viabilidade energético-econômica em três sistemas de geração de energia elétrica: motor de combustão interna, turbinas a gás e ciclo Rankine. A vinhaça concentrada é analisada segundo um ciclo Rankine.

Palavras-chave: vinhaça, biodigestão, biogás, energia, análise econômica.

ABSTRACT

This dissertation presents propositions of energetic utilization of vinasse, a substrate of alcohol and sugar plants with the purpose of obtaining a higher energetic efficiency as well as lower environmental impact compared to the present utilization of vinasse. This study characterizes alcohol and sugar plants, vinasse generated in the alcoholic distillation, anaerobic digestion methods and concentrated vinasse. It helps next studies of the energetic use of the biogas (generated in the anaerobic digestion). On one hand biogas is used in internal combustion motors, in gas-turbines, and in a Rankine cycle. On the other hand, concentrated vinasse is used in a Rankine cycle.

Key-words: vinasse, biodigestion, biogas, energy, economic evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de produção de açúcar, álcool e eletricidade (PELLEGRINI, 2009a).....	11
Figura 2 – Vias de utilização da vinhaça como combustível	23
Figura 3 – Ciclo Rankine a biogás	24
Figura 4- Concentração da Vinhaça e Geração de Energia Elétrica.....	25
Figura 5 – VPL e TIR do motor Otto com biogás	30
Figura 6 – VPL e TIR da turbina a gás com biogás	32
Figura 7 – VPL e TIR do ciclo Rankine com queima de biogás.....	34
Figura 8 – VPL e TIR do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada.....	36
Figura 9 – Configurações energéticas para a vinhaça	37
Figura 10 – Investimentos relativos às 4 opções	38
Figura 11 – Custos de O&M anuais relativos às 4 opções.....	38
Figura 12 – VPL dos quatro sistemas em função do preço da eletricidade.....	39
Figura 13 – TIR dos quatro sistemas em função do preço da eletricidade.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização da Usina Iracema (PELLEGRINI, 2003)	16
Tabela 2 - Características físico-químicas da vinhaça – Usina São Martinho	19
Tabela 3 - Parâmetros da planta de biodigestão	22
Tabela 4 - Parâmetros da planta de geração de vapor e de energia elétrica a partir da evaporação e queima da vinhaça	26
Tabela 5 - Demonstração de Resultado do Exercício.....	27
Tabela 6 – Investimento e Custos de O&M do motor Otto com biogás	29
Tabela 7 - Investimento e Custos de O&M da turbina a gás com biogás	31
Tabela 8 - Investimento e Custos de O&M do ciclo Rankine com queima de biogás .	33
Tabela 9 - Investimento e Custos de O&M do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada.....	35

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1.	Introdução.....	10
1.1	Caracterização do Setor Sucro-Alcooleiro	10
1.2	Processo de Fabricação de Açúcar e Álcool.....	11
1.2.1	Sistema de extração	11
1.2.2	Planta de Tratamento do Caldo.....	12
1.2.3	Produção de Açúcar	12
1.2.4	Produção de Álcool.....	13
1.2.5	Sistema de Cogeração	13
1.3	Vinhaça: origem e destino	14
1.4	Caracterização da Usina Iracema	16
2.	Objetivos	17
3.	Metodologia	18
4.	Produção do Biogás a partir da Vinhaça	19
4.1	Digestão Anaeróbia	19
4.2	Produção de Biogás	20
4.3	Tipos de Reatores	21
4.4	Potencial energético de uma planta de biodigestão	22
5.	Geração de energia elétrica a partir da vinhaça.....	23
5.1	Motor Otto a Biogás	23
5.2	Turbina a Gás com biogás	23
5.3	Ciclo Rankine com Biogás	24
5.4	Ciclo Rankine com Vinhaça Concentrada.....	25
6.	Análise de viabilidade econômico-financeira	27
6.1	Análise Econômico-Financeira aplicada ao caso da usina Iracema	28

6.1.1	Indicadores Econômicos	28
6.1.2	A planta de biodigestão.....	28
6.1.3	Caso do motor Otto com biogás	29
6.1.4	Caso da turbina a gás com biogás	31
6.1.5	Caso do ciclo Rankine com queima de biogás	33
6.1.6	Caso do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada	35
7.	Análises	37
7.1	Biodigestão	37
7.2	Conversão de energia.....	37
7.3	Investimentos e Custos de O&M.....	38
7.4	VPL e TIR	39
8.	Conclusão	41
9.	Referências Bibliográficas	42
10.	Apêndice – Memorial de Cálculos	44
11.	Anexo - caracterização da vinhaça em função da sua concentração.....	47

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de formas eficientes e ecologicamente corretas de geração de energia desperta a atenção do mundo. Nesse cenário, vemos a importância de propor melhorias às nossas grandes indústrias. Uma destas é a sucroalcooleira, com destaque para a crescente evolução do mercado de etanol após a criação de programas como o Proálcool e o desenvolvimento dos carros bicombustíveis.

Nesta indústria, novas tecnologias têm sido estudadas em busca de maiores eficiências energéticas. Tais tecnologias são baseadas na melhor utilização da matéria-prima e dos resíduos.

Na indústria sucro-alcooleira, a vinhaça, gerada durante o processo de destilação alcoólica, é um dos resíduos mais importantes. Atualmente é utilizada como fertilizante, porém apresenta inconvenientes de transporte, estocagem e deve ser aplicada controladamente para não se tornar poluente para o solo em questão.

Uma alternativa para este resíduo é sua utilização como insumo energético, transformando-o em biogás ou a partir de sua queima direta após sua concentração. O presente estudo propõe-se a analisar tais alternativas.

A princípio estudam-se as características das usinas de açúcar e álcool, seu modo de produção, e da vinhaça. Em seguida, analisa-se o processo de biodigestão anaeróbia, que produz um biogás. Então, analisam-se quatro diferentes sistemas de conversão de energia, três baseados na combustão do biogás e um, na queima da vinhaça concentrada. Finalmente é feita uma análise de viabilidade econômico-financeira.

1.1 Caracterização do Setor Sucro-Alcooleiro

O setor industrial denominado “sucro-alcooleiro” engloba as unidades que produzem açúcar e álcool (destilarias anexas e usinas) e as que produzem apenas álcool (destilarias autônomas) a partir da cana-de-açúcar. Desde a criação do Proálcool, em 1975, a produção de álcool tem mostrado resultados expressivos. No período de 1975 a 1985 aumentou de 555 600 m³ para 11 818 000 m³ sua produção (CAMARGO, 1990). Na safra de 2006/2007 a produção de álcool foi de 17.050.000 m³ (PORTAL EXAME).

1.2 Processo de Fabricação de Açúcar e Álcool

Segundo Pellegrini (2009a), os principais processos envolvidos numa usina de açúcar e álcool são descritos em cinco sistemas, conforme mostra a Fig. (1):

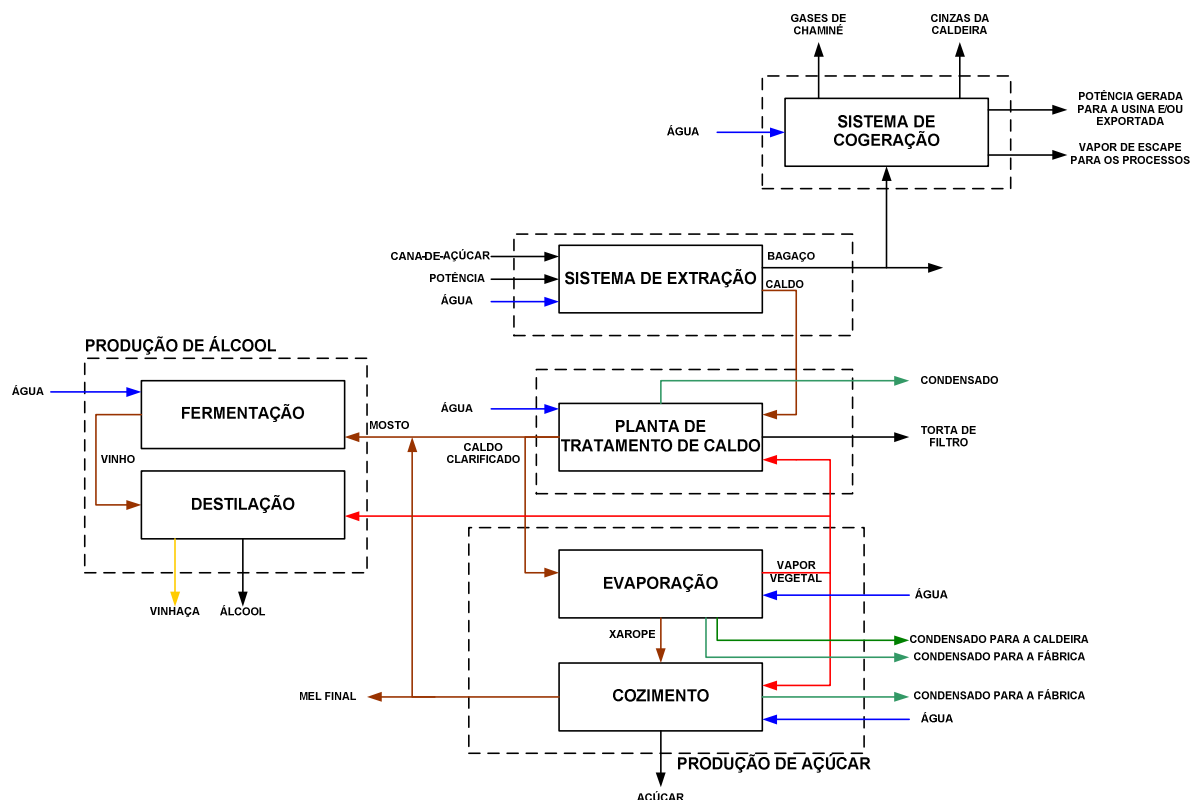


Figura 1 - Processos de produção de açúcar, álcool e eletricidade (PELLEGRINI, 2009a)

1.2.1 Sistema de extração

A cana-de-açúcar, ao chegar na usina, tem amostras retiradas para análises laboratoriais que determinam, entre outros, o teor de sacarose. Então é descarregada numa mesa alimentadora e dirigida ao processo de lavagem, que elimina as impurezas trazidas do campo.

