



ISSN: 1984-3151

COGERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO TRATAMENTO DE SOLOS CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS

COGENERATION OF POWER THROUGH THE TREATMENT OF SOIL CONTAMINATED WITH OIL

Maecilei Gonçalves Leal¹; Moisés Coelho Perpétuo Moura²; Arlete Vieira da Silva³

1 Engenheiro Eletricista. Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. Senior Engenharia - Belo Horizonte, MG. – maxleal2002@yahoo.com.br.

2 Engenheiro Eletricista. Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. EcoBras - Belo Horizonte, MG.– netmoi@yahoo.com.br.

3 Mestre em Geografia e Análise Ambiental, UFMG, 2002. Professora do Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH, Belo Horizonte, MG – arlete.silva@prof.unibh.br.

Recebido em: 15/06/2012 - Aprovado em: 30/06/2012 - Disponibilizado em: 30/07/2012

RESUMO: O presente artigo tem como principal objetivo apresentar um estudo de viabilidade técnica de implantação de um sistema de cogeração de energia em uma Usina de Incineração existente. O trabalho aborda a utilização de recursos naturais derivados do petróleo desde o ano de 1939 no Brasil. O processamento destes recursos tem causado cada vez mais impacto ambiental devido aos resíduos provenientes de seu refino, os riscos de contaminação ambiental aumentam progressivamente à medida que se aumenta a exploração e processamento deste recurso natural. A busca por novos meios de geração que possam ser alinhados com o tratamento destes resíduos tem se tornado cada vez maior. A incineração aliada a cogeração de energia tem se mostrado uma forma viável de sustentar a produção e ao mesmo tempo reduzir os rejeitos. Estudos tem mostrado que o processo de cogeração empregados em sistemas de incineração tem sido capaz não só de gerar energia elétrica para alimentar o processo como também disponibilizar excedentes de energia para serem comercializadas ou aplicadas em outros processos.

PALAVRAS-CHAVE: Incineração de Resíduos. Hidrocarbonetos. Resíduos de Refinaria de Petróleo. Cogeração de Energia.

ABSTRACT: The natural resources derived from oil has been used since the year 1939 in Brazil. The processing of these resources has caused increasing environmental impacts due to waste from refining, the risk of environmental contamination increases progressively as increasing the exploration and processing of this natural resource. The requirements of energy demand for increased production has also been a major obstacle. The search for new means of generation that can be aligned with the treatment of this waste has become increasingly larger. The incineration combined with energy cogeneration has proved a viable way to sustain production while reducing waste. Studies have shown that the cogeneration process used in incineration systems have been able not only to generate electricity to power the process as well as provide excess energy to be sold or applied in other processes.

KEYWORDS: Waste Incineration, Hydrocarbons, Waste Oil Refinery, Cogeneration Power.

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 60 começaram a surgir as primeiras preocupações com a questão da disposição

final dos resíduos industriais. Isto porque o ritmo de exploração dos recursos naturais, exigidos pelo desenvolvimento econômico, não correspondia ao tempo que o meio ambiente necessitava para

decompor parte destes. O que contribuiria, gradativamente, com a degradação ambiental e para um colapso dos recursos naturais em curto período, se medidas para contê-los não tivessem sido tomadas.

A busca por novas fontes de petróleo tem sido intensificada, uma vez que este é o responsável pela movimentação econômica dos países que têm este recurso natural.

A disposição de resíduos provenientes do refino e extração do petróleo é um problema crescente para as administrações ambientais, tendo em vista os elevados potenciais de poluição do meio ambiente. Portanto, a busca de novas tecnologias para o tratamento e disposição final dos resíduos industriais faz-se necessário e urgente.

Nesse contexto usinas de incineração possuem grande potencial para instalar um sistema de cogeração de energia com bases nos gases a alta temperatura gerados durante o processo. Desta forma, podem-se obter ganhos significativos no processo, tratamento e destinação final dos resíduos industriais. Adicionalmente, a utilização de sistemas de geração de energia em processos de tratamento térmico vem ao encontro da busca de fontes alternativas para a geração de energia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HIDROCARBONETOS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

Os hidrocarbonetos são constituídos basicamente de carbono e hidrogênio, formando compostos altamente tóxicos, que geralmente têm efeitos carcinogênicos ou mutagênicos. Esses compostos tendem à recalcitrância, devido à elevada hidrofobicidade e consequente baixa solubilidade em água. Quanto à resistência ao ataque microbiano, eles são

diretamente proporcionais ao seu peso molecular, e inversamente proporcionais a sua solubilidade em água (URURAHY et al., 1998).

O mesmo autor afirma que na maioria dos casos os hidrocarbonetos são caracterizados como borras oleosas geradas pelas refinarias de petróleo através do processo de limpeza de tanques, separadores água e óleo (SAO) e pelo próprio processo de refino.

No início da década de 1950, segundo Carmo (2003) não havia tecnologia para tratamento e/ou reaproveitamento de borras oleosas geradas pela indústria do petróleo. Sendo assim, o destino destas eram lagoas ou diques. Em alguns casos, a borra era simplesmente descartada em trincheiras, valas ou colocadas em tambores e depois enterrado, sem nenhum preparo da área, e com isso aumentando os riscos ambientais, que este material traria ao meio ambiente, ou seja, sem uma gestão ambiental adequada.

O mesmo autor afirma que com o passar dos anos, estes locais tornaram-se o principal foco de contaminação do solo e, posteriormente, devido à liquefação da borra, percolação e infiltração das águas pluviais, acarretou sua migração e de seus contaminantes para o lençol freático. As principais contaminações originadas são de hidrocarbonetos alifáticos (TPH), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) e BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos).

Segundo Grillo (2003), a atividade industrial de uma refinaria produz fortes impactos ao meio ambiente, onde ela é instalada, pois, além de sua planta ter grandes dimensões, ela gera, através de seu processo produtivo, grandes quantidades de resíduos, emissões, efluentes, riscos inerentes à atividade e transporte de seus produtos.

Souza e Holanda (2003) afirmam que, diariamente, a indústria petrolífera produz enormes quantidades de

resíduos, com níveis de periculosidade em suas quatro áreas principais (extração de óleo cru, transporte para refinarias e centros de distribuição de produtos, refino de produtos acabados e venda dos produtos aos consumidores). Que são, basicamente, constituídos de hidrocarbonetos na forma de óleo, água e sólidos em diferentes proporções de acordo com cada área. O resíduo mais abundante é o oleoso, o qual apresenta capacidade abrasiva de aglomerar areia ou pó de pedra, podendo formar uma massa de resíduo final entre 10 a 20 vezes a massa do resíduo inicial.

Os mesmos autores afirmam que inicialmente os resíduos oleosos gerados pela indústria petrolífera são

destinados a diques construídos sobre o solo, valas, trincheiras ou tambores para posterior destinação em aterros (FIG. 1).

Eles ainda ressaltam que as destinações incorretas destes resíduos podem acarretar em contaminação de corpos hídricos adjacentes, cujas consequências podem ser o assoreamento dos rios, mortandade de peixes, contaminação pela presença de metais pesados, substâncias tóxicas, degradação do solo devido a alta salinidade presente na água produzida e impactos negativos em áreas de preservação ambiental.



Figura 1 – Remoção da borra oleosa para posterior coprocessamento.

Fonte - VIRGOLINO, 2007, p.44.

