

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

RICARDO LANDAL DE CAMPOS

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A SUBSTITUIÇÃO DO PRÉ-
AQUECEDOR DE AR DE COMBUSTÃO DOS Fornos DE UMA UNIDADE DE
DESTILAÇÃO DO SETOR PETROQUÍMICO.**

Porto Alegre, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

RICARDO LANDAL DE CAMPOS

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A SUBSTITUIÇÃO DO PRÉ-
AQUECEDOR DE AR DE COMBUSTÃO DOS FORNOS DE UMA UNIDADE DE
DESTILAÇÃO DO SETOR PETROQUÍMICO.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado junto à atividade de ensino “Projeto Tecnológico” do Curso de Química Industrial, como requisito parcial para obtenção do grau de Químico Industrial.

Prof. Dr. Renato Cataluña Véses
Orientador
Eng. Paulo Ricardo Kugland de Azevedo
Co-orientador

Porto Alegre, 2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo amparo nas tempestades da vida.

À minha esposa Adriane Ayres de Oliveira, pelo amor, incentivo e paciência. Sem você meu mundo seria incompleto.

Aos meus pais, por me possibilitarem o acesso a esta Universidade pelo suor e sacrifício dos seus labores. À minha mãe Maria Lucia Landal de Campos por não ter desistido nos momentos de tormenta.

Aos meus irmãos, Ronaldo e Ana Paula Landal de Campos, pelo sentimento de nunca estar sozinho.

Aos meus sogros Vilson Santos de Oliveira e Maria Loreni Ayres, por me ensinarem o valor do otimismo e da mudança.

Aos colegas e amigos da REFAP pelo companheirismo nos momentos de maior necessidade. Em especial aos amigos do GRUPO 5.

Aos que lutam por um ensino público, gratuito e de qualidade.

Aos amigos Fábio Mota, Maurício Silva de Souza e Edson Flores que estiveram ao meu lado em diferentes etapas desta longa jornada.

Aos orientadores Prof. Dr. Renato Cataluña Véses e Eng. Paulo Ricardo Kugland de Azevedo pelo compartilhar de conhecimentos e à dedicação nos momentos de dúvida. Pelos quais também agradeço à UFRGS e à Petrobras por permitirem a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso racional de energia é, sem dúvida, uma preocupação de toda a sociedade. Na indústria o consumo de energia tem relevante participação nos custos, além do impacto nos indicadores ambientais.

Todos os processos com potencial de redução de desperdício e/ou aproveitamento de energia devem despertar o interesse dos profissionais da área, a fim de encontrar soluções e minimizar as restrições operacionais. Através do acompanhamento de dados de processo foram identificados sintomas e estimado o percentual de vazamentos em um pré-aquecedor de ar de combustão dos fornos de uma unidade de destilação de petróleo.

Com os dados levantados foi possível realizar a análise econômica para a substituição do equipamento. Sob o enfoque da economia de energia somado aos incrementos na produção de diesel na torre de destilação atmosférica, chegou-se a conclusão de que a substituição é viável técnica e economicamente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modos de transferência de calor.....	9
Figura 2. Quantidade mínima de ar em função do combustível.....	13
Figura 3. Efeito da temperatura dos gases de combustão no desperdício de combustíveis.....	14
Figura 4. Bateria de pré-aquecimento do petróleo.....	17
Figura 5. Esquema simplificado do processo de destilação do petróleo.....	18
Figura 6. Forno de aquecimento de petróleo.....	19
Figura 7. Arranjo do pré-aquecimento de ar dos fornos A e B.....	20
Figura 8. Pré-aquecedor de ar Ljungström.....	23
Figura 9. Folgas de vazamento do pré-aquecedor regenerativo.....	25
Figura 10. Danos causados pela fadiga nas selagens radiais.....	26
Figura 11. Temperaturas de entrada e saída dos gases e do ar no PAF.....	27
Figura 12. Teores de O ₂ (%) antes e depois do PAF.....	28
Figura 13. Volume de controle.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição volumétrica e mássica do ar.....	11
Tabela 2. Composição típica de gás de refinaria.....	11
Tabela 3. volume mínimo de O ₂	12
Tabela 4. Composição típica de gás combustível.....	22
Tabela 5. Dados de projeto do trocador regenerativo Ljungström.....	27
Tabela 6. Vazões médias das correntes envolvidas.....	30
Tabela 7. Dados de cálculo dos fluxos de calor envolvidos.....	30
Tabela 8. Cálculo de economia de combustível.....	32

