

ANA LÚCIA TICIANELLI GARMBIS

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE MOTORIZAÇÃO ELÉTRICA DO
SOPRADOR NO CICLO REGENERATIVO DA UNIDADE DE
CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO EM UMA REFINARIA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica com Ênfase em Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Guaratinguetá
2011

G213a Garmbis, Ana Lucia Ticianelli
Análise da viabilidade de motorização elétrica do soprador no ciclo regenerativo da unidade de craqueamento catalítico fluidizado em uma refinaria / Ana Lucia Ticianelli Garmbis. – Guaratinguetá : [s.n], 2011.
51 f.
Bibliografia: f. 45-47

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.
Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

1. Turbinas a vapor 2. Motor elétrico I.Título

CDU 621.165

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE MOTORIZAÇÃO DO SOPRADOR NO CICLO
REGENERATIVO DA UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO
FLUIDIZADO EM UMA REFINARIA


ANA LÚCIA TICIANELLI GARMIBIS


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA COM ÊNFASE EM
ENERGIA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
UNESP-FEG


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

ANA LÚCIA TICIANELLI GARMBIS

NASCIMENTO	28.03.1986 – IACANGA / SP
FILIAÇÃO	José Luiz Ticianelli Sandra Maria Polato Ticianelli
2001/2003	Curso Técnico – Mecânica Escola Técnica Professor Everardo Passos
2006/2006	Curso de Formação - Inspetor de Equipamentos e Instalações Universidade Petrobras
2006/2011	Curso de Graduação – Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

Dedicatória

de modo especial, ao meu marido, Alexandre Galiani Garbisi, que sempre me incentivou e nunca mediu esforços para me ajudar nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho e guiado meus passos, agradeço pela minha vida, pela minha saúde, pela minha capacidade, pela minha família e por meus amigos.

Aos meus pais, José Luiz e Sandra, agradeço por todo apoio, compreensão e incentivo dados ao longo de minha vida.

Pela orientação, direcionamento e apoio para a realização desse trabalho, agradeço ao meu orientador, Professor Dr. José Antônio Perrella Balestieri.

Agradeço à Petrobras, por ter fornecido subsídios para a realização desse trabalho. Em particular, agradeço aos engenheiros Andréa dos Santos Julião, Eduardo Camões Diógenes de Carvalho, Eduardo Oliveira e Neemias Reis Ferreira, pelo incentivo na realização desse estudo e apoio profissional.

Epígrafe

"As dificuldades que você encontra se resolverão conforme você avançar. Prossiga, e a luz aparecerá, e brilhará com clareza crescente em seu caminho."

Jean le Rond D'Alembert

GARMBIS, A. L. T. **Análise da viabilidade de motorização elétrica do soprador no ciclo regenerativo da unidade de craqueamento catalítico fluidizado em uma refinaria.** 2011. 50 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

As mudanças climáticas, associadas ao aquecimento global que, por sua vez, é atribuído pelos especialistas ao agravamento do efeito estufa, representam um dos maiores problemas ambientais da atualidade. Suas causas estão diretamente relacionadas à atividade humana, principalmente ao uso de combustíveis fósseis. Nesse contexto, as companhias são desafiadas a aumentar sua eficiência energética, a fim de diminuir o impacto ambiental e trabalhar na direção do chamado tripé do desenvolvimento sustentável que tem foco nos aspectos sociais, econômicos e ambientais de uma estratégia de negócio. O primeiro passo que uma empresa pode dar em relação a este aspecto é conduzir um inventário das suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). A redução das emissões de GEE em uma refinaria pode ser conseguida pela substituição de turbinas a vapor por motores elétricos em acionamento de grandes máquinas, essa redução é conseguida pelo alívio no consumo de vapor por energia elétrica disponível ou comprada. Um aspecto importante associado à redução de emissão de GEE é o melhor desempenho do Índice de Intensidade de Energia (IIE). O objetivo do trabalho foi analisar a viabilidade de motorização do soprador no ciclo regenerativo da unidade de craqueamento catalítico fluidizado em uma refinaria específica. Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados dois métodos, a triagem inicial e a otimização de cenários com o auxílio do software Butil. Os resultados obtidos sinalizam que a partir de determinado custo de gás natural esta substituição se torna favorável. Além disso, há uma grande redução de emissão de CO₂ pela queima de combustível evitada.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina a vapor, motor elétrico, soprador, unidade de craqueamento catalítico fluidizado.

GARMBIS, A. L. T. **Feasibility analysis of a blower electric motorization in the regenerative cycle for the fluidized catalytic cracking unit of a refinery.** 2011. 50 f. Monograph (Undergraduate Work in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

One of the biggest environmental problems of today is the climate change. Experts affirm that this global warming is related to the greenhouse effect. Its causes are directly related to human activity, especially the use of fossil fuels. In this context, companies around the world are challenged to improve energy efficiency in order to reduce the environmental impact and work toward the so-called tripod of sustainable development that focuses on the social, economic and environmental aspects of a business strategy. The first step a company can make in this regard is to conduct an inventory of emissions of greenhouse gases (GHGs). The reduction of GHG emissions in a refinery can be achieved by replacing steam turbines with electric motors to drive big machines, this reduction is achieved by relieving the steam consumption for electric power available or purchased. An important aspect associated with the reduction of GHG emissions is the best performance of the Energy Intensity Index (ERI). The objective of this study was to analyze the feasibility of the blower motorization in the regenerative cycle of a fluidized catalytic cracking unit at a specific refinery. For development work, two methods were used, the initial screening and optimization scenarios with the help of software Butyl. The results indicate that after a certain cost of natural gas this substitution becomes favorable. In addition, there is a large reduction of CO₂ emissions avoided by burning fuel.

KEYWORDS: Steam turbine, electric motor, blower, fluidized catalytic cracking unit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema básico do CCF (CANUTO, 2010).....	17
Figura 2 - Quadro geral das classificações dos compressores (BROWN, 2005).....	21
Figura 3 - Área de aplicação típica de cada tipo de compressor (BROWN, 2005).	21
Figura 4 - Representação da vazão limite de surge (RODRIGUES, 1991)	23
Figura 5 - Transformação de energia no motor (FILIPPO FILHO, 2000)	25
Figura 6 - Princípio de funcionamento de um motor elétrico (LEITÃO, 2009)	26
Figura 7 - Representação esquemática dos diversos tipos de motores elétricos (LEITÃO, 2009).....	28
Figura 8 - Sistema de geração termelétrica da REVAP	30
Figura 9 - Curvas representando os resultados da otimização do Butil	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns critérios gerais de classificação para turbinas a vapor (CLEVELAND, 2004).....	24
Tabela 2 - Cenários com os preços do gás natural e da energia elétrica	36
Tabela 3 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial	48
Tabela 4 – Resumo dos resultados da triagem inicial.....	37
Tabela 5 - Resumo dos resultados da otimização do Butil.....	38
Tabela 6 - Composição típica de GN (base volumétrica).....	41
Tabela 7 – Estimativa da redução da emissão de CO ₂ a partir da substituição da TV por ME.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
1.2	Apresentação dos capítulos.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Craqueamento catalítico	16
2.2	Compressor	19
2.3	Turbina a vapor	24
2.4	Motor elétrico.....	25
3	SISTEMA DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA DA REVAP	29
3.1	Consumidores de vapor de alta pressão	31
3.2	Consumidores de vapor de média pressão	32
3.3	Consumidores de vapor de baixa pressão	33
4	PROCEDIMENTO DO ESTUDO	34
5	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	37
5.1	Triagem inicial	37
5.2	Otimização dos cenários.....	38
5.3	Resultados e discussões	39
5.3.1	Análise através Custo total líquido	39
5.3.2	Análise através da redução da emissão de CO₂	41
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
	REFERÊNCIAS	45
	ANEXO – Tabela 3 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial.....	48

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, associadas ao aquecimento global que, por sua vez, é atribuído pelos especialistas ao agravamento do efeito estufa, representam um dos maiores problemas ambientais da atualidade. Suas causas estão diretamente relacionadas à atividade humana, principalmente ao uso de combustíveis fósseis (IPCC, 2007). Segundo o IEA (2010), os combustíveis fósseis – petróleo, carvão e gás natural – continuarão sendo as fontes de energia dominantes nos próximos anos. Dessa maneira, um dos principais dilemas da sociedade moderna é o paradoxo relacionado ao consumo de energia, que viabiliza desenvolvimento e crescimento econômico ao mesmo tempo em que apresenta grandes desafios ambientais.

Nesse contexto, as companhias são desafiadas a aumentar sua eficiência energética, a fim de diminuir o impacto ambiental e trabalhar na direção do chamado tripé do desenvolvimento sustentável que tem foco nos aspectos sociais, econômicos e ambientais de uma estratégia de negócio. O primeiro passo que uma empresa pode dar em relação a este aspecto é conduzir um inventário das suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Empresas que demonstram que a sua capacidade de gerar mais lucros em longo prazo está associada a uma filosofia de desenvolvimento sustentável compõem um rol seletivo de empresas participantes do Índice Dow Jones de Sustentabilidade, um índice da bolsa de valores criado em 1999 (CHAN, 2006).

Segundo Chan (2006), a indústria de refino de petróleo, além de ser produtora, também é grande consumidora de combustíveis. O uso de energia é também a principal fonte de emissões dessa indústria, o que faz com que a melhoria da eficiência energética seja uma oportunidade atraente para reduzir emissões e custos operacionais.

Um exemplo de oportunidade de redução das emissões de gases de efeito estufa em uma refinaria seria a substituição do acionamento de grandes máquinas. Muitas refinarias têm equipamentos que tanto podem ser acionados por motor elétrico ou por turbina a vapor. Exemplos típicos são bombas de água de alimentação de caldeiras e bombas de carga de petróleo. Historicamente tais sistemas foram

construídos com acionamento mecânico para aumentar a confiabilidade. Hoje, a maioria das refinarias tem excelente conexão com a rede elétrica externa e até mesmo plantas de cogeração dentro de suas unidades, que suprem a demanda de energia elétrica, e a escolha entre usar um motor elétrico ou uma turbina a vapor pode ser feita através de fundamentos econômicos e não em função da confiabilidade. Devem ser considerados abatimentos nesses valores de acordo com a forma pela qual a energia elétrica será obtida. No entanto, muitas vezes é difícil conceber essa quebra de paradigma (CHAN, 2006).

O uso da energia em refinarias, em bases metodológicas muito próximas, é avaliado aplicando-se métodos desenvolvidos pela Solomon Associates e pela KBC Consultants a partir da taxa de consumo energético real da refinaria em comparação com o consumo energético médio de uma refinaria padrão, para a qual são consideradas as melhores tecnologias existentes (*BAT, best available technologies*) (BALESTIERI; DIAS, 2008).