Em seguida, a cana é preparada de modo a facilitar a extração do caldo (água e sólidos dissolvidos) da estrutura celular da cana sem reduzir o tamanho da fibra a ponto de comprometer a alimentação dos ternos da moenda. Este preparo é feito por meio de facas rotativas seguidas de desfibradores, cujos acionamentos são realizados por turbinas a vapor ou por motores elétricos.

Finalmente, realiza-se o processo de extração, que visa recuperar a máxima quantidade de caldo e produzir um bagaço com umidade admissível para ser queimado rapidamente nas caldeiras. Há dois métodos de extração: moagem e difusão, sendo o primeiro o mais comum em usinas brasileiras.

Um tandem de moendas tem de 4 a 7 ternos de moenda, sendo um terno composto de 3 rolos de esmagamento dispostos triangularmente. Para aumentar a extração da sacarose é feita a embebição do bagaço.

A difusão, na qual a cana tem seu caldo deslocado por um fluxo contra-corrente de água, ocorre por duas vias: parte do caldo extrai-se pela lixiviação e outra parte, por troca físico-química devido à pressão osmótica e à difusão celular. Em seguida, o bagaço é enviado a uma prensa para seu deságue, de onde é extraído o caldo de retorno.

1.2.2 Planta de Tratamento do Caldo

Este processo, também chamado de clarificação, visa aumentar o pH, o que reduz as perdas por inversão de sacarose no processos posteriores, e remover material insolúvel assim como substâncias indesejadas.

Inicia-se a clarificação com o peneiramento do caldo misto. Em seguida, é feita a alcalinização, na qual adiciona-se leite de cal ao caldo misto e cuja reação mais importante é a de formação do fosfato de cálcio, composto insolúvel no caldo que se precipita.

O caldo é também aquecido a fim de esterilizá-lo, completar as reações químicas de alcalinização, flocular impurezas insolúveis e remover gases dissolvidos.

Finalmente o caldo segue para o decantador, onde o caldo clarificado é separado do precipitado formado no corpo do caldo. O lodo decantado é enviado para um processo de filtração a vácuo para recuperar o caldo contido. A torta produzida neste processo é utilizada como adubo orgânico.

1.2.3 Produção de Açúcar

Neste processo o caldo clarificado é concentrado para eliminação da água e para produção de cristais de açúcar. A primeira fase é o processo de evaporação, que concentra o caldo com 14 a 17°Brix até uma solução com concentração de 60 a 70°Brix, conhecida como xarope.

No Brasil, usualmente encontra-se o sistema de evaporação de múltiplos-efeitos em correntes paralelas, onde caldo e vapor são injetados no 1º efeito e seguem paralelos até o

último. O vapor gerado neste efeito segue para o 2º efeito. O condensado do vapor de escape retorna à planta de utilidades e o caldo concentrado segue para o próximo efeito.

O xarope extraído é levado a equipamentos denominados cozedores, tachos, entre outros, que atuam sob vácuo e de forma contínua ou a batelada. Nesta fase, a evaporação origina uma mistura de cristais envolvidos numa solução açucarada (mel), chamada massa cozida. Esta massa é enviada a centrífugas, separando os cristais de sacarose da solução. Os cristais são então secados e ensacados. Por outro lado, o mel removido retorna aos tachos até um maior esgotamento daquele. Então, o mel passa a ser chamado de mel final ou melaço e segue para a fabricação de álcool.

1.2.4 Produção de Álcool

Na primeira etapa, é comumente utilizado o processo de fermentação Melle-Boinot. Uma mistura de caldo clarificado e mel final, chamada mosto, é enviada às dornas. O mosto tem grau de concentração entre 16 a 20ºBrix em função da fração de caldo presente.

Nas dornas os açúcares transformam-se em etanol e há formação de gás carbônico que aquece a solução gerando produtos secundários tais como álcoois superiores, glicerol, aldeídos e outros. Portanto é necessário controlar a temperatura no interior das dornas com a instalação de serpentinas de circulação de água.

Após a fermentação, o vinho é centrifugado e recupera-se fermento concentrado, chamado leite de levedura, que retorna às cubas para tratamento. O vinho sem levedura segue para as colunas de destilação.

Na primeira coluna, também chamada coluna A, o vinho é separado em três frações: álcool de segunda (no topo da coluna), vinhaça (produto de fundo) e flegma (água e etanol). Na coluna B, a coluna de retificação, a flegma atinge 96ºGL e também é produzido óleo fúsel, composto de produtos secundários da fermentação.

Este álcool hidratado, para que se torne anidro, deve atravessar um coluna operando com ciclohexano ou em peneiras moleculares.

1.2.5 Sistema de Cogeração

O bagaço no sistema de extração é queimado nas caldeiras, sendo 5% armazenado para reserva técnica para partidas do sistema. Os sistemas frequentemente encontrados no Brasil são baseados em caldeiras de geração de vapor a 21 bar e turbinas de contrapressão

(escape a 2,5 bar). Contudo, há usinas que utilizam vapor a pressões mais elevadas gerando um excedente de eletricidade que é comercializado.

1.3 Vinhaça: origem e destino

A vinhaça é uma suspensão aquosa de sólidos orgânicos e minerais, contendo os componentes do vinho não arrastados na destilação, além de quantidades residuais de açúcar, álcool e compostos voláteis mais pesados (CAMARGO, 1990). Sua composição quantitativa é função da matéria-prima e do tipo de mosto. Em média, seu teor de sólidos é de 7% e destes, 75% são orgânicos e biodegradáveis com alta demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), daí seu caráter poluente¹. Há alguns anos, o destino da vinhaça eram os cursos d'água. Entretanto, este método poluidor está em desuso graças ao surgimento das seguintes alternativas(CAMARGO, 1990):

- ❖ **Fertirrigação:** emprego “in natura” na lavoura dissolvido em água. É necessário determinar as concentrações ótimas em função do tipo de vinhaça e do tipo de solo, evitando assim os impactos negativos. Se lançada em grande quantidade ou diretamente às plantações, pode contaminar lençóis subterrâneos de água. Além deste, podem ocorrer também a salinização e a acidificação do solo, comprometendo a qualidade de plantio, até mesmo para produção de cana-de-açúcar
- ❖ **Concentração da Vinhaça:** concentrada a 60% de sólidos totais pode ser utilizada como fertilizante ou ração animal. Se incinerada, obtem-se geração de vapor e cinzas de potássio. A incineração pode ser feita em combustores(de 50 a 60% de sólidos totais) ou em leito fluidizado (30% de sólidos totais). Os entraves à concentração são devidos a incrustação, a corrosão, a alta viscosidade, ao baixo pH e a alta DBO da água condensada.
- ❖ **Digestão Anaeróbia da Vinhaça:** produção de metano e gás carbônico associada ao tratamento do efluente. Entre os biodigestores de elevada eficiência, o biodigestor de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) obtem destaque. Trabalhos pioneiros em 1981 do IPT demonstram a viabilidade do processo.

¹ O potencial de poluição da vinhaça é avaliado pela sua DQO e pelo seu teor de potássio (PROCKNOR, 2008)

Atualmente, a produção brasileira de etanol, a partir da cana de açúcar, é de cerca de 16 milhões de metros cúbicos por ano, o que corresponderia a uma produção anual de cerca de 30 bilhões de metros cúbicos de biogás (GRANATO; SILVA, 2000).

- ❖ **Fermentação Aeróbia da Vinhaça:** visa à produção de proteína unicelular a ser empregada como complemento de ração animal.

1.4 Caracterização da Usina Iracema

A usina, localizada em Iracemápolis, faz parte da Companhia Industrial e Agrícola Ometto e é filiada à COPERSUCAR. A Tab. (1) permite a caracterização da usina.