SUMÁRIO

1. Apresentação	8
2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 Fundamentos Teóricos.....	9
2.1.1 A combustão.....	10
2.1.2 Cálculo da quantidade estequiométrica de ar.....	11
2.1.3 O Excesso de ar.....	13
2.1.4 O poder calorífico.....	14
2.1.5 A transferência de calor.....	15
2.2 Visão Geral de uma unidade de destilação de petróleo.....	16
2.3 Fornos de aquecimento de petróleo.....	18
2.3.1 Limitação dos fornos.....	21
2.4 Combustíveis.....	21
2.5 O pré-aquecedor de ar para os fornos.....	23
2.5.1 Vazamentos.....	24
3. Apresentação do problema	25
4. Análise técnica	26
4.1 Dados de projeto e sintomas.....	26
4.2 Balanços de energia e massa.....	29
4.3 Demonstração dos cálculos.....	29
5. Análise econômica	31
5.1 Análise por consumo de combustível.....	31
5.2 O impacto na produção de diesel.....	32
5.3 Investimento para um novo pré-aquecedor.....	33
6. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1. Apresentação

A indústria do petróleo se caracteriza pela complexidade dos seus processos e os sucessivos desafios que se apresentam para a melhoria nas suas condições operacionais e na segurança das instalações. No processamento do petróleo, com a necessidade de operações em altas temperaturas um dos campos promissores de atuação está na busca da eficiência energética das operações. Como resultado desses esforços, as refinarias reduzem os custos com energia e diminuem os impactos ambientais.

Entre as operações de aquecimento, um dos equipamentos mais importantes é o forno. Com grande relevância na indústria química e petroquímica as operações de aquecimento dependem uma elevada quantidade de energia. Os fornos são equipamentos onde um fluido é aquecido e/ou vaporizado a fim de ser condicionado para um processo físico-químico seguinte. Na indústria do petróleo uma de suas principais aplicações está nas unidades de destilação, onde o petróleo é aquecido em fornos a fim de entrar na torre de destilação em temperaturas ideais para o seu fracionamento.

Com as crescentes demandas do país de aumento de capacidade de processamento no refino de crus, os esforços das refinarias se concentram nos estudos e investimentos no sentido de eliminar os “gargalos” das unidades de processamento. Os desejados incrementos de vazão de carga da unidade devem ser acompanhados da manutenção da temperatura do petróleo na saída dos fornos o que demanda uma maior vazão de combustível e ar para queima.

Para aumentar a eficiência energética de um forno, a recuperação da energia dos gases exaustos de combustão se torna um importante caminho. O objetivo deste trabalho é o estudo da viabilidade econômica para substituição de um pré-aquecedor de ar de combustão dos fornos de uma unidade de destilação de petróleo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos teóricos

Os fundamentos teóricos referentes à transferência de calor foram baseados na referência Incropera et. al (2008).

Calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. São três as formas de transferência de calor:

A **condução** é a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância ocorrida devido às interações entre partículas. Na presença de um gradiente de temperatura essa transferência ocorre na direção de diminuição de temperatura.

A **convecção** é uma forma de trânsito de calor que abrange dois mecanismos. Além de transferência devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido.

A **radiação** térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra em uma temperatura não nula. A radiação não precisa de um meio material para ser transmitida.

A figura 1 compara as três formas de transferência de calor

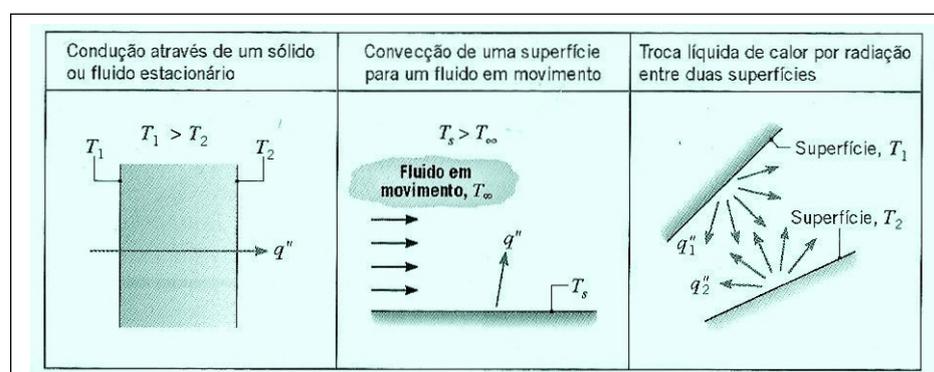


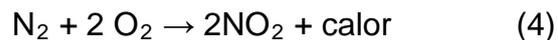
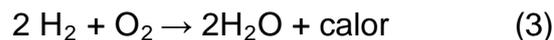
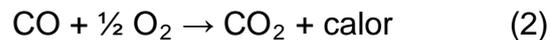
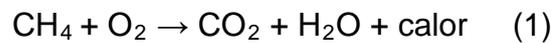
Figura 1: Modos de transferência de calor

Fonte: INCROPERA et al., 2008

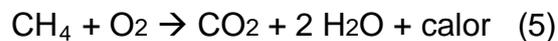
2.1.1 A combustão

Reações de combustão são reações químicas exotérmicas que envolvem a oxidação completa de um combustível. Materiais ou compostos podem ser considerados combustíveis industriais quando sua oxidação pode ser feita com liberação de energia suficiente para aproveitamento industrial.