Este índice é conhecido como Índice de Intensidade Energética (IIE) e é definido pela razão entre o consumo energético real da refinaria e o consumo energético médio de uma refinaria padrão. O IIE se revela uma importante ferramenta para a análise comparativa entre distintas refinarias. A média do consumo energético da refinaria padrão é assumida com o valor 100 por cento, levando em conta os usos energéticos típicos de cada processo que compõe o refino. O consumo energético real da unidade que se pretende avaliar é calculado com base nos dados reais coletados pelo sistema supervisorio para cada um dos processos de refino. Se a razão entre esses valores se situa abaixo de 100 por cento, há indicativos de que a unidade em avaliação é mais eficiente que a refinaria padrão; por outro lado, se o valor se situa acima de 100 por cento, ela se revela ser menos eficiente (PHYLIPSEN et al., 2002).

É importante salientar que, pelo fato do IIE ser uma metodologia vinculada a empresas de prestação de serviços para o setor de petróleo, alguns esclarecimentos se fazem necessários: as empresas detentoras da metodologia especificam os parâmetros de decisão do modelo, determinando aqueles que consideram apresentar maior impacto sobre o referido índice para a busca de melhores indicações; são também as

empresas detentoras da metodologia quem, com alguma regularidade, ajustam as curvas de parametrização das tecnologias que representam as melhores práticas de produção e que compõem a “refinaria padrão”, corrigindo ao longo do tempo o padrão para que possam ser estabelecidos patamares mais exigentes em decorrência do avanço tecnológico e aprimoramento de procedimentos (BALESTIERI; DIAS, 2008).

Um aspecto importante associado à redução de emissão de GEE é o melhor desempenho do IIE, avaliado mensalmente. O IIE é estipulado através da equação (1).

$$\text{IIE} = \frac{\text{Consumo real de energia}}{\text{Consumo padrão de energia}} \cdot 100 \quad (1)$$

Nesta equação, o consumo padrão é obtido basicamente em função da carga das unidades, da porcentagem de coque gerado na unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado (CCF) e do grau API da carga da destilação atmosférica e a vácuo. O consumo real de energia é uma função da quantidade de combustível queimado e da quantidade de energia elétrica (EE) comprada, sendo que a EE comprada possui um fator de correção que a favorece. Desta maneira, tentando reduzir a emissão de GEE, consegue-se diminuir a queima de combustível e melhorar o IIE.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia é a análise da viabilidade de motorização do soprador no ciclo regenerativo da Unidade de craqueamento catalítico fluidizado da Refinaria Henrique Lage – REVAP, da Petrobras.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são a familiarização com os conceitos de máquinas dinâmicas, a pesquisa e a aplicação de métodos discutidos em artigos específicos do ramo energético, o uso do software desenvolvido e utilizado para otimização do balanço termelétrico de utilidades (Butil) em plantas do sistema Petrobras e a análise de dados obtidos através de simulações neste software.

1.2 Apresentação dos capítulos

São apresentadas a seguir breves descrições dos capítulos que compõem esse trabalho. Neste capítulo, tem-se a introdução dos assuntos a serem discutidos, com uma visão geral do trabalho. Neste capítulo são mostrados também os objetivos gerais e específicos a serem atingidos, além das suas justificativas.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do assunto, abordando os temas craqueamento catalítico fluidizado, compressor, turbina a vapor e motor elétrico. São apresentadas as definições gerais de cada um desses temas.

No capítulo 3 é descrito o sistema de geração termelétrica da REVAP com seus principais fornecedores e consumidores.

No capítulo 4 está definida a metodologia utilizada na realização do trabalho.

No capítulo 5 é mostrado o desenvolvimento do trabalho em si, com as discussões e os resultados obtidos nos métodos de análise – triagem inicial e otimização dos cenários.

No capítulo 6 são feitas as considerações finais desse trabalho, apresentando as conclusões mais importantes e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Craqueamento catalítico

A unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado (CCF) surgiu na década de 1940 e baseia-se na fluidização de sólidos. Existem diversos tipos de unidades de CCF, diferindo uma das outras pelo arranjo relativo entre o reator e o regenerador. As grandes empresas projetistas de CCF são a KELLOGG, a UOP e a EXXON MOBIL. Este tipo de unidade é composto por três seções, sendo a primeira conhecida como seção de reação ou conversão, a segunda como seção de recuperação dos gases e a terceira como seção de tratamentos. A seção de reação ou conversão é o local onde se passam as reações de processo, sendo composta de equipamentos de reação e de regeneração do catalisador. A seção de recuperação dos gases recebe as frações leves convertidas e fraciona-as em nafta de craqueamento (gasolina), gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás combustível. Possui também uma torre que possibilita o desmembramento do GLP em duas correntes: C3 (propano e propeno) e C4 (butanos e butenos). A seção de tratamentos trata a gasolina, GLP e gás combustível de modo a torná-los produtos comercializáveis ou aptos para sofrer, em etapas posteriores, transformação em outros produtos. Nela, o teor de enxofre dos produtos acima citados é sensivelmente reduzido (ABADIE, 2006).

Este processo tem como finalidade principal a produção de GLP e/ou gasolina. Paralelamente são também formados produtos mais pesados que a gasolina, além de um resíduo de alto teor de carbono, chamado coque, que se deposita na superfície do catalisador (SADEGHBEIGI, 2000).

A Figura 1 ilustra um esquema de CCF atual da REVAP, no qual é identificado o soprador do ciclo regenerativo, objeto desta análise.

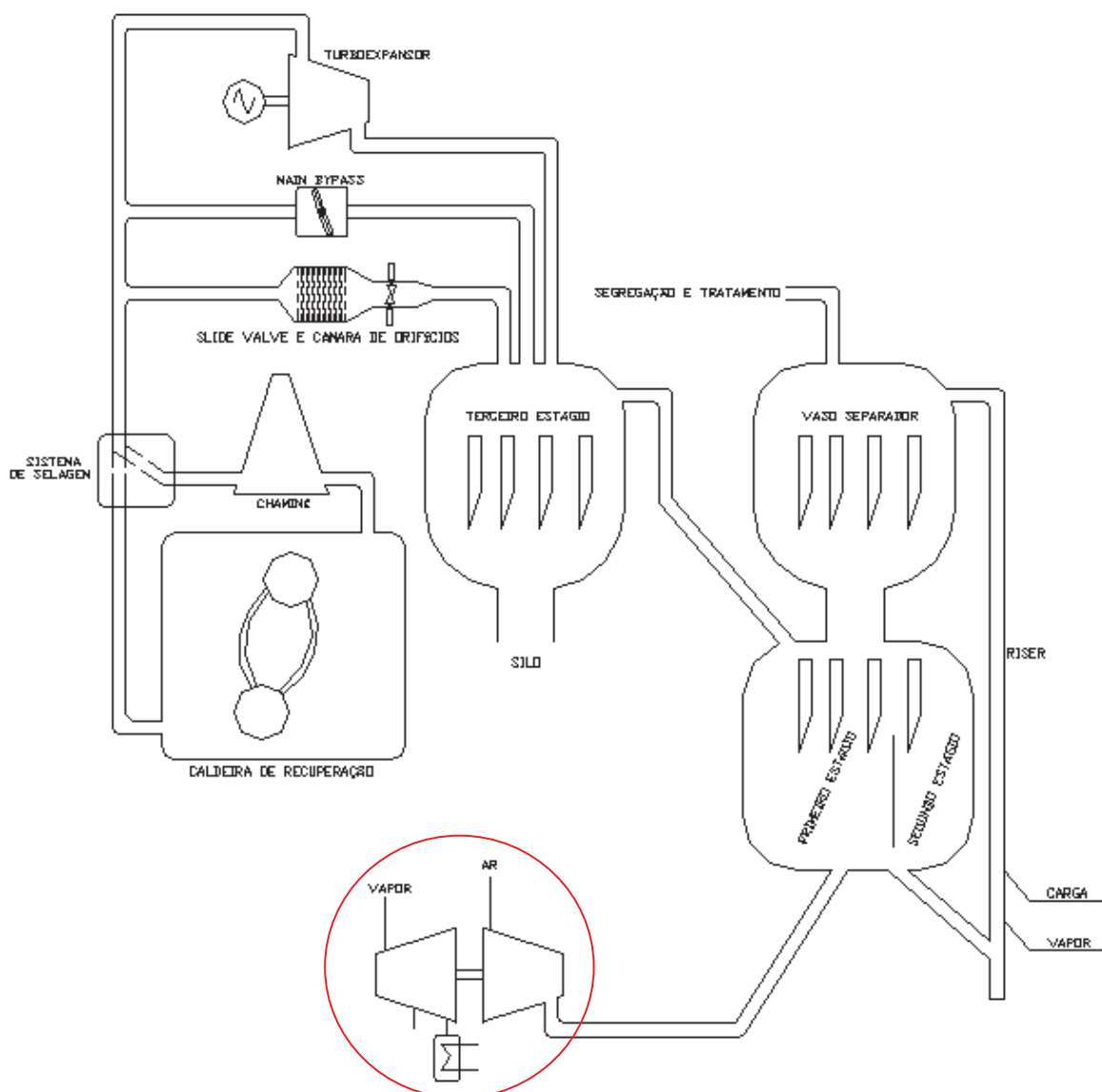


Figura 1 - Esquema básico do CCF identificando objeto da análise (CANUTO, 2010)

De todas as seções mencionadas, a de maior importância é a seção de reação ou conversão, em que o gasóleo proveniente da unidade de destilação a vácuo, após entrar na unidade de CCF, é aquecido com produtos quentes que saem para segregação e tratamento e é encaminhado à base do *riser*. O *riser* é uma tubulação vertical de grande diâmetro, por onde sobe a mistura de catalisador e vapores de hidrocarbonetos. É onde ocorre a maior parte das reações de craqueamento. Neste ponto, recebe uma grande quantidade de catalisador a alta temperatura (aproximadamente 700°C), o que provoca a instantânea vaporização do gasóleo, fluidizando o catalisador. No reator,

localizado imediatamente acima do *riser*, completam-se as reações do craqueamento; o mesmo propicia um espaço para a separação inicial do catalisador, pois diminui a velocidade dos vapores em ascensão. Partículas finas de catalisador que sobem junto com a corrente gasosa (vapores de hidrocarbonetos, gases inertes e vapor d'água) são retidas pelos ciclones no topo do reator, e devolvidas ao leito do catalisador. O efluente gasoso do reator - constituído de hidrocarbonetos craqueados e não craqueados, gases inertes e vapor d'água - é enviado então à seção de fracionamento. Os vapores de óleo tendem a saturar os poros do catalisador e, portanto, ele deve ser retificado com vapor d'água antes de ir ao regenerador. Esta operação se passa no *stripper* ou retificador (REVAP, 1997).