Gripp (1998) afirma que, devido ao enorme impacto ambiental causado por estes acúmulos de materiais orgânicos, a demanda por tecnologias de destinação/disposição no gerenciamento de resíduos perigosos (sólidos, líquidos e gasosos) vem aumentando significativamente. Atualmente no Brasil, podem-se encontrar usinas dedicadas à destruição térmica dos resíduos gerados nos mais diversos

campos da indústria. Com o crescente aumento da geração de resíduos e a busca por tecnologias ambientalmente corretas para destinação final dos mesmos. Alguns tratamentos podem apresentar soluções eficazes dependendo do resíduo, são eles:

Pirólise - Processo de destruição térmica, que consiste na transferência de calor, onde o processo ocorre em uma área redutora, ou seja, com baixo teor de

oxigênio. Nesse processo, os materiais à base de carbono são decompostos em combustíveis gasosos, líquidos e sólidos (carvão). O sistema consiste em uma câmara metálica onde os resíduos são acomodados, câmara esta, dotada de um circuito de externo de fluido térmico ou gás aquecido, responsáveis pela transferência de calor.

Autoclavagem - Originalmente utilizado na esterilização de material cirúrgico, este processo foi adaptado e desenvolvido para a esterilização de resíduos. Em linhas gerais, consiste em um sistema de alimentação que conduz os resíduos até uma câmara metálica, trabalhando em pressão negativa, onde vapor d'água (entre 105 e 150°C) é injetado no interior da câmara, sob determinada condição de pressão.

Microondas - Nesse processo os resíduos são triturados, umedecidos com vapor d'água (150°C) e conduzido à câmara (forno) de microondas. No interior da câmara encontram-se dispositivos cujas funções são revolver e deslocar o material para que o mesmo receba, de forma uniforme, a radiação de microondas.

Eletrotérmica - Este processo consiste numa dupla trituração prévia ao tratamento, seguida pela exposição da massa triturada a um campo elétrico de alta potência, gerado por ondas eletromagnéticas de baixa frequência, atingindo uma temperatura final entre 95 e 98°C.

Incineração - O processo consiste em uma câmara metálica rotativa, onde os resíduos são submetidos a altas temperaturas em uma área oxidante, ou seja, com significativa presença de oxigênio. Em seu interior, um queimador é responsável pela formação de uma chama, que em contato direto e/ou indireto, proporciona a liberação dos compostos voláteis. A incineração dos resíduos industriais com aproveitamento energético quer seja para a geração de energia elétrica, quer seja para geração de vapor ou ar refrigerado, é uma alternativa que vem sendo

empregada para solucionar os problemas de disposição final dos resíduos industriais, principalmente nos países da Europa, Estados Unidos e Japão (GRIPP, 1998).

Dada a crise energética dos últimos anos e a busca por tecnologias alternativas de geração de energia, que venha complementar a matriz energética brasileira, calcada na hidroeletricidade, ganha espaço no País a utilização de resíduos sólidos em processos termoelétricos de cogeração. A queima de pneus usados e outros resíduos em fornos de clínquer, inclusive com regulamentação no Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 1999), e a utilização da biomassa do bagaço de cana em processos de cogeração com gás natural são exemplos dessa busca por novas tecnologias que contribuem para a geração de energia e, ao mesmo tempo, propiciam uma destinação final adequada aos resíduos sólidos.

2.2 TIPOS DE INCINERADORES

Segundo Dempsey e Oppelt (1999), existem vários tipos de incineradores, mas cinco principais se destacam, são eles: Câmaras Múltiplas Fixas; de Leito Fluidizado; de Injeção Líquida; de Plasma e o de Câmara Rotativa.

Dar-se-á ênfase ao incinerador de câmara rotativa, por ser considerado um dos objetos principais deste estudo.

2.2.1 INCINERADOR CÂMARA ROTATIVA

Incineradores de Câmaras Rotativas (FIG. 2) são os mais versáteis, devido ao fato de serem aplicáveis à destruição de resíduos sólidos, lamas e resíduos em contêineres, assim como os líquidos. Devido a isto, estas unidades estão frequentemente incorporadas em projetos de plantas de incineração comerciais. A câmara rotativa é um cilindro horizontal revestido

internamente com materiais refratários e isolantes. A rotação da câmara induz o transporte do resíduo e melhora a mistura (homogeneização) do resíduo a ser

queimado. O resíduo pode mover-se tanto concorrente quanto em contracorrente em relação ao fluxo de gases (DEMPSEY; OPPELT, 1999).

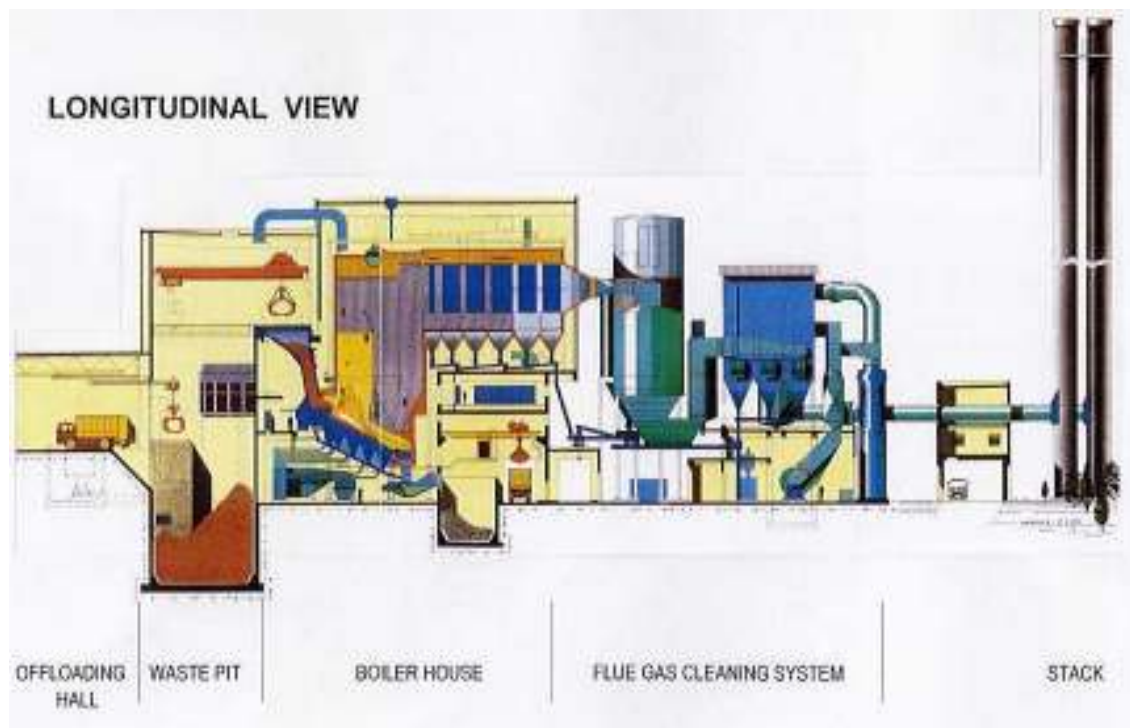


Figura 2 - Processo de incineração.

Fonte – ECOLING, 2011.

O processo de tratamento de solos contaminados com hidrocarbonetos, segundo Dempsey e Oppelt (1999), consiste em uma câmara rotativa, onde os solos contaminados são aquecidos à temperatura de 800°C. Os contaminantes (hidrocarbonetos), presentes nos solos, passam pelo processo de dessorção térmica nas temperaturas entre 260 e 500°C, onde fração dos contaminantes é incinerada na câmara rotativa e a fração restante é direcionada à câmara de combustão para incineração.