Nessa condição, os hidrocarbonetos derivados do petróleo e o gás natural têm fundamental importância. Para a combustão completa de metano, monóxido de carbono, hidrogênio e nitrogênio temos as seguintes reações:



Como exemplo, a combustão completa do metano é dada pela seguinte equação química:



Raramente um combustível é queimado com oxigênio puro. O ar do ambiente é a fonte de oxigênio para a maioria dos processos industriais.

Os processos de combustão vêm sofrendo vários ajustes e modificações ao longo dos anos sejam por causa da própria evolução dos métodos de controle e segurança do processo, ou pela grande variedade de combustíveis a serem queimados e também pela evolução dos equipamentos destinados a realizá-la. O conhecimento das quantidades de ar para a combustão, bem como a composição e volume dos produtos de queima são relevantes para o projeto e controle de equipamentos como fornos e caldeiras.

2.1.2 Cálculo da quantidade estequiométrica de ar

O balanço de massa consiste na análise das quantidades de ar e de gás fornecidas ao sistema para que se possa realizar a combustão, assim como na análise das quantidades dos produtos de combustão. Os valores aproximados do ar atmosférico são:

Componentes	% volumétrico	% mássico
O ₂	20,90%	23,20%
N ₂	79,10%	76,80%

Tabela 1: Composição volumétrica e mássica do ar

Pode-se então calcular a quantidade estequiométrica de ar necessária para a combustão de uma mistura de gases a partir da equação estequiometricamente balanceada. Tomemos como exemplo uma composição típica de um gás combustível de refinaria dado pela tabela 2:

Gás Combustível	
Componentes	(% volume)
Hidrogênio	30
Metano	40
Eteno	13
Etano	17

Tabela 2: Composição típica de gás de refinaria (Dados Petrobras)

Baseado nas equações 1, 2, 3 e 4 construímos a tabela que mostra as quantidades estequiométricas de O₂ para a combustão de 1m³ de cada um dos componentes da mistura de gases.

Componentes	O _{2t} =Quantidade Teórica de O ₂ (m ³)
H ₂	0.5
CH ₄	2
C ₂ H ₄	3
C ₂ H ₆	3.5
N ₂	2

Tabela 3: Volume mínimo de O₂

Assim sendo, a quantidade teórica total de oxigênio necessária para a combustão completa de uma mistura de gases corresponde à soma das quantidades exigidas por cada um dos componentes (O_{2m}). Tomando como referência a mistura da tabela 01 temos:

$$O_{2m} = \sum(V_i / 100 * O_{2ti})$$

Onde:

V_i = % volume de cada gás na mistura

O_{2ti} = volume teórico de O₂ para combustão completa de cada gás da mistura

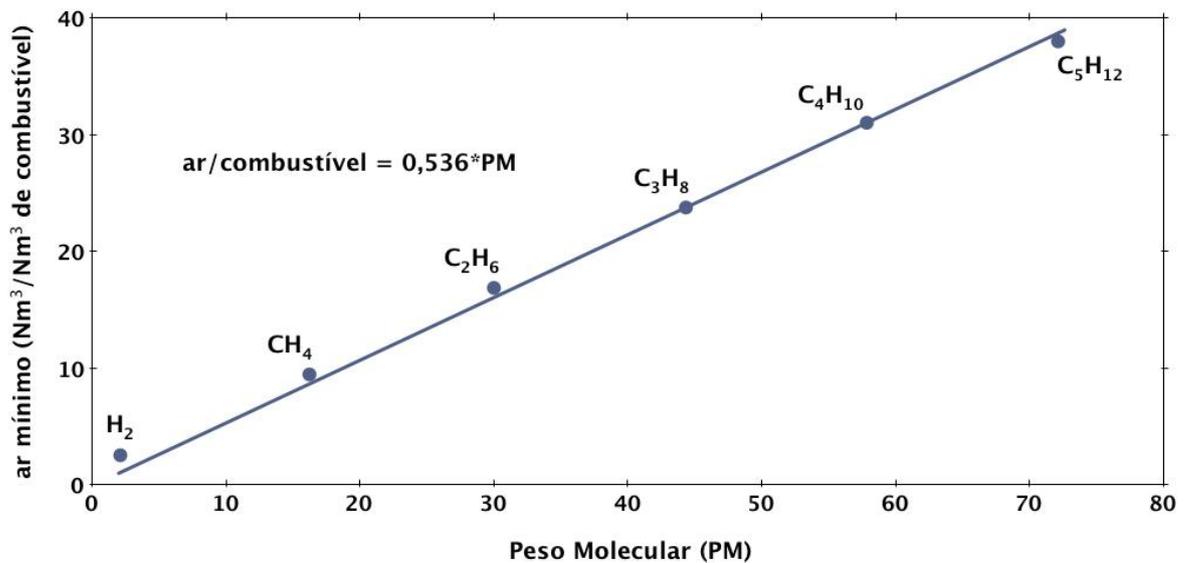
Operando a equação com os dados fornecidos pelas tabelas 2 e 3 chegamos ao valor para O_{2m} de 1,885 Nm³ de O₂ são necessários para a combustão de 1Nm³ da mistura de gás combustível. O volume normal (Nm³) é calculado com base nas condições padrão de 101.325 kPa e 273.15K (DIN 1343).