No regenerador, o coque que se depositou na superfície do catalisador é queimado com ar, gerando uma grande quantidade de calor que, devido a circulação do catalisador, é a maior fonte de calor para a carga, suprimindo não só a energia necessária às reações do craqueamento, como também o calor necessário pra o aquecimento e a vaporização da carga. O ar para a combustão do coque é fornecido por um soprador de ar (*blower*) e é injetado no regenerador através de um distribuidor (*pipe-grid*), localizado na base do regenerador. Esse soprador pode ser acionado por uma turbina a vapor ou por um motor elétrico. O catalisador é fluidizado, no regenerador, pela corrente de ar e gases de combustão. Estes gases passam pelo leito de catalisador fluidizado (fase densa), e atinge uma zona onde ocorre a separação sólido/gás (fase diluída) (SADEGHBEIGI, 2000).

Um aquecedor de ar, que é parte integrante da linha de injeção de ar para o distribuidor, é usado durante a partida para aquecer o conversor, e fornecer o calor necessário para elevar a temperatura do leito do regenerador ao ponto em que se possa iniciar a combustão do coque (ABADIE, 2006).

Segundo Abadie (2006), partículas de catalisador arrastadas pela corrente gasosa são recuperadas pelo conjunto de ciclones de três estágios. Os gases de combustão, inertes e finos de catalisador não recuperados deixam o segundo estágio dos ciclones e alcançam a câmara plena do topo do regenerador, que também serve como ponto de sustentação dos ciclones. A composição volumétrica típica destes gases

é composta por 80% de nitrogênio (N_2), 10% de dióxido de carbono (CO_2) e 10% de monóxido de carbono (CO).

É possível transformar o CO em CO_2 , liberando-se mais energia, que é aproveitada para a geração de vapor d'água de alta pressão. Este processo é realizado na caldeira de CO. Os gases de combustão provenientes do terceiro estágio de regeneração caminham para um equipamento denominado Turbo expansor, onde a pressão é reduzida ao nível necessário à operação da caldeira de CO, essa redução de pressão é imprescindível por dois motivos: resistência estrutural dos dutos e da fornalha da caldeira de recuperação. Durante esta redução de pressão, o Turbo expansor produz potência elétrica. Antes da implementação do Turbo, essa redução de pressão era dada por uma Câmara de Orifícios (duto com vários pratos perfurados) e controlada por uma válvula, conhecida como *Slide Valve*, que se abre ou fecha sob a ação do controlador do diferencial de pressão entre o reator e o regenerador. Para que o Turbo expansor entrasse em operação sem a necessidade de um longo tempo de parada do CCF (economicamente inviável), foi necessário que um novo alinhamento fosse instalado para garantir a compatibilidade na malha de controle e a estabilidade do processo durante a partida do novo equipamento. Este novo alinhamento foi instalado paralelamente à *Slide Valve* é conhecido como *Main By-pass* (CANUTO, 2010).

2.2 Compressor

Um compressor é um dispositivo usado para transportar fluidos compressíveis, e para isso é necessário vencer a perda de carga do sistema, motivo pela qual a pressão de saída do fluido é elevada em relação à sua entrada. O nível de pressão de entrada pode ser qualquer valor a partir de um vácuo profundo até uma alta pressão positiva. A pressão de descarga pode variar de níveis subatmosféricos a valores elevados em dezenas de milhares de atmosferas. As pressões de entrada e saída são relacionadas, o que corresponde ao tipo de compressor e sua configuração. O fluido pode se apresentar na forma líquida, gasosa ou vapor, e pode ter uma ampla gama de peso molecular. Aplicações de gás comprimido variam de produtos de consumo, tais como em

refrigeradores domésticos, até complexas instalações de plantas industriais, como as indústrias química, petroquímica, de refino e de papel e celulose (BROWN, 2005).

Para comparação, os diferentes tipos de compressores podem ser subdivididos em dois grandes grupos com base no modo de compressão, intermitente ou contínuo. O modo intermitente de compressão é de natureza cíclica, este tipo de compressor também é conhecido como compressor volumétrico. Nos compressores volumétricos ou de deslocamento positivo, a elevação de pressão é conseguida através da redução do volume ocupado pelo gás, essa compressão é efetuada em sistema fechado, sem qualquer contato entre a sucção e a descarga. No modo de compressão contínuo, os compressores são referidos como dinâmicos. Os turbocompressores ou compressores dinâmicos possuem dois órgãos principais: impelidor e difusor. O impelidor é um órgão rotativo munido de pás que transfere ao gás a energia recebida de um acionador. Essa energia se faz em parte na forma cinética e em outra parte na forma de entalpia. Posteriormente, o escoamento estabelecido no impelidor é recebido por um órgão fixo denominado difusor, cuja função é promover a transformação de energia cinética do gás em entalpia, com conseqüente ganho de pressão (RODRIGUES, 1991).

A Figura 2 ilustra a relação entre os diversos tipos de compressores, enquanto que a Figura 3 ilustra a área de aplicação típica de cada tipo compressor.

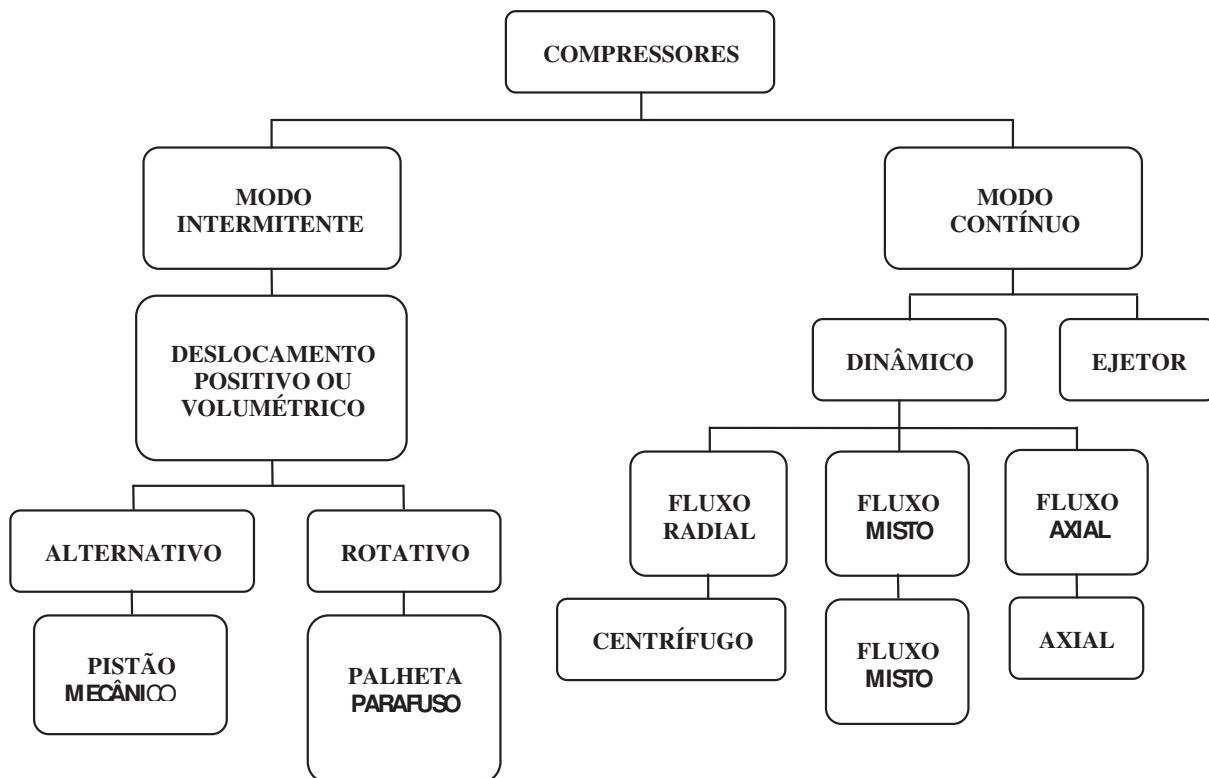


Figura 2 - Quadro geral das classificações dos compressores (BROWN, 2005).

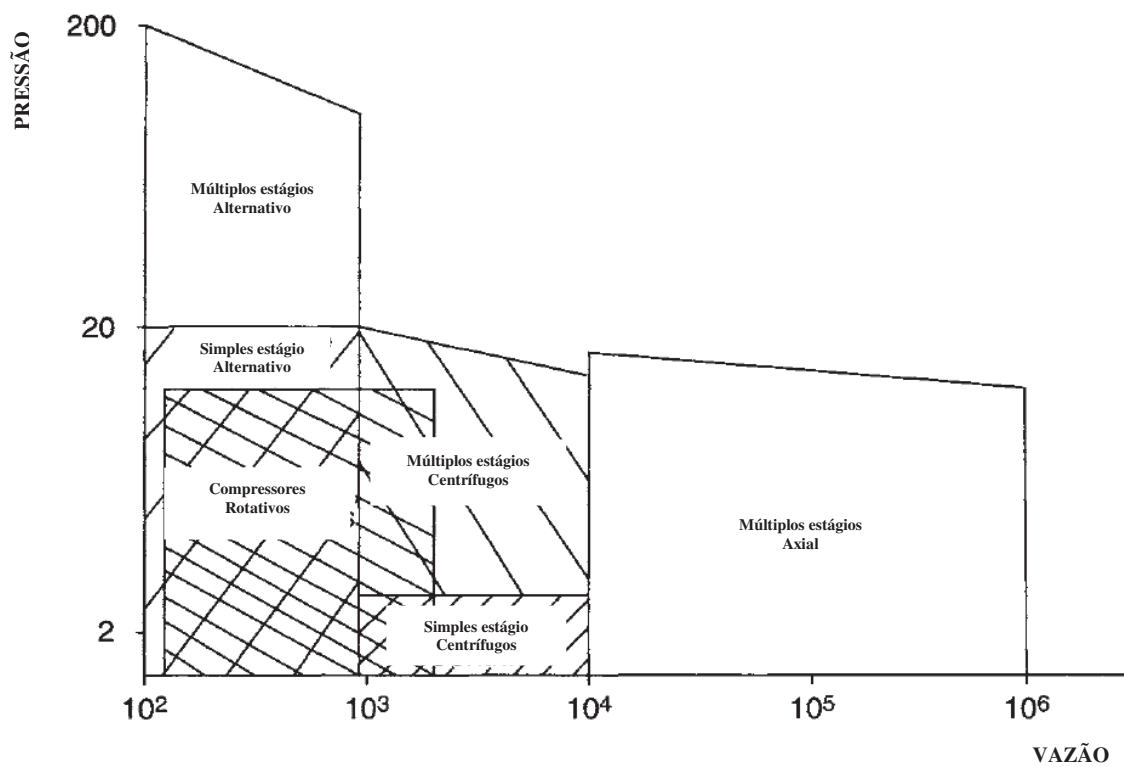


Figura 3 - Área de aplicação típica de cada tipo de compressor (BROWN, 2005).