Tabela 1 - Caracterização da Usina Iracema (PELLEGRINI, 2003)

Capacidade de moagem	833 t/h
Produção de Açúcar	52 t/h
Produção de Álcool	33 m ³ /h
Quantidade de Vapor	550 kg de vapor/ t de cana
Consumo de Energia	13,3 MW (auto-sustentada)

2. OBJETIVOS

O presente trabalho destina-se a avaliar 4 (quatro) opções de reaproveitamento energético para a vinhaça:

- Uso do biogás em motor de combustão interna;
- Uso do biogás em turbina a gás;
- Uso do biogás em ciclo Rankine;
- Queima da vinhaça concentrada em ciclo Rankine.

Esta avaliação deve fornecer parâmetros para a determinação da viabilidade econômica-financeira das opções.

3. METODOLOGIA

A realização do trabalho pode ser vista em quatro grandes etapas:

1. *Levantamento das características da vinhaça, do biogás e da vinhaça concentrada:*

Esta etapa fornece as características da vinhaça para a determinação das condições de funcionamento do biodigestor. Em seguida, é possível conhecer a composição do biogás. Paralelamente, conhecida a vinhaça, caracterizam-se os produtos obtidos no processo de concentração da vinhaça.

2. *Modelagem de cada uma das quatro alternativas:*

Nesta etapa descrevem-se os modelos para cada alternativa. Os modelos devem permitir a análise quantitativa real.

3. *Análise quantitativa dos modelos:*

Esta análise visa a informar as capacidades de geração elétrica de cada modelo assim como a determinação das respectivas eficiências.

4. *Avaliação econômica:*

Essa avaliação permite a determinação dos parâmetros de tomada de decisão para a escolha da alternativa mais viável.

4. PRODUÇÃO DO BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA

4.1 Digestão Anaeróbia

A biodigestão anaeróbia tem como objetivo reduzir o potencial poluidor da vinhaça e ao mesmo tempo produzir um gás e um fertilizante como resíduo. A biodigestão anaeróbia consiste na fermentação com ausência de oxigênio de resíduos orgânicos através de bactérias anaeróbias que sintetizam a matéria orgânica transformando-a em metano e dióxido de carbono, principais componentes do biogás. A realização e a eficiência da biodigestão dependem de condições específicas de operação, como temperatura e pH do meio, tipo de substrato usado no processo, concentração de sólidos e período de retenção da biomassa no biodigestor, dentre outros (SALOMON;LORA;MONROY; 2007). Na Tab. (2) tem-se um exemplo real da caracterização da vinhaça antes e depois da biodigestão na Usina São Martinho. Procknor (2008) cita que nesta usina processam-se 10% de produção de vinhaça.

Tabela 2 - Características físico-químicas da vinhaça – Usina São Martinho

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DQO (mg/l)	29.000	9.000
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio (mg/l)	1.400	1.400

Em termos gerais, podem ser citados os seguintes benefícios físicos da biodigestão anaeróbia: produção de gás combustível, controle de poluição das águas, controle dos odores, preservação do valor fertilizante do resíduo e remoção ou eliminação dos agentes patogênicos da matéria orgânica (NOGUEIRA,1986).

A quantidade de vinhaça produzida é de aproximadamente 12 vezes a produção de álcool (VAN HAANDEL; CATUNDA, 1994 apud TELH, 2001).

4.2 Produção de Biogás

O biogás é uma mistura de gases, tendo principalmente metano em sua composição. Nogueira (1986) cita que o valor frequentemente usado para o poder calorífico do biogás não tratado é 5500 kcal/m^3 . Entretanto, se o gás é desumidificado e se o dióxido de carbono é removido, por borbulhamento em solução alcalina, seu valor aproxima-se do correspondente ao metano puro, 9000 kcal/m^3 .

Souza; Fuzaro; Polegato, 1991 *apud* Telh, 2001 propõem a composição do biogás sendo 60% de metano, 39% dióxido de carbono e menos de 1% de outros elementos.

A produção de biogás a partir da vinhaça é calculada a partir de um fator de conversão associado a DQO removida da vinhaça (SALOMON; LORA; MONROY, 2007), como visto na Tab (3).

4.3 Tipos de Reatores

Segundo Procknor (2008), os maiores problemas dos reatores dizem respeito a dificuldade de homogeneização do meio (temperatura e pH, principalmente) para que as bactérias encontrem um ambiente ideal para operarem.

Os reatores são divididos em duas grandes classes: bateladas e contínuos. O primeiro opera com a decomposição total de uma carga inserida enquanto o segundo, com inserções e retiradas contínuas de material do reator. Nas indústrias é mais interessante utilizar reatores de fluxo contínuos (caracterizados pela taxa de aplicação – TA – do efluente, em unidade $\text{kgDQO}/\text{m}^3/\text{dia}$), dado o ritmo de produção de vinhaça.

A- Reator anaeróbico de fluxo ascendente em leito de lodos - **UASB** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Nestes reatores utilizam-se bactérias termofílicas operando na temperatura de 56°C e sua TA na faixa de 8 a $10 \text{ kgDQO}/\text{m}^3/\text{dia}$ (PROCKNOR,2008). Estes reatores já são aplicados para tratamentos de águas residuárias industriais (fábricas de papel, cervejarias) e domésticas.

O reator UASB consiste basicamente de um tanque, constituído de um compartimento digestor localizado na base contendo o leito de lodo biológico e no topo está localizado um decantador precedido por um sistema de separação de gás. O afluente a ser tratado distribui-se uniformemente na base do reator, passando pela camada de lodo, através da qual a matéria orgânica é transformada em biogás. O gás produzido é impedido pelos defletores de dirigir-se ao sedimentador, entrando apenas em algumas regiões do reator. A porção de lodo que atinge o decantador é separada, retornando à base do reator e o afluente é uniformemente retirado da superfície do mesmo (SALOMON;LORA;MONROY; 2007).

B- Reatores tipo IC – *Internal Circulation*

Utilizam bactérias mesofílicas, operando com temperaturas de 36°C e sua TA está na faixa de 25 a $30 \text{ kgDQO}/\text{m}^3/\text{dia}$. Nestes reatores, o próprio gás circula no interior para homogeneizar o meio. Tais reatores são utilizados tipicamente em cervejarias para fins de controle de poluição (PROCKNOR, 2008).

C – Lagoas Anaeróbias.

Tais reatores ocupam grandes volumes operando com TA na faixa de 2 a $3 \text{ kgDQO}/\text{m}^3/\text{dia}$. Além da baixa conversão, é difícil homogeneizar o meio, contribuindo para a baixa taxa de aplicação.

4.4 Potencial energético de uma planta de biodigestão

A partir da produção de álcool da usina, é possível estimar a produção de vinhaça e, por conseguinte, a de biogás gerado em reatores UASB. A quantidade de biogás produzida associada à sua composição permite o cálculo do potencial energético deste.

Na Tab. (3) Tabela 3 são mostrados os parâmetros utilizados para a usina Iracema assim como o potencial do biogás (ver Apêndice – Memorial de Cálculos).

Tabela 3 - Parâmetros da planta de biodigestão

Item	Valor	Unidades	Referência
Produção de Álcool	33	m ³ /h	(PELLEGRINI, 2003)
Fator de produção de vinhaça	12	m ³ de vinhaça/m ³ de álcool	(VAN HAANDEL; CATUNDA, 1994 apud TELH, 2001)
Produção de vinhaça	400	m ³ /h	Cálculo
Fator de DQO da vinhaça	20	kg DQO/m ³	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
DQO total removida da vinhaça	8000	kg DQO/h	Cálculo
DQO removida no reator UASB	0,33	kg DQO/h/m ³	(PROCKNOR, 2008)
Dimensão do reator	24000	m ³	Cálculo
Fator de conversão DQO-biogás	0,45	Nm ³ de biogás/kg DQOr	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Produção diária de biogás	3600	m ³ de biogás/h	Cálculo
Composição do Biogás			
Metano	60	%	(SOUZA, 1991 apud TELH, 2001)
Dióxido de Carbono	40	%	
Outros	<1	%	
PCI do biogás	21353	kJ/Nm ³	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Potencial energético total da planta	21,4	MW	Cálculo

5. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA VINHAÇA

A vinhaça, neste estudo, é avaliada como combustível sob a forma de biogás e sob a forma de vinhaça concentrada, cada qual utilizada em diferentes ciclos motores conforme mostra a Fig. (2).

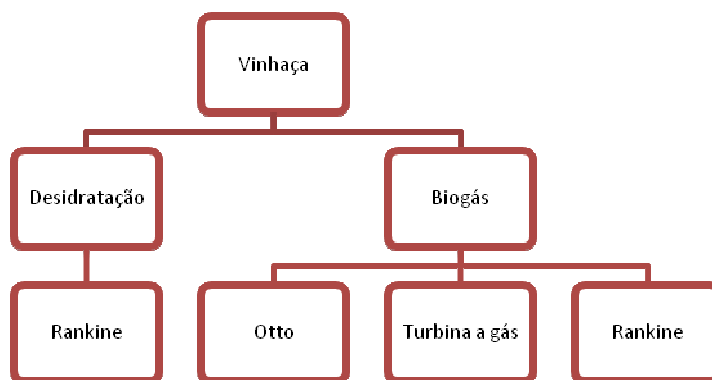


Figura 2 – Vias de utilização da vinhaça como combustível

5.1 Motor Otto a Biogás

A eficiência térmica do motor Otto é diretamente proporcional a taxa de compressão. Entretanto há um limite para esta taxa, acima do qual é possível haver auto-ignição que provoca ondas de alta pressão reduzindo a potência e a vida útil do motor.