Os autores ressaltam que, após a passagem pela câmara de combustão, os gases contaminados com materiais particulados são direcionados ao resfriador para resfriar os gases rapidamente até a temperatura de saturação. Posteriormente, os gases são

direcionados ao Lavador de Gases Venturi e Hidrociclone, cujos objetivos são, respectivamente, a separação de um conjunto de particulados e contaminantes gasosos presentes no gás, mediante a lavagem do mesmo com água e promover a separação das fases líquida e gasosa provenientes do Lavador de Gases Venturi. Os gases após a passagem nos equipamentos de controle ambiental são então direcionados à chaminé.

Os mesmos autores ainda afirmam que devido ao considerável PCI dos solos é necessário um controle rigoroso da temperatura interna da câmara rotativa, podendo ocorrer a fusão e vitrificação dos inertes (solo descontaminado). O controle da temperatura interna

da câmara é realizado com a introdução de ar atmosférico no interior da mesma.

O controle da fração incinerada de gases é realizado exclusivamente com a introdução de ar atmosférico na câmara rotativa, uma vez que a câmara estará operando com temperatura superior à temperatura de ignição (210°C) dos hidrocarbonetos (decano) (DEMPSEY; OPPELT, 1999).

Os autores afirmam que a utilização do processo de dessorção térmica combinado com a incineração dos gases na câmara rotativa resulta em um consumo inferior de gás combustível e redução dimensional dos equipamentos.

O incinerador de câmara rotativa é composto principalmente por câmara principal, caixa de passagem, sistema de combustão. A câmara rotativa tem como objetivo o tratamento dos solos contaminados em conjunto com o escoamento em contracorrente aos gases.

Os mesmos autores ressaltam que o sistema de combustão tem como principal finalidade realizar a transformação de energia química do gás combustível em calor. Este sistema realiza o controle da temperatura interna da câmara de combustão, o consumo de gás combustível, a estabilização de chama e promove a recirculação dos gases da chama, de modo a aquecer a mistura ar/gás combustível.

O gás combustível e o ar, de acordo com Dempsey e Oppelt (1999), são transportados por canais no interior do queimador de processo até o cabeçote. Esta zona promove a introdução de combustível e de ar na câmara de combustão (a reação não ocorre no interior do queimador), onde, devido à elevada velocidade do ar, estes se misturam. Após esta mistura, ocorre a ignição acompanhada da libertação de calor pretendida. A ignição é realizada através de uma chama piloto que irá provocar a ignição da chama principal. Após o início da reação a chama é

autossustentada, e a alimentação de ar é efetuada de duas formas: o ar primário que é introduzido junto ou simultaneamente com o combustível e o ar secundário que é introduzido para próximo da zona de chama e que por arrastamento irá ser misturado e não deixará que a chama se extinga.

O excesso de ar é a quantidade extra de ar introduzida, acima da necessária para uma reação estequiométrica. O objetivo é utilizar a quantidade mínima de excesso de ar que proporcione segurança, minimizar o gasto de gás combustível e controlar a temperatura interna da câmara de combustão (DEMPSEY; OPPELT, 1999).

2.3 TURBINA

Segundo Ossberger (1998), uma turbina a vapor é um motor térmico rotativo no qual a energia potencial do vapor é transformada em energia cinética devido a sua expansão através dos bocais. Esta energia então é transformada em energia mecânica de rotação devido à força do vapor agindo nas pás rotativas.

O mesmo autor afirma que o elemento básico da turbina é a roda ou rotor, que conta com paletas, hélices, lâminas ou cubos colocados ao redor de sua circunferência, de forma que o fluido em movimento produza uma força tangencial que impulsiona a roda, fazendo-a girar. Essa energia mecânica é transferida através de um eixo para movimentar uma máquina, um compressor, um gerador elétrico ou uma hélice. Atualmente, a maior parte da energia elétrica mundial é produzida com o uso de geradores movidos por turbinas.

Ainda de acordo com o autor, a turbina a vapor é atualmente o mais usado entre os diversos tipos de acionadores primários existentes. Uma série favorável de características concorreu para que a turbina a vapor se destacasse na competição com outros

acionadores primários, como a turbina hidráulica, o motor de combustão interna, a turbina a gás.

3 METODOLOGIA

O trabalho se classifica, segundo Gil (2002), como uma pesquisa experimental do tipo estudo de caso, pois apresenta as características de análise, avaliação e viabilidade técnica para instalação de sistema de cogeração de energia.

Os procedimentos metodológicos foram iniciados com uma revisão bibliográfica que teve por objetivo nivelar o conhecimento do grupo sobre o tema em questão e obter dados para discussão dos resultados.

O segundo passo consistiu em avaliar os materiais que possuíssem características compatíveis com o processo.

A seleção dos materiais que possuíam características compatíveis com o processo foi realizada no terceiro passo.

O quarto passo consistiu em realizar cálculos dimensionais para especificação dos equipamentos compatíveis com o processo.

Os resultados que comprovam a viabilidade técnica da instalação do sistema de cogeração de energia elétrica foram demonstrados no quinto passo.

O sexto passo caracterizou-se em avaliar a viabilidade financeira da instalação do sistema de cogeração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando avaliar a viabilidade técnica da implantação do sistema de cogeração de energia elétrica em plantas de incineração, utilizou-se como base o fluxograma de processos de uma unidade de incineração existente representado pela FIG. 3.

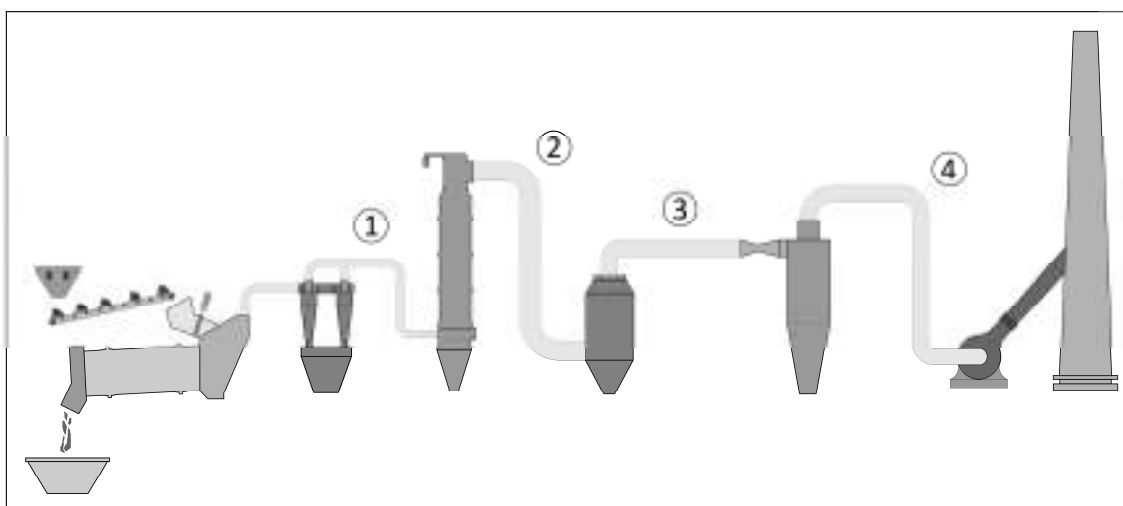


Figura 3 – Fluxograma de processos.