Como o O₂ utilizado na queima é proveniente do ar atmosférico, a quantidade mínima de ar que deve ser fornecida ao sistema de combustão é obtida através da equação (6):

$$Ar_m = 100 / 20,9 * O_{2m} \quad (6)$$

Utilizando-se a composição volumétrica dos gases que compõem o ar (tabela 1), verifica-se que para cada m³ de O₂ existem aproximadamente 3,79m³ de N₂.

Assim, para a combustão de 1 m^3 da mistura são necessários $1,885 \text{ m}^3$ de O_2 que estarão misturados em aproximadamente 9 m^3 de ar. Então a relação estequiométrica ar/gás para essa mistura é de 9:1. Essa relação plotada no gráfico da figura 2 permite estimar o peso molecular médio da mistura em $16,79 \text{ g/mol}$, valor muito aproximado do peso molecular do metano.



**Figura 2: Quantidade mínima de ar em função do combustível
(Adaptado de King, 2011)**

2.1.3 Excesso de ar

Em função da incapacidade de um sistema de combustão em realizar uma combustão completa apenas com a quantidade estequiométrica, um montante de ar em excesso deve sempre ser suprido ao sistema para se minimizar a produção dos compostos intermediários da reação que, em condições ideais, não devem estar presentes nos produtos de combustão. Teoricamente o excesso de ar é dado por:

$$\% \text{ar}_{\text{excesso}} = \frac{\text{ar}_{\text{total}} - \text{ar}_{\text{estequiométrico}}}{\text{ar}_{\text{estequiométrico}}} \times 100 \quad (7)$$

A quantidade mínima de ar em excesso para se garantir uma combustão completa varia de acordo com o combustível empregado e com a eficiência da mistura entre ar e combustível proporcionada pelos combustores. Caso esse excesso fornecido seja menor do que uma quantidade mínima haverá combustão incompleta, havendo então perdas de gases combustíveis não queimados (figura 3) e produção de CO. Por outro lado uma quantidade muito grande de excesso irá diluir o gás de combustão, reduzindo a sua temperatura e a transferência de calor.

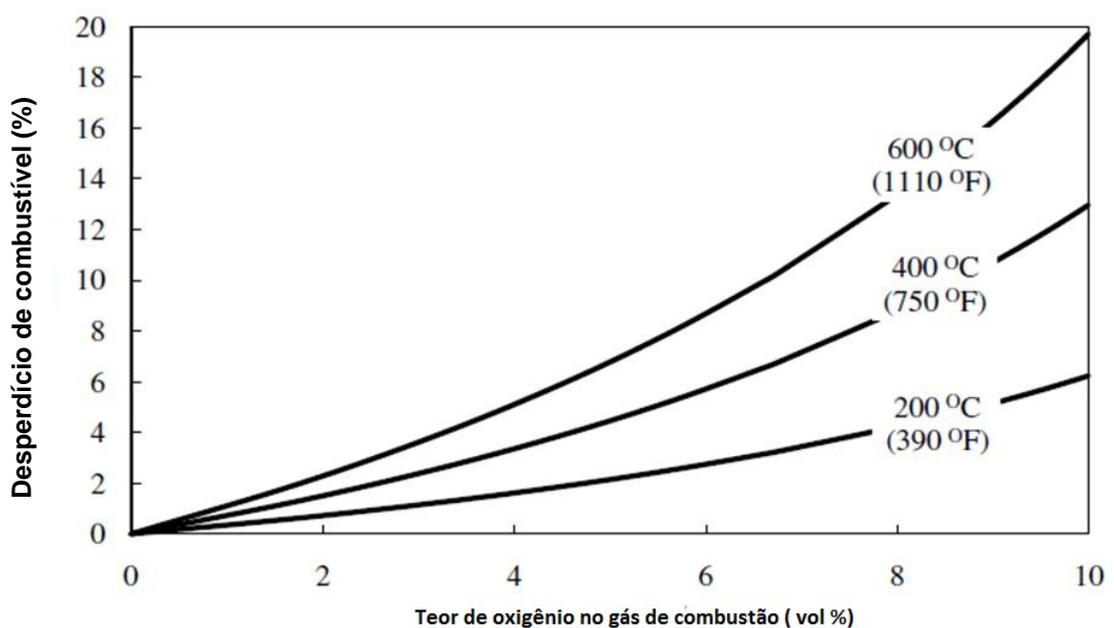


Figura 3: Efeito da temperatura dos gases de combustão no desperdício de combustíveis (King, 2011).