Salomon, Lora e Monroy (2007) propõe para o motor Otto uma eficiência de 30%. Aplicada a este estudo, o motor Otto gera então 6,41 MW.

5.2 Turbina a Gás com biogás

A compatibilidade da turbina a gás com o biogás a ser utilizado considera a estabilidade da combustão, a perda de carga no sistema de injeção do combustível e limites de vazão mássica pela turbina. A câmara de combustão, por exemplo, deve acomodar uma maior vazão volumétrica, dado que o biogás apresenta baixo poder calorífico, de forma a se obter uma quantidade equivalente de energia liberada (CONSONNI, LARSON, 1996 *apud* PELLEGRINI, 2009a).

Salomon, Lora e Monroy (2007) propõe para o Turbina a Gás uma eficiência de 32%. Aplicada a este estudo, o motor Otto gera então 6,83 MW.

5.3 Ciclo Rankine com Biogás

Esta análise é baseada no ciclo Rankine sem variações, mostrado na Fig. (3). Para a determinação da potência extraída neste ciclo, definem-se os seguintes os parâmetros:

- Temperatura do vapor de entrada na turbina (T_2): 400° C.
- Pressão do vapor de entrada na turbina (p_2): 38 bar.
- Temperatura de condensação (T_4): 45°C.
- Rendimentos isentrópicos da bomba e da turbina: 75%
- Eficiência do gerador de vapor: 85%.
- Calor fornecido: 21,4 MW.

A partir destes elementos calculam-se as entalpias (h_i) em todos os pontos do ciclo:

- h_1 : 196,6 kJ/kg.
- h_2 : 3217,0 kJ/kg.
- h_3 : 2328,3 kJ/kg.
- h_4 : 188,4 kJ/kg.

Então, determina-se a vazão mássica, equivalente a 6 kg/s. E finalmente, a potência disponível na turbina: 5,34 MW.

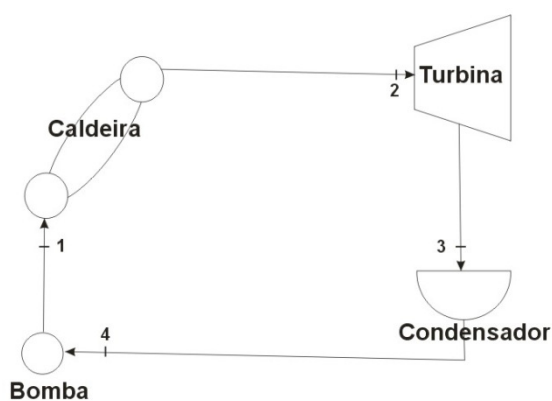


Figura 3 – Ciclo Rankine a biogás

Os principais parâmetros deste sistema são enumerados na Tab (4).

Tabela 4 - Parâmetros da planta de geração de vapor e de energia elétrica a partir da evaporação e queima da vinhaça

Item	Valor	Unidades	Referência
Produção de vinhaça a 6%DS	400	m ³ /h	(PELLEGRINI , 2003)
Conteúdo seco	24	m ³ /h	Cálculo
Vinhaça a 65%DS	37	m ³ /h	Cálculo
Condensado final	363	m ³ /h	Cálculo
Razão combustível auxiliar/vinhaça 65%DS	0,13	m ³ combustível/ m ³ vinhaça	(AVRAM; MORGENROTH; SEEMANN, 2004)
Combustível auxiliar	5	m ³ /h	Cálculo
Razão de vapor gerado/vinhaça total	0,25	m ³ vapor gerado/m ³ vinhaça a 6%	(AVRAM; MORGENROTH; SEEMANN, 2004)
Vapor gerado	98	m ³ vapor gerado/h	Cálculo
Entalpia vapor superaquecido a 38bar e 400°C	3169	kJ/kg	(WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003)
Entalpia do vapor saturado a 2,9 bar	2724	kJ/kg	
Potência do vapor na turbina	12,2	MW	Cálculo

6. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Esta análise fornece parâmetros econômicos para a seleção de alternativas.

Em Gitman (2003) *apud* Dantas (2009) a projeção de fluxos de caixa relativos aos anos de empreendimento deve conter o maior nível de detalhamento para evitar surpresas desagradáveis, ou seja, para que a tomada de decisão seja eficiente.

Pellegrini (2009a) adota a metodologia de cálculo baseada na Demonstração de Resultados do Exercício (DRE), apresentada na Tab. (5), considerada idêntica para cada ano de vida útil do projeto. A DRE permite então identificar dois importantes parâmetros de tomada de decisão:

- VPL: equivalência monetária atual da soma dos fluxos de caixa futuros, dada uma taxa de desconto. Quanto maior o VPL, mais interessante torna-se o investimento.
- TIR: taxa de desconto que iguala o VPL a zero. Quanto maior a TIR, mais interessante torna-se o investimento.

Tabela 5 - Demonstração de Resultado do Exercício

	Receita ou Venda Bruta
(-)	<i>Impostos sobre a venda e encargos setoriais</i>
(=)	Receita Líquida
(-)	<i>Custo Operacional (O&M)</i>
(=)	Lucro Operacional
(-)	<i>Depreciação</i>
(-)	<i>Despesas não-operacionais</i>
(=)	Lucro antes da tributação
(-)	<i>Imposto sobre a receita</i>
(=)	Lucro Líquido
(+)	<i>Depreciação</i>
(=)	Geração de Caixa do Projeto

6.1 Análise Econômico-Financeira aplicada ao caso da usina Iracema

6.1.1 Indicadores Econômicos

A análise econômica considera os seguintes parâmetros (PELLEGRINI, 2009a):

- Vida útil de 20 anos.
- Depreciação linear em 20 anos.
- Taxa de desconto de 10% ao ano.
- Imposto sobre a receita de 4,08%.

A valor de venda da eletricidade é parametrizado de forma a identificar diferentes cenários. Desta forma, calculam-se as respectivas VPLs e TIRs, permitindo uma análise ampliada em função da variação do valor de venda da energia elétrica. Tais valores são apresentados sem impostos.

6.1.2 A planta de biodigestão

O reator UASB utilizado é dimensionado para uma carga diária estimada de 86400Nm³ de biogás produzidos a partir da vinhaça gerada na usina Iracema.

Salomon;Lora; Monroy (2007) propõem que para uma planta de biodigestão de 73.125Nm³ diários de biogás, o investimento é de R\$15.272.634,39 e custos anuais de O&M de R\$207.839,81².

Para a planta de biodigestão em estudo, então, assume-se um investimento de R\$18.045.205,94 e custos anuais de O&M de R\$245.571,73.

² Valores atualizados para 2009 segundo o IGPM de 9,81%.

6.1.3 Caso do motor Otto com biogás

Salomon;Lora; Monroy (2007), num cenário de geração de energia elétrica a partir do biogás da vinhaça em motor Otto, cita um investimento de R\$10.813.766,00 e custos de O&M de R\$148.161,00 na geração de 5,41 MW. Neste estudo, a potência identificada é de 6,41 MW, de forma que é feita uma interpolação linear para o cálculo do investimento, assim como para o valor dos custos de O&M do sistema de geração de energia elétrica. Os valores estão na Tab. (6).

Tabela 6 – Investimento e Custos de O&M do motor Otto com biogás

Item	Valor	Unidades	Referência
Potência Disponível	6,41	MW	Cálculo
Energia Gerada em 8 meses	36922	MWh	Cálculo
Investimento			
Planta de biodigestão	18.045.205,94	R\$	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Motor Otto	12.805.513,14	R\$	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Total	30.850.718,08	R\$	Cálculo
Custo de O&M			
Planta de biodigestão	245.571,73	R\$/ano	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Motor Otto	175.450,42	R\$/ano	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Total	421.021,15	R\$/ano	Cálculo

Os resultados da análise econômico-financeira, vistos na Fig. (5), mostram que para R\$120/MWh a TIR já se apresenta superior a taxa de desconto.

Entretanto a TIR é superior a 15% a partir do valor de R\$150/MWh, no qual o VPL é de R\$11,5 milhões, que representam 37% do investimento inicial.