Foi realizado um estudo para análise do potencial de geração de energia em cada ponto do sistema da FIG. 3, para a escolha do ponto de instalação foram consideradas as seguintes condições em relação aos gases de processo:

- Vazão volumétrica de gases;

- Temperatura dos gases;
- Concentração de materiais particulados na corrente gasosa;
- Densidade dos gases;
- Composição química dos gases.

A FIG. 4 busca demonstrar, por meio de um fluxograma, os principais equipamentos que deverão

ser instalados para o sistema de cogeração e também demonstra a relação existente entre eles.

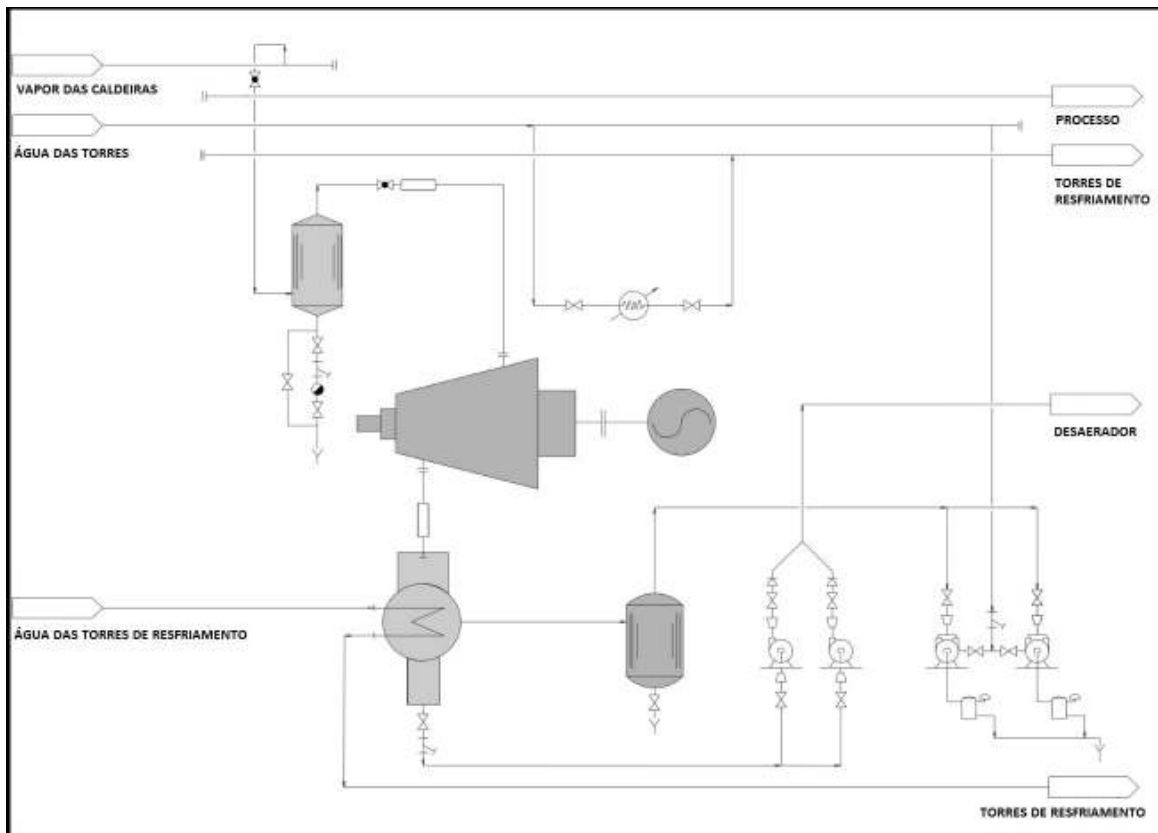


Figura 4 – Ciclo de cogeração de energia.

4.1. PONTOS DE ANÁLISE

Os dados informados na TAB.1 foram obtidos no processo de incineração atualmente utilizado no polo petroquímico e estão também baseados nas seguintes considerações:

- Resíduo: solo contaminado com 30% de $C_{10}H_{22}$ e umidade de 25%;
- Vazão mássica de alimentação de resíduos: 4.000 kg/h;

- Autonomia: 624 h/mês.

Analisando a TAB. 1, pode-se identificar que o ponto 02 apresenta dados característicos importantes como à vazão volumétrica de $135.028 \text{ Am}^3/\text{h}$ e a temperatura de 1.100°C . Os dados citados são importantes porque, percebe-se, neste caso, que os gases do ponto 02 oferecem as melhores condições de serem utilizados como meio de troca de calor.

Tabela 1
Dados característicos dos pontos de análise (01, 02, 03 e 04).

Item	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04
Vazão volumétrica (Am ³ /h)	18.693	135.028	77.964	63.528
Vazão volumétrica (Nm ³ /h)	5.245	26.848	44.522	43.940
Vazão mássica (kg/h)	6.598	33.376	44.490	48.244
Temperatura (°C)	700	1.100	250	120
Concentração de materiais particulados (mg/Nm ³)	1.101	215	129,8	35,1
Densidade (kg/m ³)	0,35	0,25	0,57	0,87

Fonte – Polo petroquímico – Camaçari, 2012.

4.2. DADOS CARACTERÍSTICOS

Utilizando as informações obtidas na TAB. 2 realizou-se a separação das composições mássica e molar dos gases do ponto escolhido para a instalação do sistema

de cogeração, como já foi definido anteriormente. A partir destas informações foi possível identificar o calor específico dos gases envolvidos no processo conforme TAB. 3.

Tabela 2
Informações do processo fornecidas pela usina de incineração do Polo Petroquímico de Camaçari/BA.

Componente	Fração Mássica		Fração Molar	
	Base Seca	Base Úmida	Base Seca	Base úmida
Gás carbônico (CO ₂)	0,111	0,100	0,074	0,063
Oxigênio (O ₂)	0,108	0,097	0,100	0,085
Nitrogênio (N ₂)	0,781	0,705	0,826	0,700
Hidrocarboneto (C ₁₀ H ₂₂)	-	-	-	-
Água (H ₂ O)	-	0,098	-	0,152
Total	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela 3

Calor específico dos gases do processo.

Calor Específico dos Gases	
Cp CO ₂ [kJ/kg. °C]	1,22
Cp O ₂ [kJ/kg. °C]	1,08
Cp N ₂ [kJ/kg. °C]	1,11
Cp H ₂ O [kJ/kg. °C]	2,22

Fonte - Perry's Chemical Engineers' Handbook, 1999.

4.2.1 CALDEIRA

Com as características dos gases já estabelecidas e a classe de caldeiras já definida, adotou-se a empresa IPE (Industrial Process Engineering) como base de informações para consulta do processo de geração de energia.

Utilizaram-se os conceitos de caldeira de geração de vapor e a experiência da empresa IPE para selecionar as possíveis classes de caldeiras, que melhor se adequaram ao processo de geração de vapor com utilização de gases de processo. As classes de caldeiras estudadas se resumem a aquatubulares e flamotubulares. Para facilitar a seleção da classe de caldeira buscou-se apresentar as principais características de cada caldeira, sejam pontos negativos ou positivos, mas que possam influenciar no processo de geração de vapor.

A TAB. 4 apresenta as vantagens e desvantagens das caldeiras selecionadas para estudo. Estas vantagens e desvantagens serão analisadas a fim de selecionar a classe de caldeira cujos benefícios resultem em facilidade de operação, segurança de processo, tecnologia, capacidade de produção de vapor e condições de aproveitamento do potencial energético da usina.