2.1.4 O poder calorífico

O poder calorífico de combustíveis é definido como a quantidade de energia interna contida no combustível, sendo que quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida. Há dois tipos de poder calorífico:

- poder calorífico superior (PCS)

- poder calorífico inferior (PCI)

O PCS é a quantidade de calor produzida por 1 kg de combustível, quando este entra em combustão, sem excesso de ar, e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água neles seja condensado.

O PCI é a quantidade de calor que pode produzir 1 kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada.

Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nas aplicações industriais, a água contida neles se encontra sempre no estado de vapor, portanto na prática, o que deve ser considerado é o poder calorífico inferior e não o superior.

2.1.5 A transferência de calor

A termodinâmica conceitualmente está interessada nos estados de equilíbrio da matéria e um estado de equilíbrio elimina necessariamente a existência de um gradiente de temperatura. Porém a disciplina de transferência de calor se torna complementar, pois vai tratar justamente dos estados de não equilíbrio da termodinâmica, gerados justamente por uma diferença de temperatura. A primeira lei da termodinâmica permite afirmar que:

“A taxa de aumento da quantidade de energia térmica e mecânica acumulada (armazenada) em um volume de controle deve ser igual à taxa na qual as energias térmicas e mecânicas entram no volume de controle, menos a taxa na qual as energias térmica e mecânica deixam o volume de controle, mais a taxa na qual a energia térmica é gerada no interior do volume de controle”

Na maioria das aplicações em sistemas abertos de interesse, variações na energia latente entre as condições de entrada e saída podem ser desprezadas, de tal forma que a energia térmica se reduz somente ao componente sensível. Se o fluido é considerado um gás ideal com calores específicos constantes, as diferenças de entalpias (por unidade de massa) entre os escoamentos de entrada e saída são relacionadas com suas respectivas temperaturas. Considerando também, condições de regime estacionário e ausência de geração de energia térmica, há pelo menos

dois casos nos quais considerações adicionais podem ser feitas para obtermos a equação simplificada da energia térmica para escoamento de gases:

$$Q = m \times C_p \times (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}) \quad (8)$$

- Um gás ideal com variações de energia cinética e potencial desprezíveis e trabalho desprezível;
- Um gás ideal com dissipação viscosa desprezível e variação de pressão desprezível.

A dissipação viscosa é a conversão de energia mecânica em energia térmica associada às forças viscosas. Ela é importante somente em situações envolvendo escoamento em alta velocidade e/ou fluido altamente viscoso. Como muitas aplicações da engenharia satisfazem uma ou mais das condições anteriores, a equação (8) é normalmente usada na análise de transferência de calor em fluidos em movimento.

2.2 Visão Geral de uma unidade de destilação de petróleo

O petróleo ao chegar à refinaria é armazenado em tanques onde deve permanecer um tempo para decantação e drenagem de águas residuais. Após esse processo é bombeado para a unidade de destilação atmosférica, sendo esta a primeira etapa do refino do petróleo.

Ao entrar na unidade ele passa por uma bateria de permutadores de pré-aquecimento (figura 4) trocando calor com as correntes de saída da torre de destilação, o objetivo neste estágio é chegar a 130°C, temperatura ideal para ser processado nas dessalgadoras, equipamentos onde a salmoura (água com sal) é separada do petróleo ao ser submetido a um precipitador eletrostático.



Figura 4: Bateria de pré-aquecimento de petróleo

Ao sair das dessalgadoras o petróleo, devido a um segundo estágio de bombeamento, passa na segunda bateria de pré-aquecimento onde alcança a temperatura de 235°C para então entrar nas serpentinas dos fornos que fornecerão a energia necessária para ser parcialmente vaporizado e então ser fracionado na torre de destilação.

O processo de fracionamento ocorre quando o líquido descendente no seu ponto de bolha entra em contato com o vapor ascendente em seu ponto de orvalho. As duas correntes trocam calor e massa entre si fazendo com que a corrente gasosa enriqueça-se de componentes mais voláteis e a corrente líquida com os componentes menos voláteis. (Brasil, 2000).

Na torre da unidade, objeto de estudo deste trabalho, os hidrocarbonetos se separam em cinco frações líquidas sendo elas: nafta pesada, querosene, diesel leve, diesel pesado e resíduo atmosférico como produto de fundo. Há ainda uma fração

gasosa que sai no topo, que será parcialmente condensada para ser enviada a torre debutanizadora. Nesta ocorre um segundo fracionamento que produzirá GLP (gás liquefeito de petróleo) e gás combustível (metano + etano) no topo e nafta leve (C_5-C_8) no fundo. A figura 5 ilustra o processo descrito.