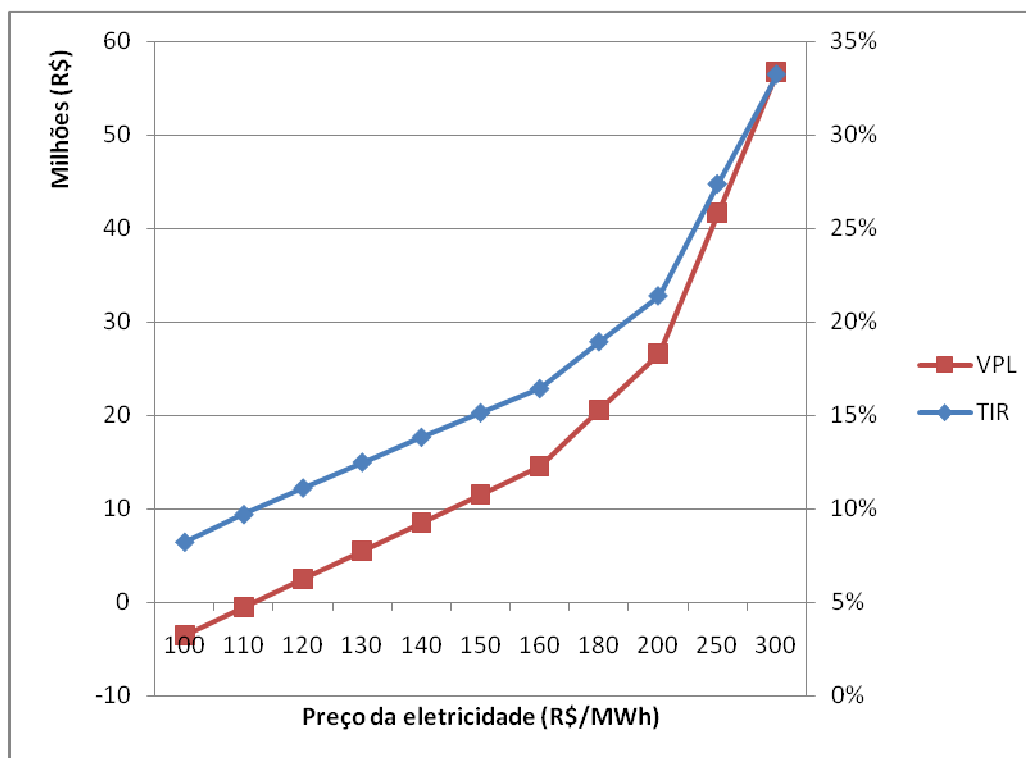


Figura 5 – VPL e TIR do motor Otto com biogás

6.1.4 Caso da turbina a gás com biogás

Salomon; Lora; Monroy, (2007), num cenário de geração de energia elétrica a partir do biogás da vinhaça em microturbinas a gás, cita um investimento de R\$ 19.056.759,00 e custos de O&M anuais de R\$2.611.454,00 na geração de 5,77 MW. Neste estudo, a potência identificada é de 6,83 MW, de forma que é feita uma interpolação linear para o cálculo do investimento, assim como para o valor dos custos de O&M do sistema de geração de energia elétrica. Os valores estão na Tab. (7).

Tabela 7 - Investimento e Custos de O&M da turbina a gás com biogás

Item	Valor	Unidades	Referência
Potência Disponível	6,83	MW	Cálculo
Energia Gerada em 8 meses	39341	MWh	Cálculo
Investimento			
Planta de biodigestão	18.045.205,94	R\$	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Turbina a Gás	22.542.026,57	R\$	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Total	40.587.231,52	R\$	Cálculo
Custo de O&M			
Planta de biodigestão	245.571,73	R\$/ano	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Turbina a Gás	3.089.059,15	R\$/ano	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Total	3.488.112,00	R\$/ano	Cálculo

Os resultados da análise econômico-financeira, apresentados na Fig. (6), para o caso da turbina a gás mostram uma TIR inferior à taxa de desconto para o alto valor de venda de eletricidade de R\$200/MWh.

É obtido uma TIR de 15% para um valor de venda de eletricidade de R\$250/MWh, no qual o VPL é de R\$13,2 milhões, que representam 32,5% do investimento inicial.

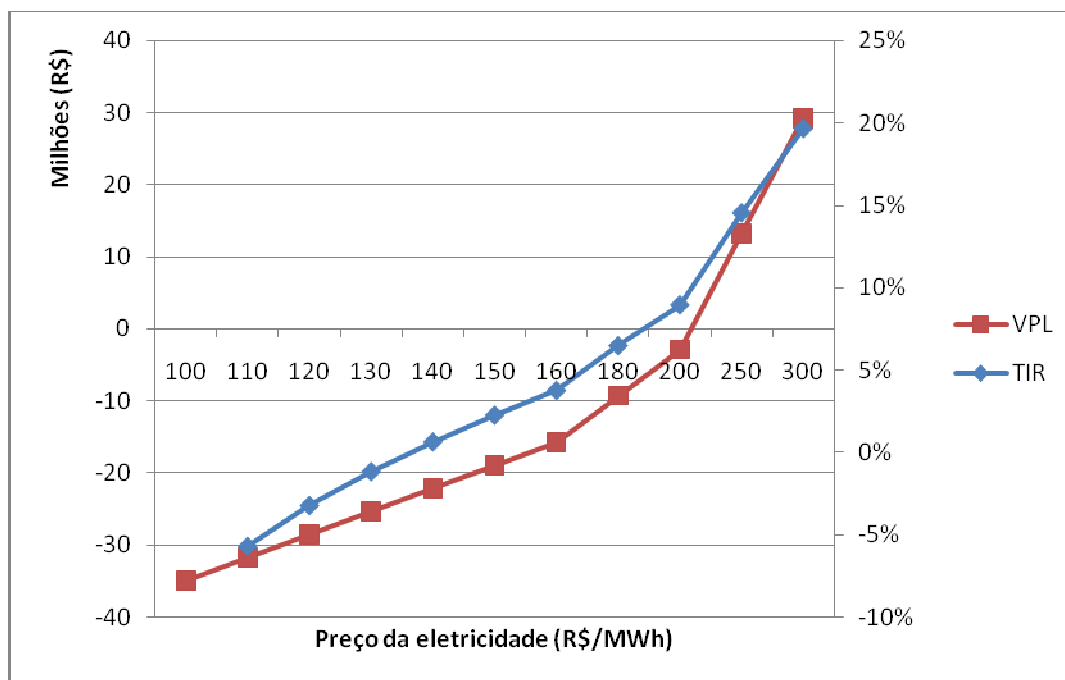


Figura 6 – VPL e TIR da turbina a gás com biogás

6.1.5 Caso do ciclo Rankine com queima de biogás

Segundo Pellegrini (2009b), o investimento em equipamentos do ciclo Rankine para geração de 5,4MW é da ordem de R\$30 milhões e os custos de O&M anuais representam 8% do investimento. Os valores estão na Tab. (8).

Tabela 8 - Investimento e Custos de O&M do ciclo Rankine com queima de biogás

Item	Valor	Unidades	Referência
Potência Disponível	5,4	MW	Cálculo
Energia Gerada em 8 meses	30758	MWh	Cálculo
Investimento			
Planta de biodigestão	18.045.205,94	R\$	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Ciclo Rankine	30.000.000,00	R\$	(PELLEGRINI, 2009b)
Total	48.045.205,00	R\$	Cálculo
Custo de O&M			
Planta de biodigestão	245.571,73	R\$/ano	(SALOMON; LORA; MONROY, 2007)
Ciclo Rankine	2.400.000,00	R\$/ano	(PELLEGRINI, 2009b)
Total	2.645.571,00	R\$/ano	Cálculo

Os resultados da análise econômico-financeira, vistos na Fig. (7), para o caso do ciclo Rankine com queima de biogás mostram uma TIR inferior à taxa de desconto para o valor de venda de eletricidade de R\$250/MWh.

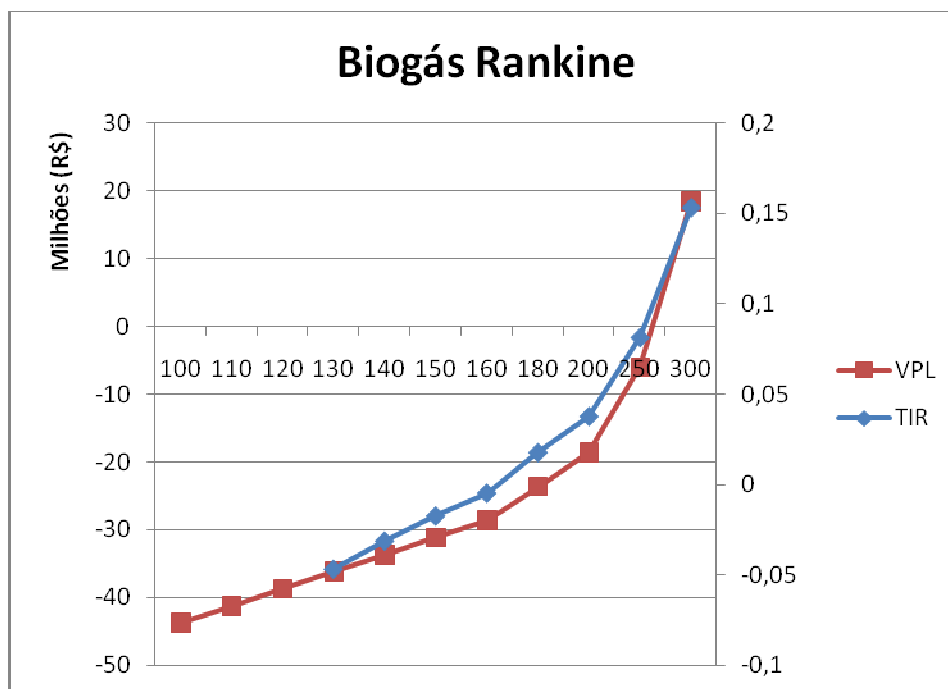


Figura 7 – VPL e TIR do ciclo Rankine com queima de biogás

6.1.6 Caso do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada

Este processo é basicamente dividido em dois grupos, os evaporadores e o ciclo Rankine. Segundo Pellegrini (2009b), o preço dos evaporadores de 5 efeitos é da ordem de R\$40 milhões com custos de O&M anuais de 5% do valor do investimento.