O compressor alternativo está inserido na família de compressores de deslocamento positivo. Ele consiste de um sistema biela-manivela que converte o movimento de rotação de um eixo em um movimento translacional de um pistão ou êmbolo. O funcionamento deste tipo de compressor está diretamente relacionado ao comportamento das válvulas, que possuem um elemento móvel chamado obturador. Este elemento compara as pressões internas da tubulação de descarga/sucção e do cilindro e abre ou fecha dependendo desta variação (COSTA, 1978).

O compressor rotativo também faz parte da família de compressores volumétricos. Ele possui três configurações diferentes: palheta, parafuso e lóbulo. No entanto, características semelhantes podem ser encontradas nestas configurações, como o modo intermitente de compressão, a maneira pela qual a energia é imposta para a compressão do fluido (um eixo de entrada move um elemento rotativo) e a inexistência de válvulas de admissão e descarga (RODRIGUES, 1991).

O ejetor e o compressor dinâmico são compressores de modo contínuo. O ejetor não possui partes móveis, por este motivo apresenta baixo custo inicial, simplicidade de operação e menos eficiência do que os compressores mecânicos. O ejetor geralmente é composto por quatro partes básicas: cabeçote de vapor, bico convergente-divergente, câmara de mistura e difusor. Um fluido motriz de alta pressão entra pelo cabeçote e expande através do bico, o fluido succionado se mistura com o fluido motriz na câmara de mistura e ambos são comprimidos através do difusor (BROWN, 2005).

Os turbocompressores ou compressores dinâmicos possuem dois componentes principais: impelidor e difusor. O impelidor é um componente rotativo munido de pás que transfere ao gás a energia recebida de um acionador. Posteriormente, o escoamento estabelecido no impelidor é recebido por um componente fixo denominado difusor, cuja função é promover a transformação da energia cinética do gás em entalpia, com conseqüente ganho de pressão. Devido à natureza dinâmica destes compressores, a massa específica e a massa molecular do gás tem influência sobre a capacidade de compressão do equipamento. Estes compressores são subdivididos em três categorias, com base na direção do fluxo através da máquina, de fluxo radial, axial e misto. Os

compressores de fluxo radial são conhecidos como compressores centrífugos, os de fluxo axial como compressores axiais e os de fluxo misto como compressores de fluxo misto (RODRIGUES, 1991).

Os compressores dinâmicos podem sofrer um fenômeno denominado *surge*. Este fenômeno acontece quando a inclinação da curva *head* termodinâmico (kJ/kg) - trabalho por unidade de massa comprimida - versus vazão (m³/h) do compressor tende a zero. O *surge* é caracterizado pela instabilidade da operação quando há um fluxo muito reduzido através da máquina. Durante o fenômeno, a pressão desenvolvida pelo compressor tende a ser menor do que a pressão na linha de descarga e ocorre uma reversão do fluxo resultando em um fenômeno de natureza oscilatória. A reversão do fluxo tende a diminuir a pressão na linha de descarga e recomeça a compressão normal. Se não ocorrer nenhuma alteração no fluxo de entrada do compressor, todo o ciclo irá se repetir. Essa ação cíclica é uma condição instável variando em intensidade de um chocalho sonoro a um choque violento, dependendo do nível de energia da máquina. Essas intensas ondas de vibração são capazes de causar sérios danos ao equipamento, por este motivo, todo compressor dinâmico deve possuir um sistema *anti-surge* eficiente que garanta a vazão limite de *surge* (BROWN, 2005). A Figura 4 representa esta explicação.

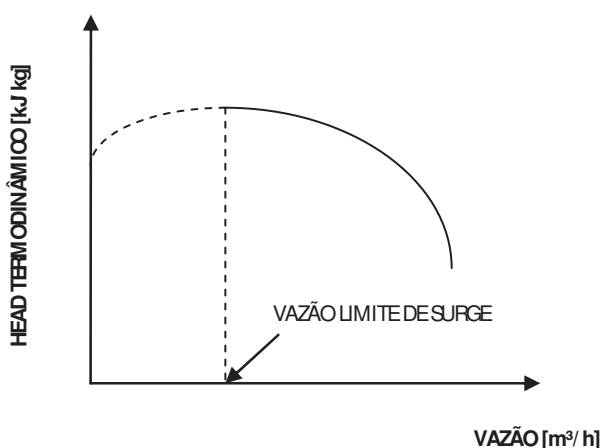


Figura 4 - Representação da vazão limite de surge (RODRIGUES, 1991)

2.3 Turbina a vapor

Uma turbina a vapor é um motor térmico rotativo no qual a energia térmica do vapor, medida pela entalpia, 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 (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Turbinas a vapor podem ser classificadas de acordo com vários critérios. Esses critérios possuem algumas relevâncias práticas ou teóricas, mas nenhum é universalmente aceito. A Tabela 1 resume os sete critérios de classificação mais comuns (CLEVELAND, 2004).

Tabela 1 - Alguns critérios gerais de classificação para turbinas a vapor (CLEVELAND, 2004)

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO EM QUE A CLASSIFICAÇÃO É MAIS UTILIZADA
Condições do vapor de admissão (adm)	Subcrítica: $p_{adm} < 22$ MPa e T_{adm} normalmente < 823 K Supercrítica: $p_{adm} > 22$ MPa e T_{adm} normalmente > 823 K	Projeto e processo Indústria
Pressão de escape (esc)	'C' – condensação se $p_{esc} < p_{atm}$ e vapor de escape condensado Caso contrário, 'CP' – contra-pressão	Projeto e processo
Caminho do fluxo principal de vapor	Axial se o fluxo principal de vapor é paralelo ao eixo da turbina Caso contrário, radial	Projeto
Potência fornecida	Classe 1: 15 a 400 kW, 'CP' Classe 2: 450 a 1.500 kW Classe 3: 2.000 a 15.000 kW Classe 4: 15.000 a 100.000 kW Classe 5: > 100.000 kW, reaquecimento e condensação	Indústria
Extração de vapor	Extração se uma parte do vapor é extraído entre os estágios Caso contrário, sem extração	Projeto e processo Indústria
Pressão do vapor de entrada	Alta pressão, acima de 4 MPa Pressão intermediária, 0,5 a 4 MPa Baixa pressão, abaixo de 0,5 MPa	Projeto Indústria
Projeto da palheta	Ação ou impulso se a queda de pressão ocorre apenas nos bicos Caso contrário, reação	Pesquisa Projeto

2.4 Motor elétrico

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica, usualmente disponibilizada num eixo de rotação, como ilustra a Figura 5 (FILIPPO FILHO, 2000).

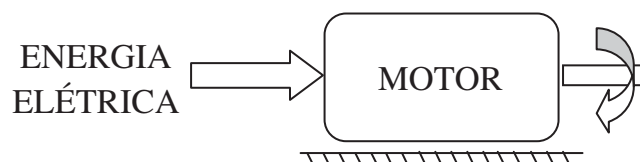


Figura 5 - Transformação de energia no motor (FILIPPO FILHO, 2000)

O funcionamento dos motores se baseia num princípio físico relativo ao campo magnético gerado ao redor de um condutor quando percorrido por uma corrente elétrica. A finalidade deste tipo de motor é gerar movimento. Assim, sua construção deve prever peças móveis que se movimentem de acordo com o campo magnético gerado pela corrente elétrica que percorre os condutores do motor.

O motor é constituído basicamente por um estator e um rotor. O estator é a parte fixa do motor, nele existem campos magnéticos fixos, criados por ímãs permanentes ou eletroímãs. Já o rotor é a parte móvel, ligada ao eixo de transmissão de movimento, nele normalmente existem bobinas, percorridas por correntes elétricas que geram campos magnéticos. Em função da polaridade, estes campos magnéticos submetem o rotor a forças de atração e repulsão, produzindo o movimento giratório do rotor (LEITÃO, 2009). A Figura 6 ilustra o princípio de funcionamento de um motor elétrico.

Existem dois tipos de motores elétricos, os de corrente contínua e os de corrente alternada. Os motores de corrente contínua são motores de custo elevado e necessitam de uma fonte de corrente contínua. Eles podem funcionar com velocidades ajustáveis entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão.

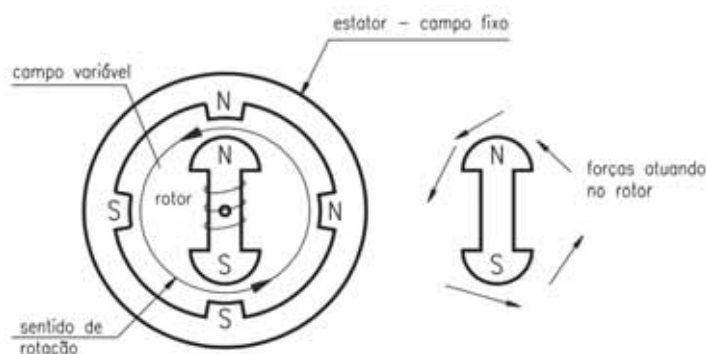


Figura 6 - Princípio de funcionamento de um motor elétrico (LEITÃO, 2009)

Os motores de corrente alternada são os mais utilizados devido à distribuição de energia elétrica ser feita normalmente em corrente alternada. Este último tipo de motor divide-se em motor síncrono ou assíncrono (de indução). O motor síncrono funciona com velocidade constante e é geralmente utilizado quando se necessita de velocidades estáveis sob a ação de cargas variáveis, também pode ser utilizado quando se requer grande potência, com torque constante.

O motor assíncrono funciona normalmente com velocidade estável, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas. Atualmente é possível controlar a velocidade dos motores de indução com o auxílio de conversores de frequência, dispositivos eletrônicos que convertem a tensão da rede alternada senoidal, em tensão contínua e finalmente convertem esta última, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis (CASTRO, 2010).

Motores de grande porte, como é o caso do objeto de análise, operam continuamente, sendo necessária partida/parada apenas durante as paradas de manutenção das unidades onde estão instalados. Geralmente, as campanhas de unidades como o CCF são de cinco anos.

Os principais métodos de partida eletromecânicos de motores trifásicos assíncronos são: a) partida direta; b) partida estrela-triângulo; c) partida com chave compensadora. Com exceção da chave de partida direta, todos os outros métodos

permitem a redução da corrente na partida, por meio de uma menor tensão aplicada aos terminais do motor (BRITO, 2007).