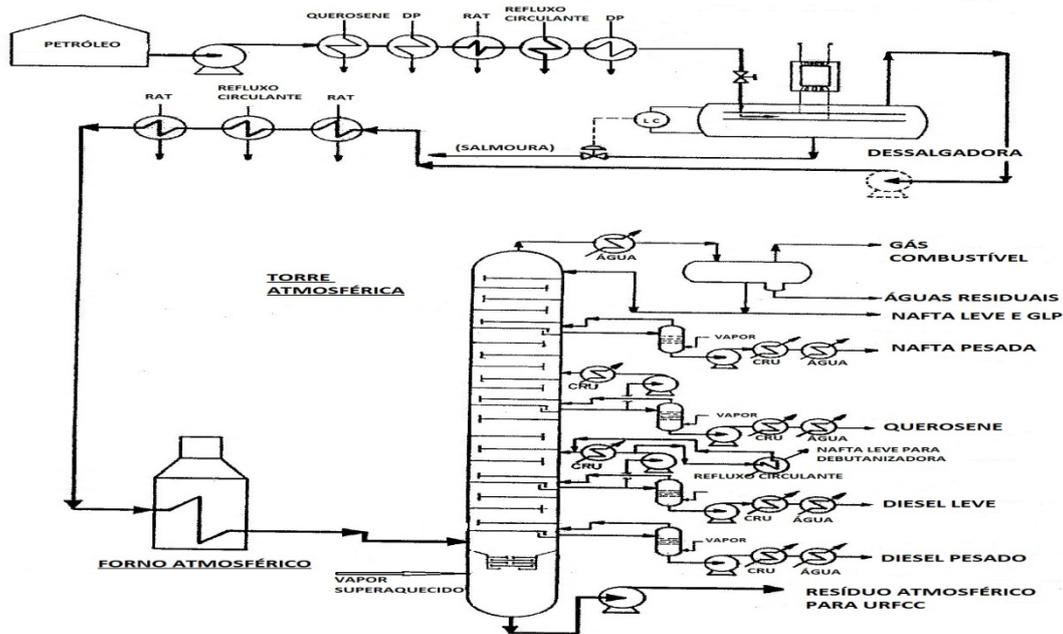


Figura 5: Esquema simplificado do processo de destilação do petróleo (Adaptado de Brasil, 2000)

2.3 Fornos de aquecimento de petróleo

Os fornos nas unidades de destilação são os equipamentos responsáveis pelo aquecimento do petróleo antes de entrar na torre de destilação. Com a linha de entrada de petróleo dividida em passes antes de adentrar o equipamento, essas derivações percorrem a câmara de combustão nas suas diferentes regiões, recebendo por radiação e convecção o calor fornecido pela queima de algum combustível (gás ou óleo) em um conjunto de queimadores. Os gases resultantes da combustão percorrem a câmara do forno podendo sair diretamente para a chaminé ou serem direcionados para o sistema de pré-aquecimento de ar a fim de cederem calor para o ar que será usado na queima do combustível.