Ainda segundo Pellegrini (2009b), o investimento no ciclo Rankine de 12,2MW é da ordem de R\$60 milhões com custos de O&M anuais de 8% do valor do investimento. Os valores estão na Tab. (9).

Tabela 9 - Investimento e Custos de O&M do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada

Item	Valor	Unidades	Referência
Potência Disponível	12,2	MW	Cálculo
Energia Gerada em 8 meses	70272	MWh	Cálculo
Investimento			
Evaporadores	40.000.000,00	R\$	(PELLEGRINI, 2009b)
Ciclo Rankine	60.000.000,00	R\$	(PELLEGRINI, 2009b)
Total	100.000.000,00	R\$	Cálculo
Custo de O&M			
Evaporadores	2.000.000,00	R\$/ano	(PELLEGRINI, 2009b)
Ciclo Rankine	4.800.000,00	R\$/ano	(PELLEGRINI, 2009b)
Total	6.800.000,00	R\$/ano	Cálculo

Os resultados da análise econômico-financeira, apresentados na Fig. (8), para o caso do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada mostram uma TIR inferior à taxa de desconto para o alto valor de venda de eletricidade de R\$250/MWh.

É obtido uma TIR de 13% para um valor de venda de eletricidade de R\$300/MWh, no qual o VPL é de R\$18,4 milhões, que representa 18,4% do investimento inicial.

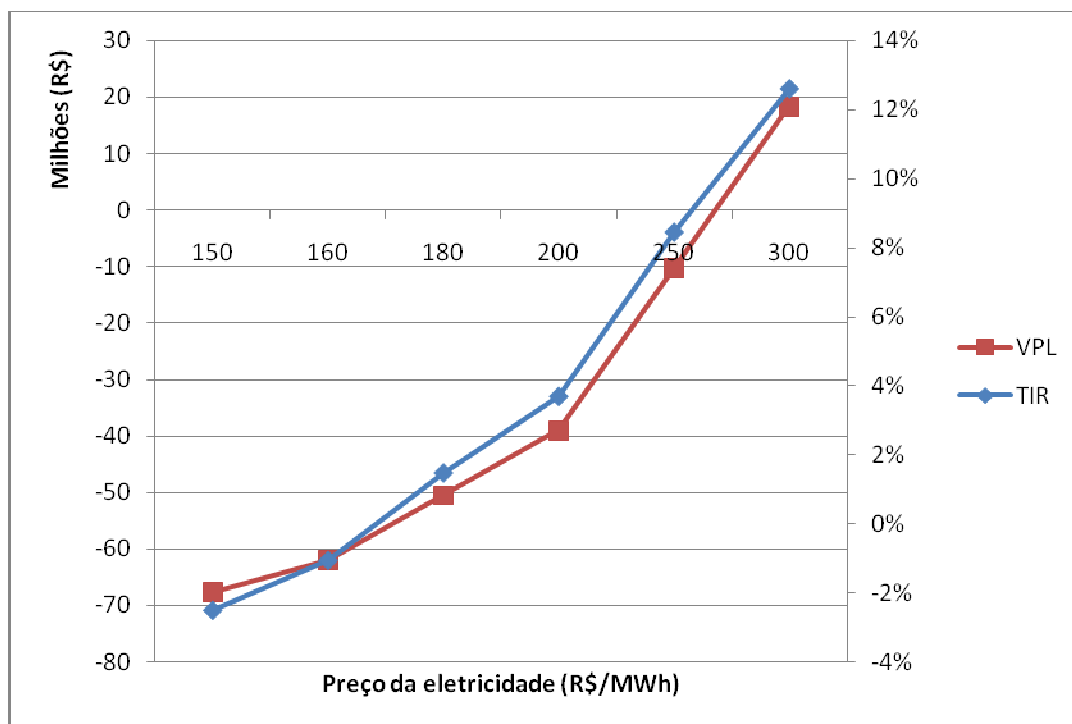


Figura 8 – VPL e TIR do ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada

7. ANÁLISES

7.1 Biodigestão

A biodigestão apresenta-se como uma alternativa para a vinhaça pois mantém suas características para a fertilização ao mesmo tempo em que produz o biogás. Vários modelos de biodigestores existem no mercado, sendo mais utilizado o do tipo UASB (reator anaeróbio de fluxo ascendente).

7.2 Conversão de energia

A vinhaça, utilizada como combustível, fornece diferentes potências em função do sistema de conversão de energia escolhido. No presente trabalho, obtiveram-se as potências disponíveis em quatro diferentes sistemas. A Fig. (9) mostra estas diferentes potências.

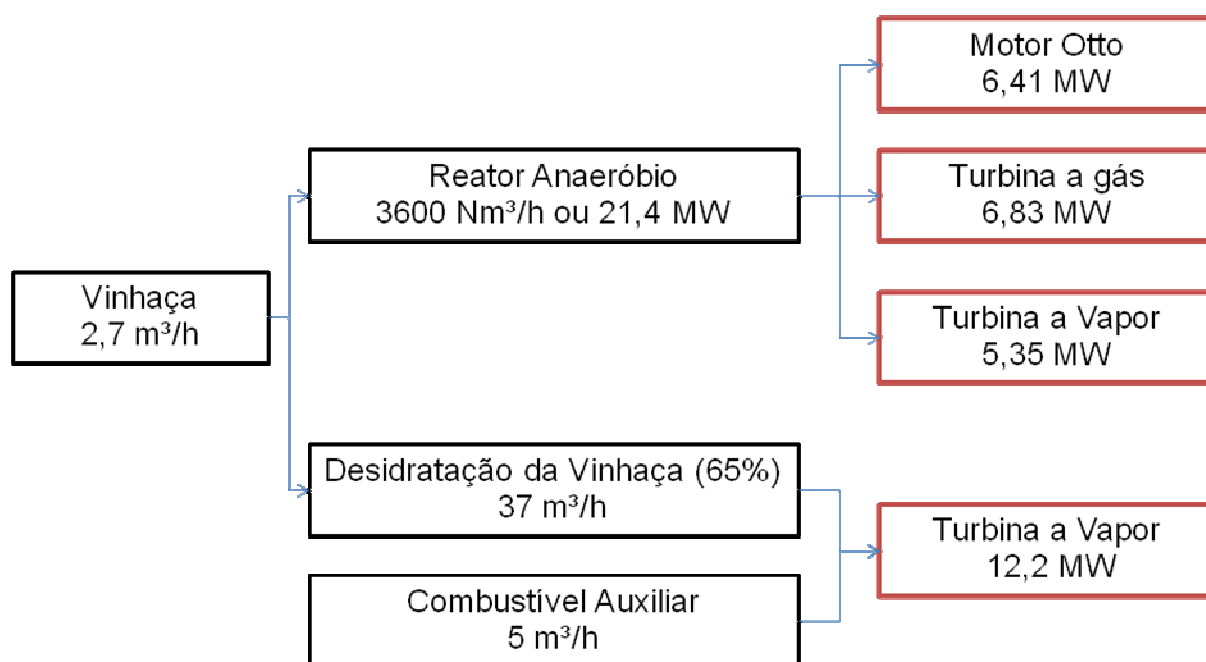


Figura 9 – Configurações energéticas para a vinhaça

Os três sistemas que utilizam como combustível o biogás apresentam diferentes potências em razão de seus distintos rendimentos. A diferença máxima entre as 3 potências é de 1,5 MW, que representam 23% da potência gerada no motor Otto.

A diferença encontrada na conversão de energia entre o uso da vinhaça concentrada e do biogás em ciclos Rankine é de 6,85 MW. Esta potência disponível no ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada é superior pois neste há acréscimo de combustível auxiliar e

toda a carga orgânica é queimada, enquanto que o biogás não é a conversão completa da carga orgânica. Logo, o poder calorífico disponível na queima do biogás é menor.

7.3 Investimentos e Custos de O&M

A análise econômico-financeira mostra que a faixa de investimentos, na Fig. (10), e de custos de O&M, na Fig. (11), é bastante variável para o conjunto das quatro opções.