Tabela 4

Vantagens e desvantagens das caldeiras aquatubulares e flamotubulares.

Vantagens	
Aquatubular	Flamotubular
Maior taxa de produção de vapor por unidade de área de troca de calor.	Construção fácil e de custos relativamente baixos.
Possibilidade de utilização de temperaturas superiores a 450°C e pressões acima de 60 kgf/cm ²	Construção robusta.
Partida rápida em razão do volume reduzido de água nos tubos.	Exigem pouca alvenaria, tornando fácil sua locação.
Vida útil pode chegar a 30 anos.	Utilizam qualquer tipo de combustível, seja ele: líquido, gasoso ou sólido.

Desvantagens	
Pode custar até 50% mais que uma caldeira flamotubular de capacidade equivalente.	Pressão limitada em torno de 15kgf/cm ² , devido à espessura da chapa dos corpos cilíndricos crescer com o diâmetro.
Construção mais complexa.	Partida lenta, em função de se aquecer todo o volume de água.
Exigem tratamento de água muito cuidadoso.	Baixa capacidade e baixa produção de vapor por unidade de área de troca de calor.
Quando operando em altas pressões a bomba de circulação apresenta problemas constantes.	Circulação de água deficiente.
Custo de manutenção relativamente alto.	Dificuldade para instalação de superaquecedores, economizadores e preaquecedores de ar.

As vantagens da classe de caldeiras aquatubulares se encaixam no perfil do ponto 02 pelas seguintes características:

- 1.º) Maior taxa de produção de vapor por unidade de área de troca de calor;
- 2.º) Possibilidade de utilização de temperaturas superiores a 450°C e pressões acima de 60 kgf/cm²;
- 3.º) Vida útil pode chegar a 30 anos;
- 4.º) Exigem tratamento de água muito cuidadoso (*).

(*) No polo industrial onde a usina de incineração em estudo está implantada, já existe um rigoroso sistema de ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) que abastece todo o polo. Sendo assim, a desvantagem de um tratamento de água muito cuidadoso é amenizada.

Os dados contidos nas TAB. 1, 2 e 3 foram enviados a IPE para consulta de um sistema de geração de energia a partir de gases de processo. A Tabela 5 mostra os resultados fornecidos pela IPE.

As caldeiras aquatubulares são as mais comuns em se tratando de plantas termelétricas ou geração de energia elétrica. Definindo a caldeira a ser utilizada como aquatubular, o seu princípio de funcionamento é baseado na geração de vapor d'água realizada por meio de transferência de calor com os gases de processo, não havendo necessidade de queimadores para geração de gases aquecidos. (FIG. 5).

Tabela 5
Caldeira Aquatubular

Caldeira	
Item	Descrição
Tipo	Aquatubular
Circulação	Natural
Dados Técnicos	
Item	Descrição
Temperatura do Vapor na Saída (°C)	350
Pressão do Vapor na Saída (kgf/cm ²)	42
Capacidade de Produção de Vapor (toneladas/h)	12
Potência de Saída da Caldeira no Vapor (MW)	10,3
Eficiência Térmica Calculada (%)	85,5
Temperatura de Água de Alimentação (°C)	110
Temperatura dos Gases de Saída (°C)	200
Periféricos	
Item	Descrição
Paredes de Fechamento	Também chamadas de superfícies de radiação e convecção. Construídas por paredes d'água do tipo membrana, propiciando alta absorção térmica e minimizando a utilização de revestimentos refratários.
Balão de Vapor	Dimensionado de forma a absorver as possíveis flutuações na demanda de vapor, com o mínimo de variação no nível da caldeira.
Bancos Geradores	Construídos por feixes de tubos verticais, soldados aos coletores e conectados ao tambor de vapor.
Superaquecedores de Vapor	Construídos por feixes de tubos com a finalidade de aquecer o vapor de saída de 257°C para 350°C.
Economizadores	Tem como objetivo o aumento da eficiência de geração de vapor, através da troca térmica entre água de alimentação e os gases de saída da caldeira.
Sistema de Limpeza dos Tubos do Banco.	Utiliza um sistema de barras vibratórias (martelos batedores) nas partes mais quentes e sopradores de fuligem nas partes mais frias (economizadores).

Fonte - Industrial Process Engineering (IPE), 2011.



Figura 5 – Caldeira Aquatubular

Fonte - SOTOFILHOS, 2012, p. 4

4.2.2 TURBINA

Com a caldeira definida, realizou-se a análise do tipo de turbina que poderia ser utilizada no processo considerando as seguintes invariáveis de entrada:

- Pressão de Vapor de Admissão: 42 kgf/cm²;
- Temperatura de Vapor de Admissão: 350 °C;
- Vazão de Vapor: 15.000 kg/h.

Analisando os dados acima chegou-se a conclusão que uma turbina a vapor do tipo condensação (FIG. 6) seria suficiente para atender as necessidades do processo. Este tipo de turbina recebe esse nome pelo fato da pressão de saída (pressão de vapor de escape) ser menor que a pressão atmosférica (1,03 kgf/cm²). As tabelas 6a a 6d apresentam quatro simulações de desempenho realizadas

pelo fabricante em diferentes situações. Estas simulações são importantes para definir as condições de trabalho que a turbina estará exposta, também servem como base para a definição das capacidades de geração em cada situação proposta. Os dados técnicos da turbina selecionada estão representados na TAB. 7.

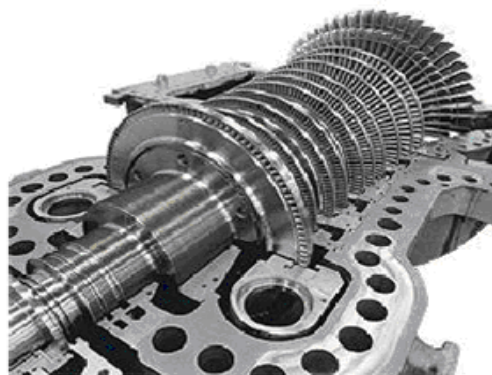


Figura 6 – Turbina a Vapor do tipo condensação.

Fonte - TGM TURBINAS, 2012, p.8

Tabela 6a
Dados de operação

Condição 01 – Vácuo – 0,16 kgf/cm²	
Dados de Operação	
Item	Descrição
Pressão de Vapor de Admissão (kgf/cm ²)	42
Temperatura de Vapor de Admissão (°C)	350
Pressão de vapor de escape* (kgf/cm ²)	0,16
Vazão de Vapor (kg/h)	15.000
Potência Gerada nos Bornes do Gerador (kW)	2.400
Rotação Nominal (rpm)	7.000
Consumo específico** (kg/kWh)	6,25
Eficiência (%)	34

Tabela 6b

Condição 02 – Vácuo – 0,30 kgf/cm²	
Dados de Operação	
Item	Descrição
Pressão de Vapor de Admissão (kgf/cm ²)	42
Temperatura de Vapor de Admissão (°C)	350
Pressão de vapor de escape* (kgf/cm ²)	0,30
Vazão de Vapor (kg/h)	15.000
Potência Gerada nos Bornes do Gerador (kW)	2.200
Rotação Nominal (rpm)	7.000
Consumo específico** (kg/kWh)	6,82
Eficiência (%)	31