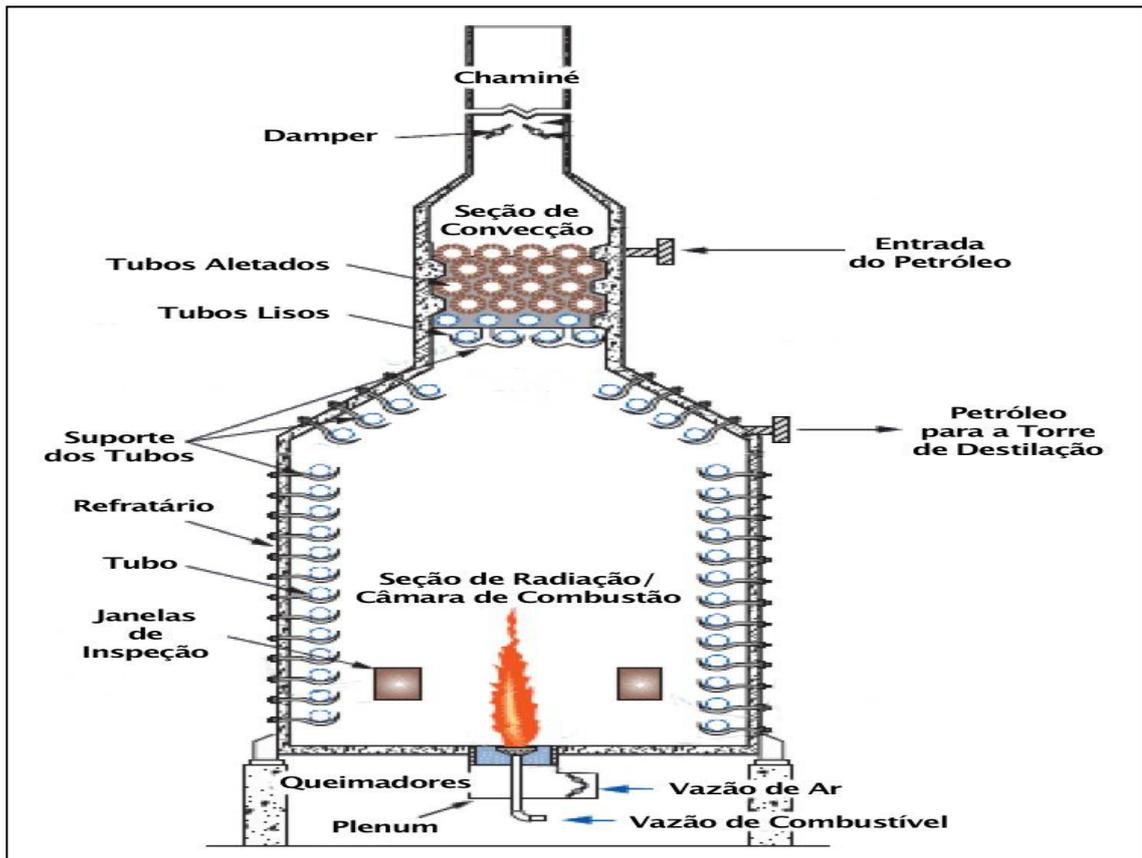


Figura 6: Forno de aquecimento de petróleo (Vinayagam, 2007).

O ar usado na combustão pode chegar aos queimadores de três maneiras diferentes:

- Pelas janelas de tiragem natural alimentadas diretamente com o ar do meio atmosférico (MODO NAT).
- Através de um ventilador, portanto de maneira forçada até os queimadores (MODO FOR).
- De forma balanceada, sendo aquecido em um trocador de calor de gases regenerativo, para então ser usado nos combustores (MODO BAL).

Na destilação do petróleo, tão importante quanto a eficiência do fracionamento na torre é a eficiência energética dos fornos, impactando diretamente na rentabilidade da planta. Segundo Lieberman e Lieberman (2008), os objetivos primários na operação de um forno são:

- Manter o fogo na câmara de combustão;

- Evitar uma densidade excessiva de calor na mesma;
- Maximizar o processo de absorção de calor para uma dada quantidade de combustível.

Para maximizar o processo de absorção de calor, o modo de tiragem balanceada com o uso de um PAF (Pré-aquecedor de Ar dos Fornos) é o mais adequado, pois permite que o ar da combustão seja pré-aquecido com o calor dos gases resultantes da queima. De forma que, o calor que seria gasto para aquecer o ar na câmara é usado para aquecer o petróleo que escoar nos tubos.

No arranjo há a necessidade de um ventilador que impele o ar atmosférico para o PAF e sucessivamente para cada forno e um exaustor dos gases de combustão que força a passagem pelo trocador de calor para então serem descartados em uma das chaminés. A figura 7 mostra o arranjo do PAF com a operação de dois fornos e a posição das válvulas de controle de pressão (PV A e PV B), vazão de ar para cada forno (FV A e FV B). E a localização dos analisadores contínuos (AI A , AI B, AI C).