Breve resumo destes métodos:

a) partida direta: em geral, o método somente é recomendável se a corrente de partida do motor não provocar uma redução de tensão apreciável na rede (convém não ser maior do que 10% da tensão nominal). Por isso, em geral, somente motores de até 5 CV empregam essa metodologia para partida. Neste método, o motor é conectado diretamente à rede, por meio de um contato eletromecânico, com uma bobina acionada por um sinal de controle, sendo ainda acrescentados, ao circuito de força, fusíveis e relé térmico, como dispositivos de proteção.

b) partida estrela-triângulo: o motor somente poderá utilizar este método se possuir uma ligação em dupla tensão (por exemplo, 220/380 V ou 380/660 V). Para ser conectado à maior tensão, o motor deverá estar ligado em estrela (Y); para a menor tensão, a sua ligação deverá ser o triângulo ou delta (Δ). O método de partida estrela-triângulo só pode ser realizado se a tensão da rede for igual à tensão de ligação em triângulo. O método é simples: o motor, que originalmente, em função da tensão da rede, deveria estar conectado em triângulo, é conectado em estrela, ou seja, a ligação em estrela está com uma tensão por fase menor que a tensão nominal de funcionamento, logo a sua corrente por fase (igual à corrente de linha) também será reduzida. Depois que o motor atinge uma velocidade próxima da nominal, sua conexão interna é modificada de estrela para triângulo. O motor, conectado em estrela, ao ser alimentado pela tensão correspondente a sua conexão em triângulo, terá sua corrente reduzida para um terço da corrente nominal em triângulo.

c) partida com chave compensadora: este método utiliza um autotransformador para reduzir a tensão de alimentação do motor para 50, 65 ou 80 % da tensão nominal, durante a partida, até a velocidade do motor atingir um valor próximo do nominal, quando passa a ser conectado diretamente à rede, sendo o autotransformador isolado. O princípio de funcionamento é parecido com a chave estrela-triângulo, pois tem a finalidade de reduzir a tensão por fase do motor, na partida, para que ocorra uma redução proporcional da corrente. A grande vantagem da

chave compensadora é que, por utilizar um autotransformador, a corrente absorvida pelo motor (no circuito secundário do autotransformador) é maior do que a corrente de linha (no circuito primário do autotransformador), em função da relação de transformação. Logo, a corrente de partida do motor é limitada, na proporção da redução de tensão realizada pelo autotransformador, mas a corrente de linha é reduzida pelo quadrado da relação de transformação.

A Figura 7 é uma representação esquemática dos diversos tipos de motores elétricos.

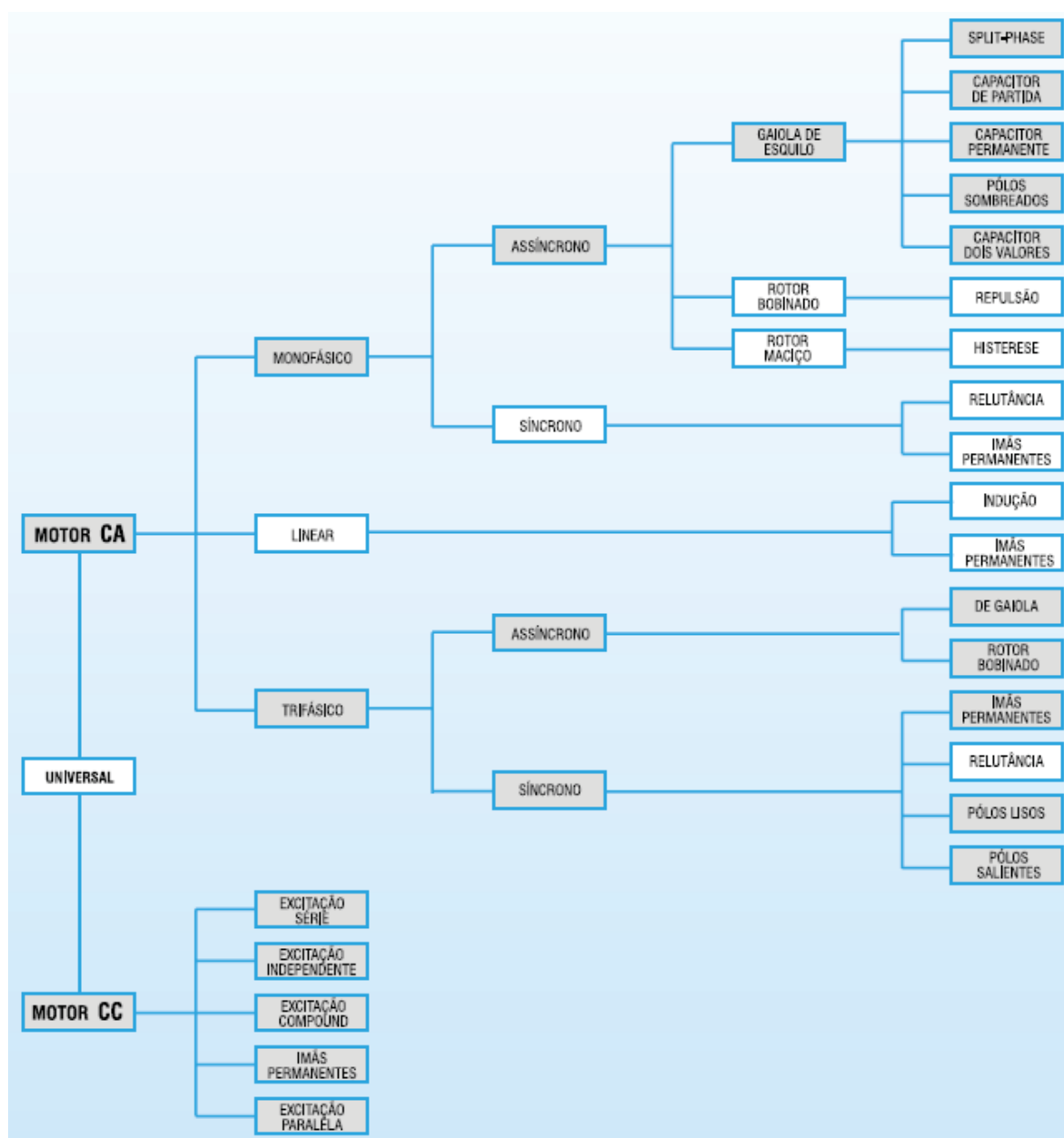


Figura 7 - Representação esquemática dos diversos tipos de motores elétricos (LEITÃO, 2009).

3 SISTEMA DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA DA REVAP

De acordo com DOE (2000), para um uso eficiente de energia em refinarias, as características desejáveis em longo prazo dividem-se em otimização do consumo da energia no complexo de refino; integração da eficiência energética com os processos de controle; eliminação de resíduos em trocadores de calor; inovação tecnológica dos trocadores de calor; maior participação do processo de cogeração; redução das necessidades de energia dos processos mais intensivos; localização das perdas térmicas através do monitoramento contínuo do processo; e reservatórios energeticamente eficientes.

A disponibilidade de vapor e energia elétrica em refinarias é um elemento essencial para a operacionalização dos diversos processos necessários para a produção comercial de derivados de petróleo. Além de seu emprego envolver custos diretos e indiretos para a empresa, sua participação na composição do IIE é significativa, sendo que a existência de ciclos de cogeração na unidade industrial contribui para a melhoria desse parâmetro.

Neste capítulo será descrito o sistema de geração termelétrica da REVAP. A planta de processo requer a produção tanto de energia elétrica quanto de vapor em diferentes condições. A Figura 8 abaixo representa tal esquema, mostrando os equipamentos geradores que compõem o sistema e identificando os principais consumidores do mesmo.

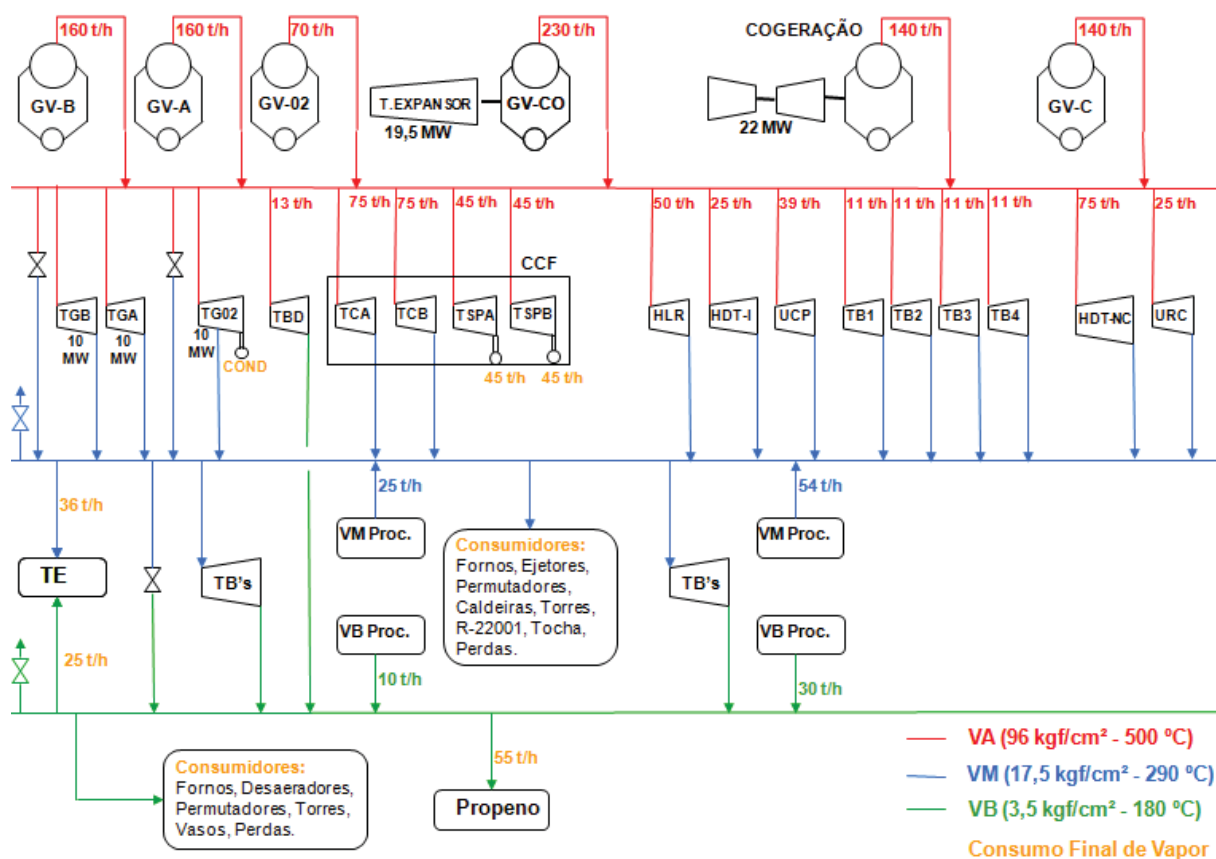


Figura 8 - Sistema de geração termelétrica da REVAP

O balanço termelétrico pode ser definido como o resultado da configuração racionalizada do uso de acionadores elétricos e a vapor com o intuito de evitar excesso ou deficiência de vapor no sistema de produção. O consumo final de vapor (representado pela cor laranja) em um processo determina a produção de vapor pelos geradores. É o caso do vapor condensado em um permutador ou em uma turbina. Já o vapor utilizado em uma turbina de contra-pressão não é considerado neste contexto, pois o vapor que entra no equipamento retorna para o sistema em um nível de pressão mais baixo e ainda poderá ser utilizado.