Tabela 6c

Condição 03 – Vácuo – 0,70 kgf/cm²	
Dados de Operação	
Item	Descrição
Pressão de Vapor de Admissão (kgf/cm ²)	42
Temperatura de Vapor de Admissão (°C)	350
Pressão de vapor de escape* (kgf/cm ²)	0,70
Vazão de Vapor (kg/h)	15.000
Potência Gerada nos Bornes do Gerador (kW)	1.900
Rotação Nominal (rpm)	7.000
Consumo específico** (kg/kWh)	7,89
Eficiência (%)	27

Tabela 6d

Condição 04 – Atmosférico – 1,03 kgf/cm²	
Dados de Operação	
Item	Descrição
Pressão de Vapor de Admissão (kgf/cm ²)	42
Temperatura de Vapor de Admissão (°C)	350
Pressão de vapor de escape* (kgf/cm ²)	1,03
Vazão de Vapor (kg/h)	15.000
Potência Gerada nos Bornes do Gerador (kW)	1.800
Rotação Nominal (rpm)	7.000
Consumo específico** (kg/kWh)	8,33
Eficiência (%)	26

(*) Pressão de vapor de escape no vácuo;

(**) Consumo específico nos bornes do gerador;

Tabela 7

Dados Técnicos da Turbina selecionada para o processo.

Dados Técnicos	
Item	Descrição
Fabricante	Turbimaq
Modelo	TBQ MEGA400MC
Tipo	Condensação
Rotação Nominal (rpm)	7.000
Rotação de Desarme * (rpm)	7.700
Rotação de saída do Redutor (rpm)	1.800
Regulador de Velocidade	Eletrônico Woodward 2301D-ST
Conversor de Sinal Elétrico	Hidráulico Woodward CPC
Servo Atuador	Hidráulico
Sistema de Fechamento Rápido	Hidráulico
Número de Válvulas de Admissão	02
Selagem de Vapor	Labirinto
Selagem de Óleo	Labirinto
Tipo de Lubrificação	Forçada
Pressão Máxima de Vapor na Admissão (kgf/cm ²)	45
Temperatura máxima do Vapor na Admissão (°C)	420

Fonte: TURBIMAQ, 2012

(*) TRIP.

A condição atmosférica (condição 04 da TAB. 6) possibilita o condensador ser água ou ar, sendo que cada um demandará torres de resfriamento de diferentes dimensões.

O sistema de refrigeração do condensador a água (sistema que utiliza torres e bombas para resfriamento da água de refrigeração) demandará um investimento significativamente

maior em relação ao sistema de refrigeração a ar, porém terá uma área de ocupação muito menor. O motivo da área de ocupação ser menor é devido ao fato de que a água possui coeficiente de troca de calor maior, necessitando de uma área de ocupação menor que o ar. (TAB. 8)

Tabela 8
Dados Técnicos do Condensador

Dados Técnicos					
Valores (kgf/cm ²)	0,16	0,30	0,70	1,03 (água)	1,03 (ar)
Condição	Vácuo	Vácuo	Vácuo	Atm.	Atm.
Montagem	Horizontal				
Pressão de Trabalho (kgf/cm ²)	0,16	0,30	0,70	1,03 (água)	1,03 (ar)
Vazão Mássica (kg/h)	15.000				
Refrigeração	Água				
Temperatura de Água Refrigeração (°C)	30	30	30	-	-
Temperatura de Ar Refrigeração (°C)	-	-	-	30	30

Fonte – TURBIMAQ, 2012.

4.2.3 GERADOR

Para dimensionamento do gerador trifásico utilizado no sistema, consultou-se a empresa WEG, que realizou a seleção do gerador dentro da sua linha de produtos. O gerador trifásico indicado para o processo possui sistema de excitação do tipo Brushless, ou seja, sem escovas (TAB. 9).

Com os sistemas de excitação o gerador de corrente contínua ou com excitatriz de corrente alternada mais retificadores, a potência de excitação deve ser transferida de um equipamento excitatriz C.C, retificador - para o campo do gerador, exigindo para isto anéis coletores e escovas.

A FIG. 7 mostra esquematicamente o sistema simplificado de excitação sem escovas. O sistema mostrado consiste de uma excitatriz

de corrente alternada e um retificador rotativo montado no mesmo eixo do turbo-gerador. Também montado no mesmo eixo está um gerador a ímã permanente, cujo sinal de saída é retificado e comparado, no regulador de tensão, com o sinal retificado da tensão terminal. O erro resultante alimenta o campo da excitatriz de corrente alternada, que se assemelha a uma máquina de corrente contínua sem comutador, com enrolamento de campo no estator e armadura no rotor. A saída da armadura rotativa da excitatriz de corrente alternada é conduzida ao longo do eixo para o retificador rotativo, a saída do qual, por sua vez, alimenta o campo do gerador, ainda ao longo do eixo.

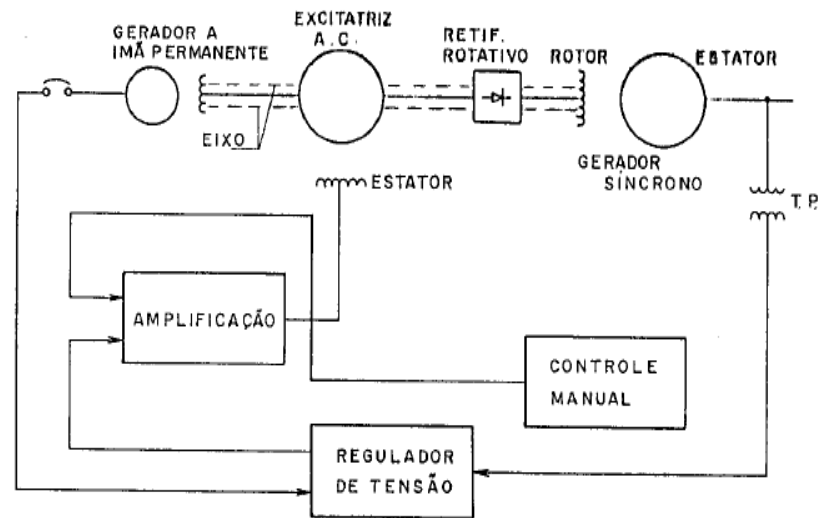


Figura 7 – Sistema de Excitação sem Escovas

Fonte - WEG, 2012

Tabela 9

Dados técnicos do Gerador.

Dados Técnicos	
Item	Descrição
Fabricante	WEG
Modelo	SPW 630
Potência Aparente (kVA)	3.750
Polaridade	4 (IV)
Tensão Nominal (kV)	13,8
Frequência (Hz)	60
Fator de Potência	0,8
Grau de Proteção	IP 54
Sistema de Refrigeração	Trocador de Calor ar-água (IC81W)
Tipo de Excitação	Brushless PMG
Forma Construtiva	B3
Classe de Isolamento	F

Fonte - WEG, 2012.

O rotor do gerador acomoda o enrolamento de campo e um enrolamento em gaiola para amortecimento, que compensa serviços em paralelo e com carga irregular.

Nos geradores de polos lisos o rotor possui o entreferro constante. Cada volta é isolada com material de isolamento classe F. O espaço entre cada volta é completamente preenchido com verniz. As bobinas de campo são também isoladas por meio de colares isolantes e laminado de vidro epóxi. Em máquinas de polos lisos o enrolamento amortecedor é construído ao longo de toda periferia do rotor, o que é de fundamental importância para suportar cargas repentinas, tais como de partidas de motores, desligamento e religamento de grandes cargas. Há também significativa redução na taxa de distorção harmônica com relação às máquinas de polos salientes. O rotor de polos lisos não possui saliências e reentrâncias, sendo praticamente um monobloco. Assim, ele se torna mais robusto e resistente às sobrevelocidades e disparos das turbinas.