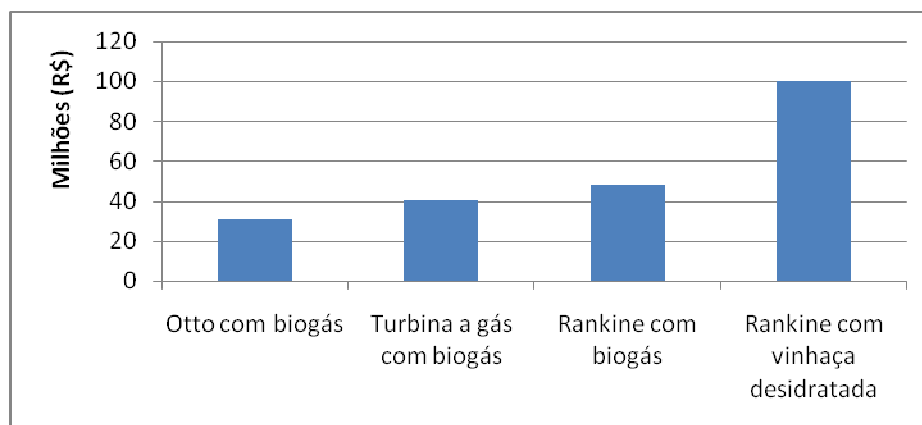


Figura 10 – Investimentos relativos às 4 opções

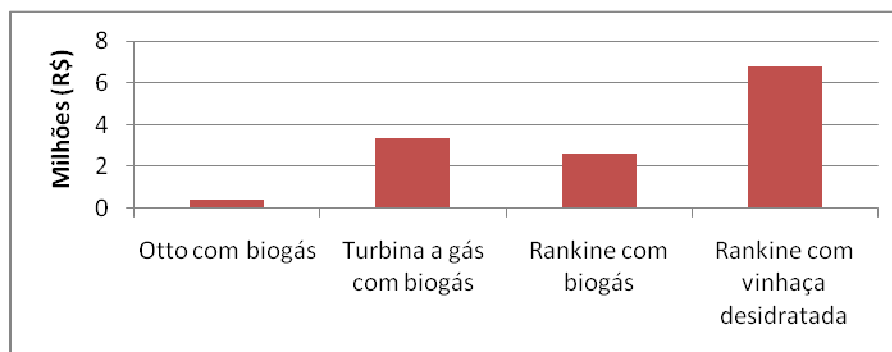


Figura 11 – Custos de O&M anuais relativos às 4 opções

O ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada, que embora disponibilize a maior potência, é também aquele que exige os maiores investimentos e custos de O&M. Por outro lado, o ciclo Otto, com a segunda menor potência disponível, demanda os menores investimentos e custos de O&M.

Os ciclos Rankine com biogás e turbina a gás com biogás apresentam investimentos e custos de operação e manutenção de mesma ordem, entretanto a turbina a gás disponibiliza uma potência superior.

7.4 VPL e TIR

A análise econômico-financeira das quatro opções é baseada no VPL, na Fig. (12), e na TIR, na Fig. (13).

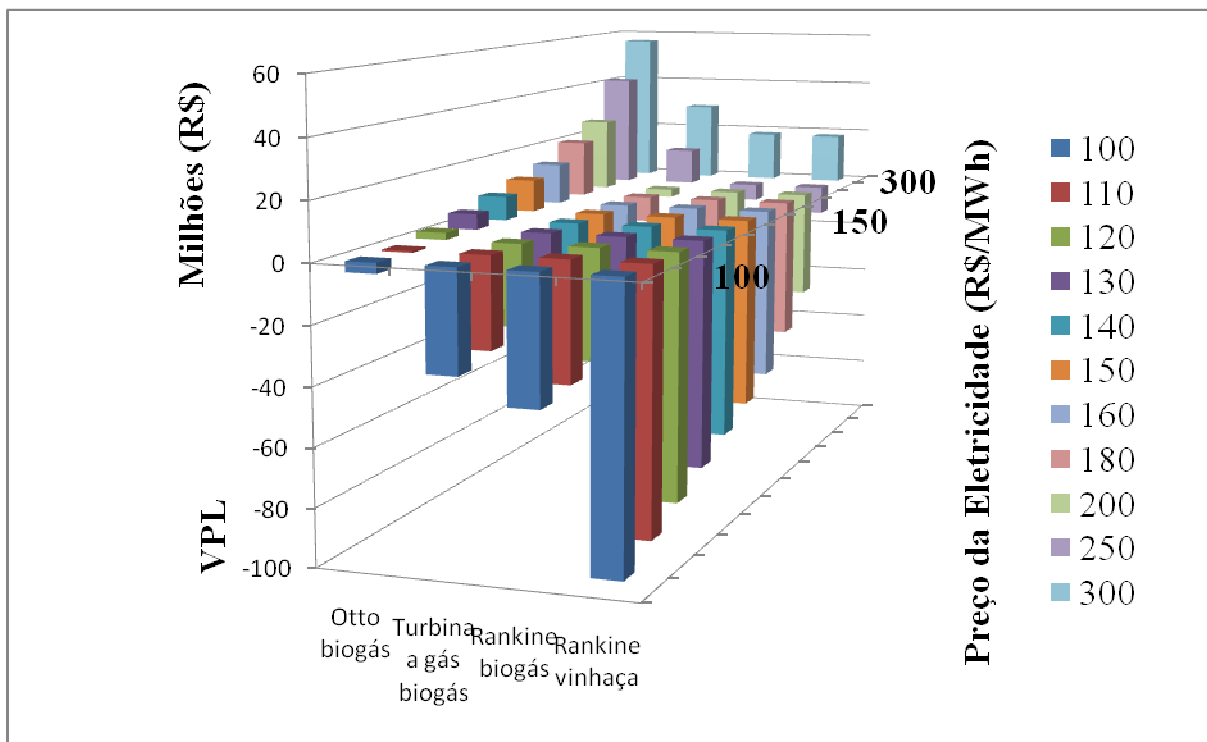


Figura 12 – VPL dos quatro sistemas em função do preço da eletricidade

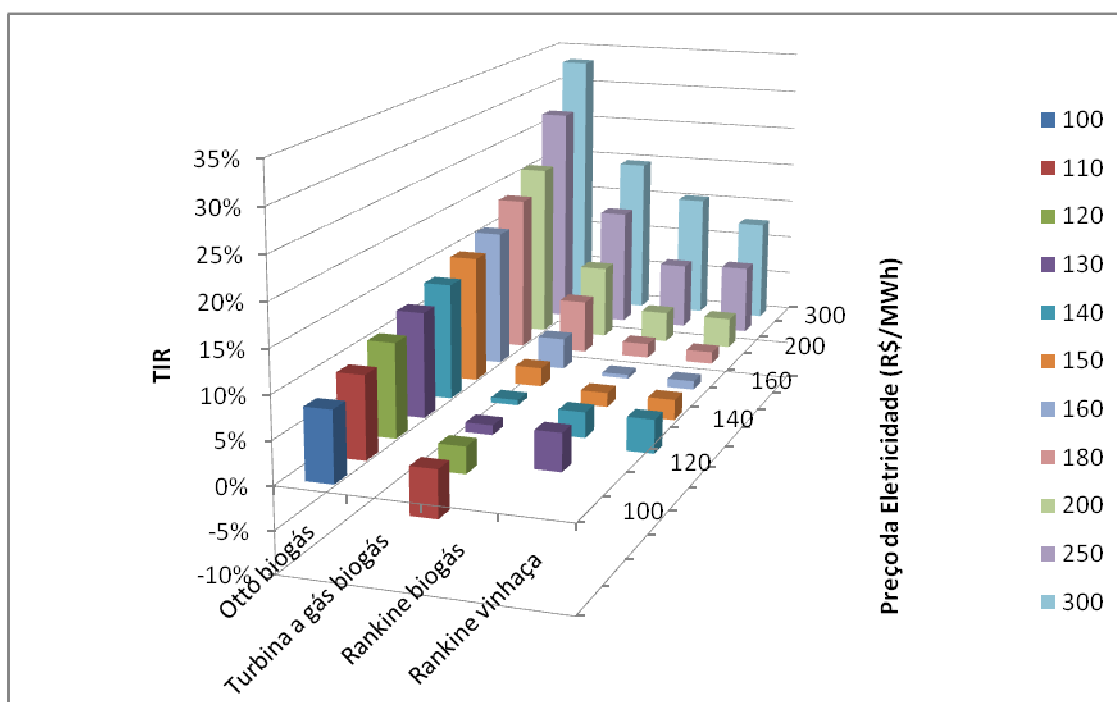


Figura 13 – TIR dos quatro sistemas em função do preço da eletricidade

A primeira opção a tornar-se viável é a do ciclo Otto, que necessita de investimentos e custos de O&M bastante inferiores aos demais. Além disso, o fato de a potência disponibilizada ser inferior a dois outros ciclos não o torna menos atrativo do ponto de vista econômico. Aliás, o VPL do ciclo Otto é o maior para a totalidade da faixa de preços de eletricidade analisada.

As outras três opções apresentam viabilidade econômica para valores de eletricidade elevados para os padrões atuais, a partir de R\$200/MWh. Salomon (2007) cita que para a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários o valor de venda da energia elétrica é de R\$169,00/MWh.