Em função das diversas necessidades dos processos operacionais e/ou químicos, o vapor produzido deve estar disponível em diferentes condições de pressão e temperatura. Ocorre um escalonamento nas condições do vapor conforme este avança pelo sistema. Tal sistema possui três níveis de pressão de vapor, os níveis são conhecidos como vapor de alta (VA) com 96 kgf/cm² @ 500°C e representado pelas

linhas vermelhas; vapor de média (VM) com 17,5 kgf/cm² @ 290°C e representado pelas linhas azuis; e vapor de baixa (VB) com 3,5 kgf/cm² @ 180°C e representado pelas linhas verdes.

O vapor disponível na refinaria é obtido por seis geradores de vapor aquotubulares de alta pressão (GV-A, GV-B, GV-C, GV-02, GV-CO e GV-Cogeração) e por equipamentos que, devido ao processo, realizam trocas térmicas específicas, como caldeiras de recuperação e alguns trocadores de calor, que geram o vapor de média do processo (VM Proc.) e o vapor de baixa do processo (VB Proc.) ilustrados. Ao todo, podem ser gerados 900 t/h de VA, 79 t/h de VM e 40 t/h de VB.

3.1 Consumidores de vapor de alta pressão

Dentre os consumidores do VA, existem três geradores de energia elétrica (EE) denominados turbo-geradores (TGA, TGB e TG02). O TGA e o TGB são acionados por turbinas de extração que reduzem o VA para VM podendo gerar até 10 MW de potência elétrica cada um. O TG02 é acionado por uma turbina de extração-condensação que trabalha condensando o VA e simultaneamente reduzindo o VA para VM com geração máxima de 10 MW de potência elétrica.

Além desses três geradores de EE acionados por turbina a vapor, existe um quarto gerador que é denominado turbo-expansor (T.Expansor). Conforme citado no Subitem 2.1, ele está localizado entre o terceiro estágio de regeneração do catalisador utilizado no processo da Unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado (UCCF) e a caldeira que queima o monóxido de carbono proveniente desta recuperação (GV-CO). Ao reduzir o nível de pressão deste gás, o turbo-expansor pode produzir até 19,5 MW de potência elétrica. Ao final do ano de 2011, com o término da implantação da Unidade de Cogeração, um novo gerador de EE acionado por uma turbina a gás entrará em operação com capacidade de gerar até 22 MW de potência elétrica.

Além dos três geradores de EE que reduzem o VA para VM, existem onze turbinas a vapor do tipo extração, em que sete acionam compressores (TCA, TCB,

HLR, HDT-I, UCP, HDT-NC e URC) e quatro acionam bombas (TB1, TB2, TB3 e TB4); e duas turbinas a vapor do tipo condensação que acionam sopradores (TSPA e TSPB). Existe ainda, uma turbina a vapor do tipo extração que reduz o VA diretamente para VB (TBD).

Para segurança e operação transiente (partida-parada) do sistema, são necessárias duas válvulas redutoras de pressão (VA para VM). Durante operação normal, estas válvulas são mantidas fechadas para evitar perda de energia. Eventualmente, em caso de queda de pressão no coletor de VM, essas válvulas são abertas para o restabelecimento desta pressão.

3.2 Consumidores de vapor de média pressão

No sistema de VM existem turbinas a vapor do tipo extração que acionam bombas do processo (TB's) e reduzem o VM para VB.

A área de tancagem da refinaria, chamada de Transferência e Estocagem (TE), é uma consumidora direta de VM. Este vapor é utilizado para manter aquecidos os produtos pesados condensando após passar pelas serpentinas dos tanques. Outros importantes consumidores de VM são: fornos, ejetores, permutadores, caldeiras (durante a sopragem de fuligem – ramonagem – e no processo de parada), torres, reatores, sistema de tocha e eventuais perdas.

Igualmente ao sistema de VA, o sistema de VM possui válvula redutora de pressão (VM para VB) para a segurança e a operação transiente. Ela abre eventualmente para o controle da pressão do coletor de VB, em caso de queda de pressão do mesmo. Além desta válvula, o sistema possui uma válvula de alívio atmosférico que abre em caso de aumento de pressão do coletor de VM.

3.3 Consumidores de vapor de baixa pressão

Os desaeradores de água de caldeira são os maiores consumidores de VB seguidos pela Unidade de Propeno, que é a maior unidade de processo com consumo direto de VB. Outros consumidores são os fornos, permutadores, torres, vasos e eventuais perdas.

Do mesmo modo que o sistema de VM, o sistema de VB possui uma válvula de alívio atmosférico para garantir a segurança operacional. Ela abre em caso de aumento da pressão do coletor de VB.

4 PROCEDIMENTO DO ESTUDO

Inicialmente, foram pesquisadas as características dos sopradores e das turbinas a vapor objetos deste estudo (TSPA e TSPB), como vazão, temperatura de entrada e saída, curvas de rendimento e potência. Em seguida, foi realizada uma breve análise do potencial de substituição da turbina a vapor por motor elétrico com base no artigo de Ranade, Robert e Zapata-Suarez (1988).

Para a realização da análise mais detalhada foi utilizada uma ferramenta de otimização, o BUTIL. Este sistema foi desenvolvido para apoiar os estudos e a operação das centrais termelétricas das refinarias da Petrobras, otimizando a geração e a distribuição das utilidades nessas unidades. O programa permite representar a planta de utilidades de forma gráfica, com suas unidades, equipamentos e coletores; e cadastrar os dados necessários através dessa representação gráfica (CORREA, 2002).

A otimização realizada pelo BUTIL pode ser definida como um processo de obtenção da solução operacional do sistema termoeletrico que atenda ao compromisso básico de suprir à demanda energética respeitando a um critério adicional seja de minimização de custo ou de consumo de alguma utilidade específica.

Para a realização dessa otimização são necessárias algumas informações importantes, como, por exemplo, as características das utilidades envolvidas (níveis de pressão e temperatura da produção de vapor; demanda e oferta de energia elétrica; temperatura, pressão e entalpia dos gases de combustão; valores padrão para o ar de combustão; Poder Calorífico Inferior e percentual de enxofre para os combustíveis; características químicas dos produtos químicos; temperatura e pressão das correntes de condensado e de água de resfriamento etc.), os limites físicos e operacionais dos equipamentos abrangidos e as condições ambientais da localidade. Além disso, é indispensável fornecer os custos unitários de utilidades com fornecimento externo (combustíveis). O cálculo da entalpia é feito automaticamente pelo programa para o vapor, o condensado e a água de resfriamento.

O equacionamento global (conjunto de equações e inequações) embutido neste software foi desenvolvido baseado nas equações de balanço de massa e energia para os diversos tipos de equipamentos comuns em uma central termelétrica (por exemplo: caldeira, torre de resfriamento, trocador de calor, bomba a motor elétrico e a vapor, compressão de ar elétrico e a vapor, forno, misturador, turbogerador de extração e de condensação, turbogerador de contrapressão, turbina a gás, turbo expansor, vaso, ventilador elétrico e a vapor etc.), e nas regras de programação linear (método SIMPLEX) e de programação linear mista (algoritmo para solução de problemas de variáveis inteiras). O modelo de programação linear utiliza variáveis contínuas e discretas (1 ou 0), a existência dessas variáveis discretas determina que o modelo seja de programação linear mista.

Através da integração do BUTIL com os dados do processo obtidos por meio de sistemas de controle distribuído (SDCD) e de monitoração é possível obter resultados de otimização mais compatíveis com a real operação da planta.

O software permite a criação de inúmeros cenários da planta de utilidade. Um cenário é constituído pelo estado de disponibilidade dos equipamentos da planta (Disponível/Indisponível), pela obrigatoriedade do uso do equipamento no modelo e pela produção/consumo de utilidades em cada equipamento. O sistema é capaz de otimizar um dado cenário de uma determinada planta de utilidade, gerando dados da configuração ótima da planta e o custo total líquido (custo de aquisição menos receita de venda) de operação da planta ótima.

Para a simulação no BUTIL foram considerados seis cenários distintos: três considerando o uso das turbinas a vapor (TV) e três, o motor elétrico (ME). Os cenários foram subdivididos em pessimista, tendencial e otimista. Estes nomes remetem ao possível crescimento do preço do gás natural no mercado mundial. O custo da energia elétrica foi mantido constante para facilitar a análise. Esta consideração se mostra razoável visto que a energia elétrica comprada pela refinaria é subsidiada das Centrais Termelétricas da Petrobras. Essa energia elétrica comprada pode ser proveniente de energia hidrelétrica (período úmido) ou da queima de gás

natural em turbinas a gás (período seco). A Tabela 2 representa os cenários com os preços do gás natural e da energia elétrica.

Tabela 2 - Cenários com os preços do gás natural e da energia elétrica

INSUMOS	CENÁRIO PESSIMISTA	CENÁRIO TENDENCIAL	CENÁRIO OTIMISTA
Gás natural [US\$/MWh]	33,00	26,00	20,00
Energia elétrica [US\$/MWh]	115,00	115,00	115,00

5 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

5.1 Triagem inicial

Ranade, Robert e Zapata-Suarez (1988) descrevem um procedimento de triagem inicial para que se consiga com rapidez e precisão avaliar o potencial para substituição de acionamentos mecânicos por motores elétricos. Esta metodologia dá uma indicação muito boa de projetos sem potencial e aqueles com excelente potencial. Esta técnica não requer análise numérica aprofundada e foi elaborada para evitar gasto de tempo, dinheiro e energia em análises detalhadas de esquemas que têm uma baixa probabilidade de execução.