No sistema Brushless (sem escovas), a potência para excitação do gerador é obtida através de uma excitatriz principal, que dependendo da forma construtiva da máquina pode ser montada do lado de fora da mesma, próxima ao mancal do lado não acionado. A excitatriz principal é constituída de: polos fixos que acomodam as bobinas do campo de excitação ligado em série, armadura e ponte retificadora girante. A tensão de saída do gerador permanece constante pelo controle do regulador eletrônico de tensão. O mesmo supervisiona a tensão de saída e alimenta o campo da excitatriz principal com a corrente necessária para gerar a tensão alternada, que

depois de retificada pelos diodos girantes, alimenta o campo do gerador.

4.3. GERAÇÃO DE ENERGIA

Com base na seleção e especificação dos equipamentos citados nos itens anteriores realizou-se um pequeno resumo dos componentes a serem utilizados:

- Caldeira a vapor tipo aquatubular;
- Turbina a vapor tipo condensação;
- Gerador trifásico com excitação Brushless.

Os cálculos da capacidade de geração de energia foram baseados no ponto 02 da instalação (ponto considerado ideal para instalação do sistema de cogeração) e também foram considerados como base dos cálculos todos os equipamentos especificados no item 4.2.

$$E_r = \frac{W_c \times C_{p\text{médio}} \times [(T_1 + T_2)/2]}{1000} \quad (1)$$

E_r = energia recuperada no resfriamento dos gases (MW);

W_c = vazão mássica de gases de combustão (kg/s);

$C_{p\text{médio}}$ = calor específico médio (kJ/kg°C);

T_1 = temperatura de entrada dos gases na caldeira (°C);

T_2 = temperatura de saída dos gases na caldeira (°C).

Assim,

$$Er = \frac{(33376 \text{ kg/h}) \times (1,22 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) \times (1100^\circ\text{C} + 35^\circ\text{C})}{1000} \times 2$$

$$Er = 8,2 \text{ MW}$$

4.3.1 TOTAL DE ENERGIA RECUPERADA NA CALDEIRA

Conforme informado na TAB. 5, a eficiência de recuperação térmica considerada da caldeira a vapor é de 85,5% ficando assim:

$$Tec = Er \times Ec \quad (2)$$

$$Tec = (8,20 \text{ MW}) \times (85,5\%)$$

$$Tec = 7,01 \text{ MW}$$

Onde:

Tec = total de energia recuperada na caldeira (MW);

Er = energia recuperada no resfriamento dos gases (MW);

Ec = eficiência de recuperação térmica da caldeira.

A partir da Eq. 2, realizaram-se os cálculos para energia recuperada na turbina considerando as quatro condições citadas na TAB.6.

Invariáveis de processo:

- Pressão de Vapor de Admissão: 42 kgf/cm²;
- Temperatura de Vapor de Admissão: 257 - 350 °C;
- Vazão de Vapor: 15.000 kg/h.

$$Tet = Tec \times Et \quad (3)$$

Onde:

Tet = Total de energia recuperada na turbina (MW);

Tec = Total de energia recuperada na caldeira (MW);

Et = Eficiência de recuperação térmica da turbina (%).

Sendo assim, aplicando a Eq. 3 pode-se calcular o Total de energia recuperada na caldeira em todas as condições:

Condição 01

$$Tet = (7,01 \text{ MW}) \times (34\%)$$

$$Tet = 2,38 \text{ MW}$$

Condição 02

$$Tet = (7,01 \text{ MW}) \times (31\%)$$

$$Tet = 2,17 \text{ MW}$$

Condição 03

$$Tet = (7,01 \text{ MW}) \times (27\%)$$

$$Tet = 1,89 \text{ MW}$$

Condição 04

$$Tet = (7,01 \text{ MW}) \times (26\%)$$

$$Tet = 1,82 \text{ MW}$$

Analisando os resultados, dados anteriormente, é possível verificar que a condição 01 apresenta a melhor eficiência, porém deve ser considerado o pior caso (condição 04) devido à variação do teor de hidrocarbonetos presente nos resíduos, que podem ocasionar variação nos resultados. Todos os cálculos relacionados à viabilidade técnica levou em consideração a condição 04

por oferecer margem de segurança adequada à instalação do sistema.

Adotando os extremos inferior e superior das condições 01 a 04, realizou-se o cálculo de potência gerada (Eq. 4), considerando fator de potência de 0,80 para o gerador especificado.

$$S = \frac{Tet}{0,80} \quad (4)$$

Onde:

S = Potência aparente em VA.

Condição 01

$$S = \frac{2,38 \text{ MW}}{0,80} \quad S = 2,97 \text{ kVA}$$

Condição 04

$$S = \frac{1,82 \text{ MW}}{0,80} \quad S = 2,27 \text{ Kva}$$

4.4. CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO

A partir das informações obtidas com a definição de caldeira, turbina e gerador, realizou-se uma estimativa dos principais custos para instalação.

Os custos reais de implantação não foram possíveis de serem analisados, uma vez que não foram fornecidos pela usina os projetos detalhados. Projetos mecânicos seriam necessários para avaliar com exatidão as modificações a serem realizadas na estrutura existente. Diagramas elétricos e de automação seriam necessários para avaliar a integração entre o sistema supervisor existente e o sistema de cogeração proposto.

A TAB. 10 apresenta um resumo de custos dos principais equipamentos em discussão neste trabalho.

Tabela 10

Planilha de custos.

Planilha de Custos – Componentes Principais				
Item	Descrição	Custo Parcial	Custo Total	
Caldeira				
01	Caldeira Aquatubular	R\$ 2.500,00,00	R\$ 7.820,000,00	
02	Balão de Vapor			
03	Banco Geradores			
04	Superaquecedores de Vapor			
05	Economizadores			
06	Desaerador			
07	Periféricos			
Turbina				
08	Turbina Múltiplo Estágio de Condensação	R\$ 4.620.000,00		
09	Condensador			
10	Turbo Redutor Múltiplo Estágio de Condensação			
11	Torre de Resfriamento			
12	Bombas de Recirculação			
13	Periféricos			
Gerador				
14	Gerador Trifásico	R\$ 700.000,00		

Fonte: WEG, TURBMAQ, IPE, 2011.

Obs.: Os custos informados na TAB.10, além do fornecimento do equipamento também contemplam supervisão integral de montagem, comissionamento, treinamentos e start-up.

O cronograma de instalação da TAB. 11 foi elaborado com base nos prazos de entrega fornecidos pelos fabricantes dos referidos componentes.

Tabela 11
Cronograma.

Cronograma				
Item	Componente	Prazo de Entrega	Montagem	Término
01	Caldeira Aquatubular	120 dias corridos (88 dias úteis)	60 dias corridos (44 dias úteis)	375 dias corridos (*)
02	Balão de Vapor			
03	Bancos Geradores			
04	Superaquecedores de Vapor			
05	Economizadores			
06	Desaerador			
07	Periféricos			
08	Turbina Múltiplo Estágio de Condensação	270 dias corridos (198 dias úteis)	75 dias corridos (55 dias úteis)	
09	Condensador			
10	Turbo Redutor Múltiplo Estágio de Condensação			
11	Torre de Resfriamento			
12	Bombas de Recirculação			
13	Periféricos			
14	Gerador Trifásico	210 dias corridos (154 dias úteis)	60 dias corridos (44 dias úteis)	

Fonte: WEG, TURBMAQ, IPE, 2011.