Comparando as alternativas de turbina a gás com biogás e ciclo Rankine com queima de biogás, aquela apresenta melhores índices de VPL e TIR. Conforme discutido anteriormente, tais opções apresentam investimentos e custos de O&M de mesma ordem, entretanto a turbina a gás disponibiliza maior potência.

O ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada apresenta investimento e custos de O&M elevados que não se justificam economicamente mesmo dada a maior potência disponibilizada. Para o valor de R\$300/MWh, o VPL seria inferior a R\$20 milhões. Tal VPL é obtido no ciclo Otto para um valor de venda na ordem de R\$180/MWh.

8. CONCLUSÃO

O biogás pode ser produzido através de reatores anaeróbios do tipo UASB e disponibiliza uma potência de 21,4 MW. Esta potência é recuperado em três diferentes ciclos: no Otto, 6,43MW; na turbina a gás, 6,83MW e no Rankine, 5,35MW.

O estudo mostrou que o biogás quando queimado em motor Otto apresenta viabilidade econômica atualmente. Tem TIR superior a 15% para um preço de venda de eletricidade de R\$ 150,00/MWh.

O ciclo Rankine com queima de biogás, utilizado somente para geração de energia elétrica, não apresenta viabilidade econômica.

Os demais ciclos também não demonstram viabilidade econômica no cenário atual. Turbina a gás com biogás torna-se viável para valores de venda de eletricidade acima de R\$ 200,00/MWh. O ciclo Rankine com queima de vinhaça concentrada, mesmo que gere a maior potência (12,2MW) é viável a partir de um valor de venda da eletricidade de R\$250,00/MWh.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERS, M. **Concentração de Vinhaça: Tecnologias, Equipamentos e sua Integração Energética numa Destilaria**. São Paulo: DEDINI Indústrias de Base, 2007.
- AVRAM, P.; MORGENROTH, B.; SEEMANN, F. Benchmarking concept for an integrated sugar, ethanol and co-generation plant. **Zuckerindustrie**, v.129, n.12, p. 875-879, 2004.
- CAMARGO, C. A. (Coord) **Conservação de Energia na Indústria de Açúcar e Álcool**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1990. 796p.
- CONSONNI, S.; LARSON, E. D. Biomass-Gasifier/Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles: Part A - Technologies and Performance Modeling and Part B - Performance Calculations and Economic Assesment. **Journal of Engineering for Gas Turbine and Power**, v.118, p. 507-525, 1996.
- DANTAS FILHO, P. L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar; um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo**. 175p. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Energia) - EP/ FEA/ IEE/ IF da Universidade de São Paulo, 2009.
- GITMAN, L. J. **Administração financeira: uma abordagem gerencial**. São Paulo: Pearson, 2003.
- GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. **Geração de Energia Elétrica a partir do Resíduo Vinhaça**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2000.
- LAMO, P. **Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais**. Piracicaba: Methax/Biopaq - Codistil, 1991.
- LAMONICA, H. M. **Potencial de Geração de Excedente de Energia Elétrica a partir da Biodigestão da Vinhaça**. Campinas: Centro de Tecnologia Canavieira, 2006.
- NOGUEIRA, L. A. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986.
- PELLEGRINI, L. F.. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**. 2009. 350p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009a.
- _____. Comunicação pessoal. 2 de novembro de 2009b.

- _____. **Estudo da Cogeração em Ciclos Combinados com Gaseificação de Bagaço de Cana-de-Açúcar.** Trabalho de Formatura - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- PORTAL EXAME. Disponível em <http://portalexame.abril.com.br/static/aberto/complementos/870/producao_brasileira_alcool.htm> Acesso em 21 de abril de 2009.
- PROCKNOR, C. Disponível em <<http://www.procknor.com.br/stabmaiun08.htm>> Acesso em 20 de maio de 2009.
- SALOMON, K.; LORA, E.; MONROY, E. Custo do Biogás proveniente da Biodigestão da Vinhaça e sua Utilização. 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2007, Cusco.
- SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION , 1991, p.191-200.
- TELH, M.. **Avaliação do Uso de Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo no Tratamento de Vinhaça sob Condições Termofílicas.** 2001. Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos 2001.
- VAN HAANDEL, A.; CATUNDA, P.. Profitability increase of alcohol distilleries by the rational use of byproducts. **Water Science and Technology**, V.29, Nº8 , p.117-124, 1994.
- WYLEN, V.; SONNTAG; BORGNAKKE. **Fundamentos da Termodinâmica.** Tradução da 6ª Edição Americana. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2003.577p.
- ZAMBONI, L. M. **Avaliação Comparativa de Sistemas Híbridos de Cogeração a Gas Natural e Bagaço de Cana.** São Paulo, 2005.
- ZANETTI, M. V. **Proposta para a Implementação de Projetos de Cogeração em Usinas de Açúcar e Álcool Embasada nos Conceitos de *Project Finance*.** Trabalho de Formatura - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

10. APÊNDICE – MEMORIAL DE CÁLCULOS

As quatro alternativas de geração de energia elétrica a partir do uso da vinhaça geram diferentes potências devidas, em parte, aos diferentes rendimentos. Abaixo são descritos os cálculos estimativos das potências de cada opção.

1- Potência contida no biogás:

As variáveis são:

Produção de Álcool	A
Fator de produção de vinhaça	B
Produção de vinhaça	C* ³
Fator de DQO da vinhaça	D
DQO total removida da vinhaça	E*
DQO removida no reator UASB	F
Dimensão do reator	G*
Fator de conversão DQO-biogás	H
Produção diária de biogás	I*
Composição do Biogás	
Metano	J
Dióxido de Carbono	K
Outros	L
PCI do metano	M
PCI do biogás	N*
Potencial energético total da planta	P*

Produção de vinhaça (C) :

$$C = B * A;$$

DQO total removida da vinhaça (E) :

$$E = C * D;$$

Dimensão do reator (G) :

$$G = \frac{E}{F};$$

Produção diária de biogás (I) :

$$I = C * D * H;$$

PCI do biogás (N) :

$$N = M * J$$

Potencial energético total da planta (P) :

$$P = \frac{I * N}{3600 * 24 * 1000};$$

³ * refere-se a um valor calculado.

- 2- Potências no motor Otto, na turbina a gás e na turbina a vapor a partir do biogás:
As variáveis são:

Eficiência do motor otto	Q
Potência no motor otto	R*
Eficiência da turbina a gás	S
Potência na turbina a gás	T*
Rendimento do ciclo a vapor	U
Potência do ciclo a vapor com biogás somente	V*

Potência no motor otto (R):

$$R = P * Q;$$

Potência na turbina a gás (T):

$$T = P * S;$$

Potência do ciclo a vapor com biogás somente (V):

$$V = P * Q;$$

3- Potência na turbina a vapor a partir da concentração e queima da vinhaça:

As variáveis são:

Produção de vinhaça a 6%DS	C
Conteúdo seco	d*
Vinhaça a 65%DS	e*
Condensado final	f*
Razão combustível auxiliar/vinhaça 65%DS	g
Combustível auxiliar	h*
Razão de vapor gerado/vinhaça total	i
Vapor gerado	j*
Entalpia vapor superaquecido a 38 bar e 400C	k
Entalpia do vapor saturado a 2,9 bar	l
Potência do vapor na turbina	m*

Conteúdo seco (d) :

$$d = \frac{C}{0,06};$$

Vinhaça a 65%DS (e) :

$$e = \frac{d}{0,65};$$

Condensado final (f) :

$$f = C - e;$$

Combustível auxiliar (h) :

$$h = e * g;$$

Vapor gerado (j) :

$$j = C * i;$$

Potência do vapor na turbina (m):

$$m = j * \frac{(k - l)}{3600};$$

11. ANEXO - CARACTERIZAÇÃO DA VINHAÇA EM FUNÇÃO DA SUA CONCENTRAÇÃO

Tabela – Características das Vinhaças (ALBERS, 2007)

Parâmetro		In natura 4% BRIX ⁴	BRIX 35%	BRIX 65%
pH		4,4-4,6	4,6-5,0	4,6-5,0
Temperatura	°C	80-100	50-60	50-60
DBO	mg/L	19800	173250	321750
DQO	mg/L	45000	393750	731250
Sólidos Totais	mg/L	52700	461125	856375
Sólidos Solúveis	mg/L	40000	350000	650000
Sólidos Insolúveis	mg/L	12700	111125	206375
Nitrogênio	mg/L	480-710	4200-6213	7800-11538
Fósforo – P ₂ O ₅	mg/L	9-200	79-1750	146-3250
Potássio – K ₂ O	mg/L	3340-4600	29225-40250	54275-74750
Cálcio – CaO	mg/L	1330-4570	11638-39988	21613-74263
Magnésio – MgO	mg/L	580-700	5075-6125	9425-11375
Sulfato – SO ₄	mg/L	3700-3730	32375-32637	60125-60612
Rel. Vinhaça/Álcool	L/L	12	1,4	0,74

⁴ Brix é a fração de sólidos solúveis no composto.

Fonte: <http://www.sugartech.co.za/definitions/index.php>, consulta em 06/10/2009.