A triagem inicial consiste em um questionário e um formulário de avaliação para as respostas às perguntas do questionário. O questionário e o formulário de avaliação que acompanha a resposta são apresentados no Apêndice A e Apêndice B, respectivamente, do artigo de Ranade, Robert e Zapata-Suarez (1988). A resposta a cada questão é classificada numa escala de 1 a 10. Algumas perguntas têm mais peso do que outras. As pontuações para todas as respostas multiplicadas por fatores de peso adequado são somados para obter uma pontuação total. Esta pontuação total dá uma indicação clara do potencial de substituição. A menor pontuação implica menor potencial. Dependendo desta pontuação uma decisão pode ser feita para se realizar uma análise detalhada ou não.

A Tabela 7 contem as respostas e a avaliação do questionário da triagem inicial e encontra-se em Anexo. A Tabela 3 resume estes resultados.

Tabela 3 – Resumo dos resultados da triagem inicial

CENÁRIOS	PONTUAÇÃO	POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO
Pessimista	123,0	Bom
Tendencial	119,6	Bom
Otimista	116,6	Bom

Desta maneira, segundo Ranade; Robert; Zapata-Suarez (1988), a triagem inicial indica que a substituição é boa e uma análise mais detalhada é indicada para os três cenários.

5.2 Otimização dos cenários

Conforme exposto anteriormente, a análise mais detalhada será realizada a partir de uma ferramenta de otimização, o BUTIL. A simulação fornece um custo total líquido (CTL) para cada cenário. A Tabela 4 a seguir resume os resultados desta simulação, com as colunas 'GN [US\$/MWh]' e 'EE [US\$/MWh]' usadas como 'input' no programa e a coluna 'CTL [US\$/h]' apresentando o resultado da otimização.

Tabela 4 - Resumo dos resultados da otimização do Butil

CENÁRIOS	GN [US\$/MWh]	EE [US\$/MWh]	CTL [US\$/h]
Pessimista – TV	33,00	115,00	22500,00
Tendencial – TV	26,00	115,00	17610,00
Otimista – TV	20,00	115,00	13010,00
CENÁRIOS	GN [US\$/MWh]	EE [US\$/MWh]	CTL [US\$/h]
Pessimista – ME	33,00	115,00	22100,00
Tendencial – ME	26,00	115,00	17850,00
Otimista – ME	20,00	115,00	13730,00

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Análise através Custo total líquido

Conforme apresentado na Tabela 4, a triagem inicial indicou que a substituição pode ser boa e uma análise mais detalhada foi indicada para os três cenários. A partir desta informação, os cenários foram otimizados com o auxílio do Butil. Com os resultados desta otimização, apresentados da Tabela 5, foram traçadas as seguintes curvas representadas na Figura 9.

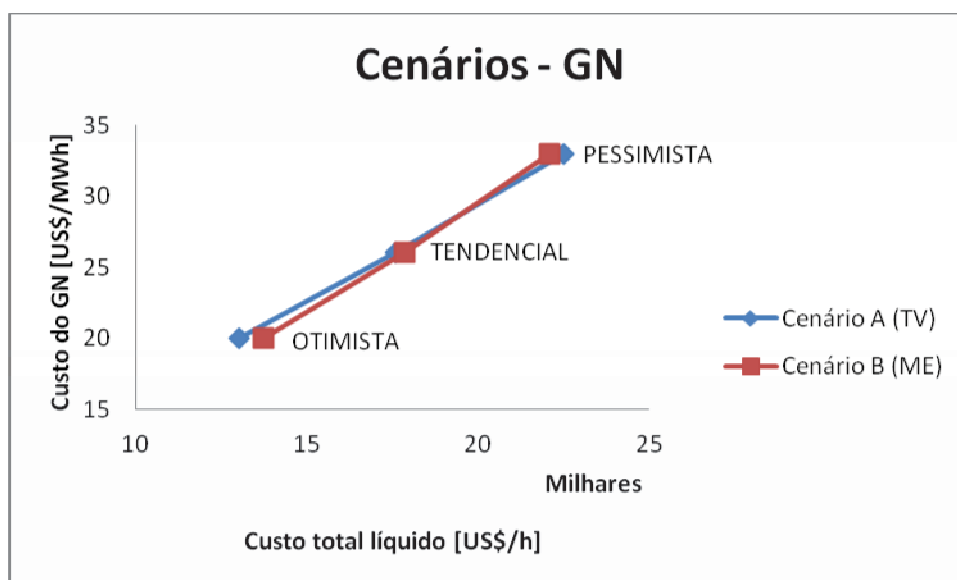


Figura 9 - Curvas representando os resultados da otimização do Butil

A partir destas curvas, foram obtidas equações para as retas através do método dos mínimos quadrados: Cenário A (TV) e Cenário B (ME). As equações estão descritas abaixo na equação (2) e na equação (3), respectivamente.

$$y = 0,0016x - 1,4668 \quad (2)$$

$$y = 0,0014x + 2,0662 \quad (3)$$

Igualando a equação (2) a equação (3), obtemos a equação (4):

$$0,0016x - 1,4668 = 0,0014x + 2,0662 \quad (4)$$

Assim, as retas se cruzam no ponto de abscissa apresentado pela equação (5):

$$x = 17.665,00 \text{ US\$/h} \quad (5)$$

Substituindo a equação (5) na equação (2), encontra-se a equação (6):

$$y = 0,0016 \cdot (17665) - 1,4668 \quad (6)$$

Assim, as retas se cruzam no ponto de ordenada apresentado pela equação (7):

$$y = 26,7972 \text{ US\$/MWh} \quad (7)$$

O ponto de interseção das retas identifica a condição na qual há igualdade entre o CTL para ambos os cenários. Analisando o gráfico, é possível perceber que para valores de GN maiores do que o ponto de interseção, o cenário B apresenta CTL menor. Consequentemente, pode-se afirmar que para o custo do GN acima de 26,80 US\$/MWh a substituição da turbina a vapor por um motor elétrico se torna viável. Nota-se que o ponto de equilíbrio se dá muito próximo ao cenário tendencial, sendo que na condição pessimista a utilização do ME se torna mais rentável. Por

consequente, a disponibilidade do GN no futuro é um ponto importante a considerar para uma possível implantação do projeto.

5.3.2 Análise através da redução da emissão de CO₂

Além disso, como ilustra a Figura 8, a substituição das turbinas a vapor condensantes (TSPA e TSPB) por motor elétrico iria reduzir o fornecimento de VA pelas caldeiras da REVAP em 90,0 t/h. Conforme foi explanado no capítulo introdutório deste trabalho, essa diminuição na demanda de vapor reduz a emissão de gases de efeito estufa (neste caso, principalmente, o CO₂) pela redução da queima de GN nas caldeiras. O valor típico dos geradores de vapor da REVAP é de 1,0 t/h de GN queimado para cada 15,0 t/h de VA. Neste contexto, uma economia de 90,0 t/h de VA equivale a uma redução da queima de 6,0 t/h de GN (GN evitado).

Para se quantificar a redução da emissão de CO₂, é necessário conhecer a composição típica do GN. Esta composição está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição típica de GN (base volumétrica)

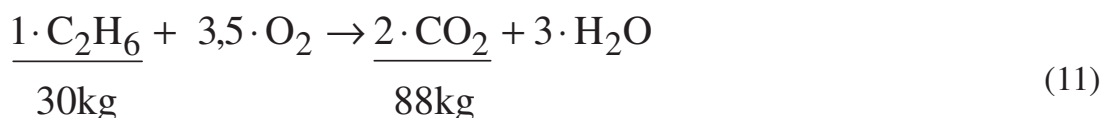
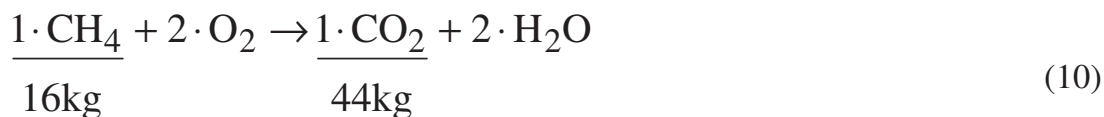
COMPONENTE	% VOLUME	MASSA MOLAR [kg/kmol]	MASSA [kg]	% MÁSSICA
Metano (CH ₄)	90,0%	16,0	14,4	82,8%
Etano (C ₂ H ₆)	10,0%	30,0	3,0	17,2%

Com a porcentagem mássica de cada componente apresentada na Tabela 5 e a quantidade de GN evitado, é possível encontrar a vazão mássica de CH₄ e de C₂H₆ no GN evitado. Esses valores estão apresentados nas equações (8) e (9), respectivamente:

$$\text{Vazão mássica de CH}_4 \text{ evitada} = 0,828 \cdot 6 \text{ t/h} = 4,97 \text{ t/h} \quad (8)$$

$$\text{Vazão mássica de C}_2\text{H}_6 \text{ evitada} = 0,172 \cdot 6 \text{ t/h} = 1,03 \text{ t/h} \quad (9)$$

A queima completa de GN é dada pelas equações (10) e (11):



Considerando que a EE adquirida para o acionamento dos motores seja proveniente de hidrelétrica (período úmido) e desprezando-se a sua parcela de emissão de CO₂, para cada 16 kg de CH₄ não queimados, 44 kg de CO₂ deixam de se formar. Analogamente, para cada 30 kg de C₂H₆ evitado, 88 kg de CO₂ não são produzidos. Usando-se essas relações, obtemos que para a equação (8), evita-se a produção de 13,7 t/h de CO₂ e para a equação (9), 3,0 t/h de CO₂. Desta maneira, para 6,0 t/h de GN é evitada a formação de 16,7 t/h CO₂, ou seja, 146.292,0 t/ano (24 horas por dia e 365 dias por ano).

Por outro lado, considerando que a EE adquirida para o acionamento dos motores seja proveniente de termelétrica de ciclo combinado com 56% de eficiência na base PCI (período seco) – valor típico de uma termelétrica do Sistema Petrobras, é necessário descontar o CO₂ gerado durante a queima de GN para a produção de EE necessária para acionar esses motores; este valor foi mencionado na Questão 2 da Tabela 7: 14.500 HP. Portanto, para os dois ME a EE necessária é de 21,6 MW. O PCI típico do GN é de 11.300 kcal/kg. Nestas condições, é necessária uma vazão de 2,9 t/h de GN; este valor foi encontrado através de iterações numéricas. Assim, a nova vazão de GN evitado será de 3,1 t/h e não mais 6,0 t/h. Se para 6,0 t/h de GN evitado, deixasse de emitir 16,7 t/h CO₂, 3,1 t/h de GN deixarão de emitir 8,5 t/h CO₂, ou seja, 74.460,0 t/ano (24 horas por dia e 365 dias por ano).

A Tabela 6 resume os resultados da análise através da redução da emissão de CO₂.