(*) Considerou-se que todos os componentes serão fabricados e montados em 345 dias corridos. Comissionamento, treinamentos e

start-up considerou-se um período de 30 dias corridos, resultando em 365 dias corridos para a entrega do equipamento.

Para estimativa de custos de mão de obra, foram considerados os profissionais necessários para execução da obra. Os custos dos profissionais estão inclusos no fornecimento de cada componente referenciado na TAB. 10. Para os dados da TAB. 12 as seguintes restrições foram consideradas:

- Período de trabalho: 75 dias corridos (55 dias úteis);

- Expediente: 08:00 às 12:00 hs e 13:00 às 17:00 hs;

-Dias trabalhados (semana): 05 (segunda-feira à sexta-feira);

- Dias trabalhados (mês): 22;

- Horas trabalhadas por dia: 08;

- Horas trabalhadas por mês: 176.

Tabela 12

Custos da mão de obra

Planilha de Custos – Mão de Obra				
Profissional	Qtd.	R\$/h	Custo Parcial R\$ (*)	Custo Total R\$ (**)
Coordenador de Montagem	01	150,00	66.000,00	356.400,00
Ajudante	04	22,00	38.720,00	
Montador	06	30,00	79.200,00	
Soldador/ Montador	04	38,00	26.400,00	
Eletricista	02	30,00	26.400,00	
Técnico em Eletrotécnica	01	60,00	26.400,00	
Engenheiro de Automação	01	120,00	52.800,00	

Tabela 13

Resumo de investimentos

Item	Descrição	Custo Parcial (R\$)	Investimento (R\$)
01	Caldeira Geradora de Vapor	2.500.000,00	8.176.400,00
02	Turbina Múltiplo Estágio de Condensação	4.620.000,00	
03	Gerador Trifásico	700.000,00	
04	Mão de Obra	356.000,00	

Tabela 14

Cálculo do retorno de investimento

Análise de Consumo				
Consumo Atual (kWh)	R\$/kWh	Geração (kWh)	Excedente (kWh)	Retorno Mensal (R\$)
550	0,175	1.820	1.270	160.020,00
Análise de Geração				
Geração Mensal (MW)	Geração Anual (MW)	Excedente anual (MW)	Investimento (R\$)	Retorno de Investimento
1.310,4	15.724,8	10.972,8	8.176.400,00	4 anos e 3 meses

A Tabela 13 foi definida com base nos custos dos equipamentos que já tinham sido definidos neste trabalho e, a TAB. 14, foi elaborada com base nas informações de consumo energético adquiridas no polo petroquímico.

A COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia) é a responsável pelo fornecimento de energia elétrica no Polo Petroquímico, sendo, as informações de consumo e custo de energia fornecido pela usina. Para os custos referentes à geração de energia, retorno mensal e retorno de investimento considerou-se a possibilidade de comercializar a energia excedente pelo mesmo valor de aquisição, ou seja, R\$ 0,175/kWh. O retorno mensal foi calculado considerando-se a energia excedente de 1.270 kWh e o custo de R\$ 0,175/kWh. Para os custos de retorno de investimento foram considerados os valores de investimento (R\$ 8.176.400,00) e a comercialização do excedente anual (R\$ 10.972,8 MW) com a tarifa de R\$ 0,175/kWh.

5. CONCLUSÃO

Pode-se verificar que a usina apresenta potencial de geração de energia significativo. Os cálculos apresentados justificam tecnicamente a instalação do sistema de cogeração de energia na usina, porém, a viabilidade de instalação está diretamente relacionada ao custo de implantação do sistema. Na usina em estudo, a empresa responsável pela operação e gerenciamento do projeto optou por não instalar o sistema de cogeração. O motivo está relacionado ao custo de investimento e retorno financeiro da usina, segundo a gerência, somente após a usina apresentar retorno financeiro significativo, o sistema de cogeração poderá ser instalado. A usina foi construída já concebendo um futuro sistema de cogeração, considerando área de ocupação de um sistema similar, uma vez que, os custos com combustível (gás natural) necessário para funcionamento do incinerador é muito elevado, podendo resultar na não viabilidade financeira da usina. A cogeração

apesar de ser bem vista como complemento de um processo de incineração ainda sofre bastante resistência por parte dos grupos ambientais que enxergam o processo de incineração, em geral, como um problema ambiental.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema de cogeração de energia quando bem dimensionado pode oferecer grande economia para o processo de incineração de hidrocarbonetos. Os equipamentos (caldeira, turbina e gerador) possuem custos altos, mas

a durabilidade e economia que são capazes de fornecer justificam a sua instalação.

O ideal para amenizar os custos é que o sistema de cogeração seja implantando junto com a instalação do incinerador durante sua construção, já sua posterior instalação pode elevar de forma considerável os custos.

AGRADECIMENTOS

Às Empresas WEG, TURBMAQ e IPE pelo fornecimento dos dados de seus equipamentos que foram de extrema importância para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

CARMO, A. R. *Análise da viabilidade do co-processamento de solos contaminados por borra oleosa em fornos de clínquer Portland*. 2003. 48f. Monografia (Mineralogia e Geotectônica). Instituto de Geociências, Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DEMPSEY, C. R.; OPPELT, E. T. *Incineração de resíduos perigosos: uma revisão crítica atual*. Traduzido por Milton Norio Sogobe. São Paulo: CETESB/EET, 1987. 80 p. Título original: *Incineration of hazardous waste: a critical review update*.

ECOLING PARTNER AG. *Ecology-engineering consulting company for environmental protection and power supply installations general planning*. Disponível em: <http://www.ecoling.ch/EN/incinerationplant.htm> >. Acesso em: 7 abr. 2011.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991. 159p.

GRILLO, N. L. *Uma avaliação ambiental de alguns processos industriais nos municípios de Paulínia, Americana, Limeira e Piracicaba*. 2003. 233f. Tese (Doutorado em Planejamento

de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GRIPP, W. G. *Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo*. São Carlos: 1998. 208 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.264. *Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos*. Data da legislação: 26/08/1999 – Publicação DOU: 20/03/200. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res00/res26400.html>.> Acesso em: 08 mar. 2012.

OSSBERGER. Turbinenfabrik, *The concept of water power*, Catálogo sobre características da turbina de fluxo cruzado, pp.1-16, 1998.

SOUZA, G. P.; HOLANDA, J. N. F. *Comportamento de sinterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero. Cerâmica*. São Paulo, v. 49, n. 311, 128-132p. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s036669132003000300004&lng=pt&m=iso.> Acesso em: 7 fev. 2012. doi: 10.1590/S0366-69132003000300004.

URURAHY, A.F.P.; PEREIRA Jr. N.; MARTINS, M.D.M. *Desempenho de um biorreator do tipo CSTR no processo de degradação de borra oleosa*. Rio de Janeiro. Boletim Técnico da Petrobrás. n. 41, 125-132p. Jul-dez 1998^a. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/boletim/Boletim_43_3_4/art3integra.pdf.> Acesso em: 16 abr. 2012.

VIRGOLINO, A. K. *Extração do óleo e caracterização dos resíduos da borra de petróleo para fins de reuso*. 2007. 154 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.