Tabela 6 – Estimativa da redução da emissão de CO₂ a partir da substituição da TV por ME

PROVENIÊNCIA DA EE ADQUIRIDA	REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂ [t/h]	REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂ [t/ano]
Hidrelétrica – período úmido	16,7	146.292,0
Termelétrica de ciclo combinado com 56% de eficiência (base PCI) – período seco	8,5	74.460,0

O valor real da redução da emissão de CO₂ estará compreendido entre os dois extremos, energia elétrica obtida 100% através de hidrelétrica e 100%, através de termelétrica. O balanço da geração por termelétricas ou hidrelétricas é feito pelas Centrais Termelétricas da Petrobras responsáveis pelo fornecimento de EE para a refinaria, de acordo com o preço da EE e do GN. O período úmido e seco do ano é um fator relevante para esta questão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do trabalho foi analisar a viabilidade de motorização do soprador no ciclo regenerativo da Unidade de craqueamento catalítico fluidizado da Refinaria Henrique Lage – REVAP, da Petrobras. De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se verificar que os objetivos propostos inicialmente foram atingidos.

Os objetivos específicos para o desenvolvimento técnico foram cumpridos. Com a realização desse trabalho, foi possível a familiarização com os conceitos de máquinas dinâmicas, a pesquisa e a aplicação de métodos discutidos em artigos específicos do ramo energético, o uso do software utilizado para otimização do balanço termelétrico de utilidades (Butil) em plantas do sistema Petrobras e a análise de dados obtidos através de simulações neste software.

Com as análises realizadas, foi possível verificar que realmente existe a possibilidade de a substituição da turbina a vapor por um motor elétrico ser favorável do ponto de vista do custo total líquido apresentado pela otimização realizada no Butil e da redução da emissão de CO₂. Outras vantagens com esta substituição seriam a redução da carga térmica da Torre de Resfriamento da REVAP uma vez que não seria mais necessária a condensação do VA nas turbinas e o aumento da confiabilidade do sistema de geração de vapor visto que as caldeiras operariam com mais folga. Uma questão relevante, também, seria a facilidade de manutenção e operação apresentada pelo motor elétrico em relação à turbina a vapor.

Todavia, a análise da proposta de modificação não levou em consideração os custos envolvidos com a compra dos equipamentos. Desta maneira, seria interessante uma análise mais criteriosa em relação a este aspecto. Assim, como sugestão de continuidade da linha de estudo iniciada com este trabalho, existe a possibilidade de se verificar a viabilidade econômica desta substituição.

REFERÊNCIAS

ABADIE, Elie. Curso de Engenharia de Processamento (CENPRO). Petrobras. **Processos de refinação**: apostila. Rio de Janeiro, 2006.

BALESTIERI, José Antonio Perrella; DIAS, Rubens Alves. **Avaliação energética e avaliação metodológica de cinco unidades da Petrobras**. Guaratinguetá: UNESP, 2008.

BRITO, Claudio Marzo Cavalcanti de. Modelagem computacional de métodos de partida de um motor de indução trifásico no SIMULINK/MATLAB. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 2., 2007, João Pessoa. **Anais ...** Floriano, PI: CONNEPI, 2007.

BROWN, P. E. Royce N.. **Compressors: Selection and Sizing**. Third Edition Texas: Elsevier, 2005. 640 p. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750675451>>. Acesso em: 07 set. 2011.

CANUTO, Rudson Haber. **Aproveitamento de energia com implementação de turbo expensor instalado na refinaria Henrique Lage da Petrobras**. 2010. 50 f. Monografia (Graduação) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

CASTRO, Raphael de Souza. **Análise de custos e eficiências de motores elétricos e motores de combustão interna**. 2010. 56 f. Monografia (Graduação) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

CHAN, Wai Nam. **Quantificação e redução de emissões de gases de efeito estufa em uma refinaria de petróleo**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 138 p. Dissertação (Mestrado).

CORREA, Eduardo Coelho. **Balanco Termelétrico**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2002.

COSTA, Ennio Cruz da. **Compressores**. São Paulo: Edgard Blücher, 1978. 172 p.
FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de indução**. São Paulo: Érica, 2000.

DOE, DEPARTMENT OF ENERGY. **Technology roadmap for the petroleum industry**. US DOE, Draft, 41p., 2000.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook 2010**. Paris, 2010.
Disponível em:
<http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/weo2010_es_portuguese.pdf>
Acesso em: 14 jul. 2011.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: Synthesis report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Disponível em:
<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2011.

LEITÃO, Renato Soares. **Sistemas de conversão de energia II**. Limeira, 2009. 125 p.
Disponível em:
<<http://www.trajanocamargo.com.br/arquivos/eletroeletronica/SCEII.pdf>>. Acesso em:
25 set. 2011.

MAZURENKO, Anton Stanislávovich; TEIXEIRA, Flávio Neves. Turbinas a vapor.
In: LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004. Cap. 5, p. 249-319.

PHYLIPSEN, Dian et al. Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO2 emissions. **Energy Policy**, Dutch, v. 30, n. 8, p.663-679, jun. 2002.

RANADE, S. M.; ROBERT, W. E.; ZAPATA-SUAREZ, A.. Evaluate electric drive applications quickly. **Hydrocarbon Processing**, Houston, n., p.41-45, out. 1988.

REVAP. **Manual da unidade de craqueamento catalítico**. São José dos Campos: Petrobras, 1997.

RODRIGUES, Paulo Sérgio Barbosa. **Compressores industriais**. Rio de Janeiro: EDC, 1991. 515 p.

SADEGHBEIGI, Reza. **Fluid catalytic cracking handbook: Design, operation and troubleshooting**. Second edition Houston: GPP, 2000. 384 p.

SCIUBBA, Enrico. Turbines, Steam. In: CLEVELAND, Cutler J.. **Encyclopedia of energy**. Roma: Elsevier, 2004. p. 231-254. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012176480X000978>>. Acesso em: 11 set. 2011.

ANEXO – TABELA 7 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial

Tabela 7 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial

Questões	Respostas	Avaliação
1. Qual é o tipo do equipamento?	Soprador	7
2. Qual é a potência do acionador em HP?	14500	7
3. É uma aplicação de velocidade fixa ou de velocidade variável?	Velocidade variável	7
4. Qual o preço da eletricidade em US\$ / MWh?	115,00	$1,5 \times 10 = 15$
5. Qual o preço do combustível em US\$/MMBtu?	9,66 - Cenário pessimista 7,56 - Cenário tendencial 5,55 - Cenário otimista	$1,7 \times 10 = 17$ $1,7 \times 8 = 13,6$ $1,7 \times 6 = 10,6$
6. Qual a tensão máxima existente para fornecimento de eletricidade?	13,8 kV	10
7. Qual o tipo de unidade? Se for turbina a vapor, continue as próximas questões. a. turbina a vapor; b. turbina a gás; c. expensor.	7.a	10
8. Qual é a classificação desta turbina? a. contrapressão simples; b. condensação; c. extração/contrapressão; d. extração/condensação.	8.a	10
Se a resposta para a questão 8 for 8.a ou 8.b, responda às questões de 9 a 13, caso contrário, este artigo não é aplicável.		
9. Qual é a eficiência isentrópica desta turbina?	77%	$2 \times 1 = 2$

Tabela 8 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial (continuação)

Questões	Respostas	Avaliação
<p>Se a resposta for 8.a ou 8.b:</p> <p>10. A substituição desta turbina a vapor por um motor elétrico irá gerar um excedente de vapor de alta pressão e um déficit de vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado. Se houver um excedente de vapor:</p> <p>a. a produção de vapor de alta pressão será reduzida por um dos seguintes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • reduzir demanda de outras unidades da planta; • reduzir demanda de empresas externas; • diminuição de produção na caldeira; • uso de válvula redutora de pressão; • instalação de um turbogerador; • substituição da caldeira existente por uma caldeira de recuperação (uso dos gases de exaustão de uma turbina a gás); • processo de calor residual; • qualquer outro método. <p>ou,</p> <p>b. manter a produção de vapor de alta pressão e:</p> <p>i) livrar-se do excedente por um dos seguintes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • aumentar oferta para outras unidades da planta; • aumentar oferta para empresas externas; • uso no sistema de água de alimentação de caldeira; • uso em condensadores; • abertura de vent's; • qualquer outro método. Ou, <p>ii) usar o vapor de alta pressão excedente para produzir vapor de média ou de baixa pressão ou condensado por um dos seguintes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • instalação de turbogerador; • uso de válvula redutora de pressão. 	<p>10.a. diminuição de produção na caldeira.</p>	<p>8</p>

Tabela 9 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial (continuação)

Questões	Respostas	Avaliação
<p>11. Se sua resposta a 10 foi 10.a ou 10.b.i, então, você pode:</p> <p>a. 1. diminuir o uso de vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado por um dos seguintes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • abertura de vent's; • uso em condensadores; • uso de válvula redutora de pressão; • uso no sistema de água de alimentação de caldeira; • instalação de turbogerador; • reduzir demanda de outras unidades da planta; • reduzir demanda de empresas externas; • qualquer outro método. Ou, <p>b. 1. aumentar o uso vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado por um dos seguintes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • uso de calor residual em algum processo; • uso de caldeira com combustível comprado; • substituição da caldeira existente por uma caldeira de recuperação (uso dos gases de exaustão de uma turbina a gás); • aumentar demanda de outras unidades da planta; • aumentar demanda de empresas externas; • qualquer outro método. <p>Por outro lado, se a sua resposta a questão 10 foi 10.b.ii, você pode:</p> <p>a. 2. diminuir o uso de vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado por um dos métodos descritos em 11.a.1; ou,</p> <p>b. 2. aumentar o uso vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado por um dos métodos descritos em 11.b.1.</p>	<p>O condensado produzido por esta turbina segue direto para o sistema de água de resfriamento, portanto, a não produção deste condensado é interessante para o processo visto que reduzirá a vazão de água na torre de resfriamento. Desta maneira, considera-se pontuação máxima para esta questão.</p>	<p>10</p>

Tabela 10 - Respostas e avaliação do questionário da triagem inicial (continuação)

Questões	Respostas	Avaliação
12. Num futuro próximo, você pode prever: <ul style="list-style-type: none"> a. aumento da demanda de vapor de alta pressão; b. redução da demanda de vapor de alta pressão; c. constância na demanda de vapor de alta pressão. 	12.c. a tendência na refinaria é expandir a produção e para isso é necessária uma maior quantidade de vapor de alta pressão.	10
13. Num futuro próximo, você pode prever: <ul style="list-style-type: none"> a. aumento da demanda de vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado; b. redução da demanda de vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado; c. constância na demanda de vapor de média ou de baixa pressão ou de condensado. 	13.c. a tendência na refinaria é expandir a produção, ou seja, aumentar a demanda no sistema de água de resfriamento, portanto, quanto menos condensado já existir no processo, melhor.	10