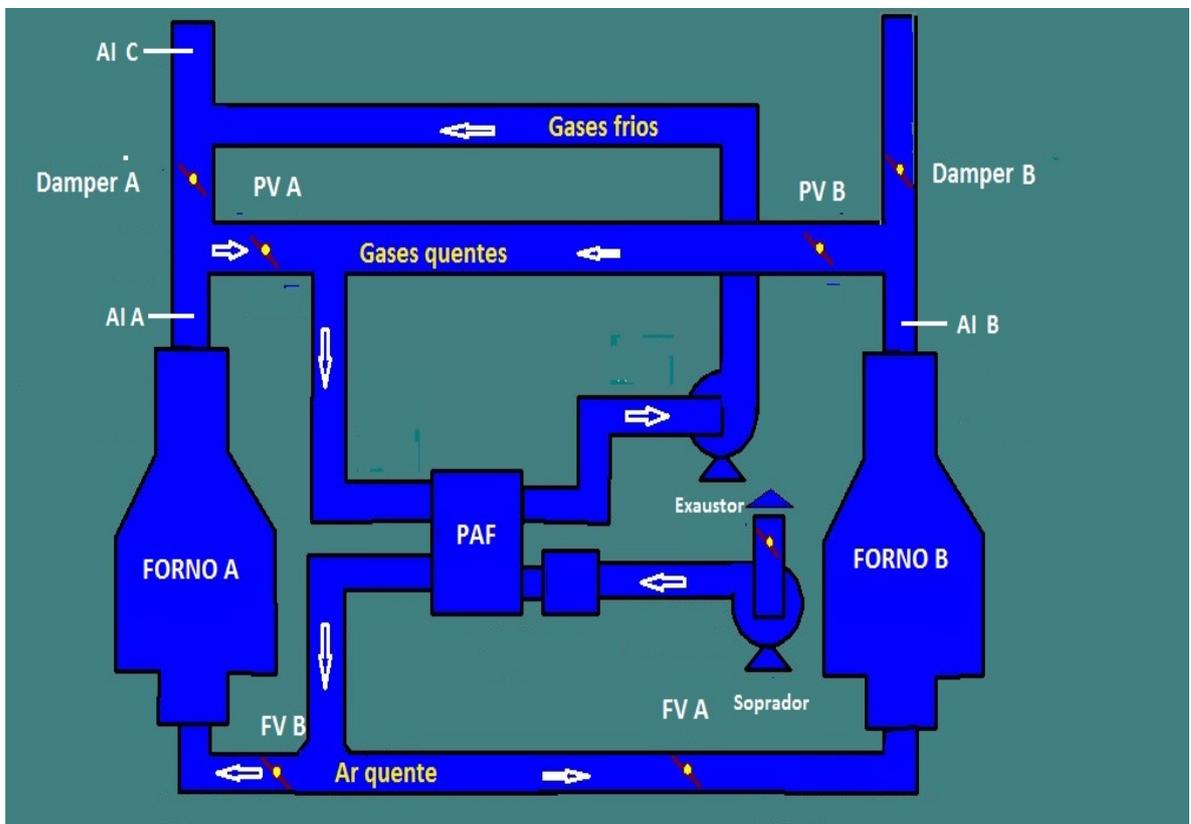


Figura 7: Arranjo do pré-aquecimento de ar dos Fornos A e B

2.3.1 Limitações dos Fornos

Os fornos da unidade onde foi realizado este trabalho, foram dimensionados para carga térmica de 40 Gcal/h cada um e compatível com carga de 20.000 m³/dia de petróleo. Quando a unidade processa petróleos mais leves, a maior vaporização exige mais energia, limitando as vazões de petróleo pela carga térmica dos fornos. Estes limites podem aparecer: na vazão de ar para queima, na carga térmica nominal dos fornos, na vazão de combustível, na temperatura da radiação, na temperatura de saída das convecções ou na temperatura das serpentidas de vapor das convecções. A limitação de interesse para este trabalho será a vazão de ar para os fornos, que pode ter como uma das causas os vazamentos no PAF.

2.4 Combustíveis

A unidade de destilação, objeto de estudo deste trabalho foi projetada com a operação de dois fornos onde a carga é dividida igualmente entre eles chegando a uma temperatura máxima de 375°C. O combustível a ser queimado é preferencialmente o gás combustível (mistura de gás natural e gás de refinaria), podendo ser usada a queima de óleo no caso de alguma instabilidade no anel de gás, geralmente causada por alguma parada do Craqueamento Catalítico, unidade que produz a maior quantidade de gás para a refinaria.

Porém o principal motivo para o uso do gás está nos menores índices de enxofre em sua composição que acarreta em emissões menos poluentes e problemas de corrosão atenuados (Pujadó e Jones, 2006). Segundo Farah(2012), para um mesmo petróleo, quanto mais pesada for a fração, maior será o seu teor de enxofre.

A tabela abaixo mostra a composição de gás combustível usados nos fornos:

Gás Combustível Tratado	
Componentes	(% volume)
Hidrogênio	30
Metano	40
Eteno	10
Etano	14
Nitrogênio	4
Outros	2

Tabela 4: Composição típica de gás combustível

O uso do óleo combustível com teores de enxofre de até 1% podem ocasionar sérios problemas de corrosão nos equipamentos. Segundo Gentil, o dióxido de enxofre e o trióxido de enxofre são os mais frequentes constituintes corrosivos nas atmosferas industriais em razão da queima de óleos combustíveis. Na presença de umidade e temperaturas baixas (em torno de 110°C), ácido sulfúrico e sulfuroso podem se formar e condensar no interior dos equipamentos do PAF conforme as seguintes reações:

- $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$
- $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- $\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$

A queima de óleos combustíveis pode possibilitar a formação de carbono na forma de fuligem que ao se depositar nas superfícies internas age como meio adsorvente dos gases SO_x facilitando a formação e condensação do ácido sulfúrico (Gentil,1996).

2.5 O pré-aquecedor de ar para os fornos

O regenerador de Ljungström é um tipo específico de trocador de calor regenerativo empregado em operações nas quais a razão de transferência de calor é de importância fundamental. Este equipamento promove a troca térmica entre correntes gasosas, sendo adaptável a muitas aplicações industriais que tenham tal necessidade.

Trata-se de um equipamento consagrado e projetado para operação ininterrupta em longas campanhas.

A figura 8 apresenta um regenerador Ljungstrom com seus principais componentes e os fluxos das correntes envolvidas.

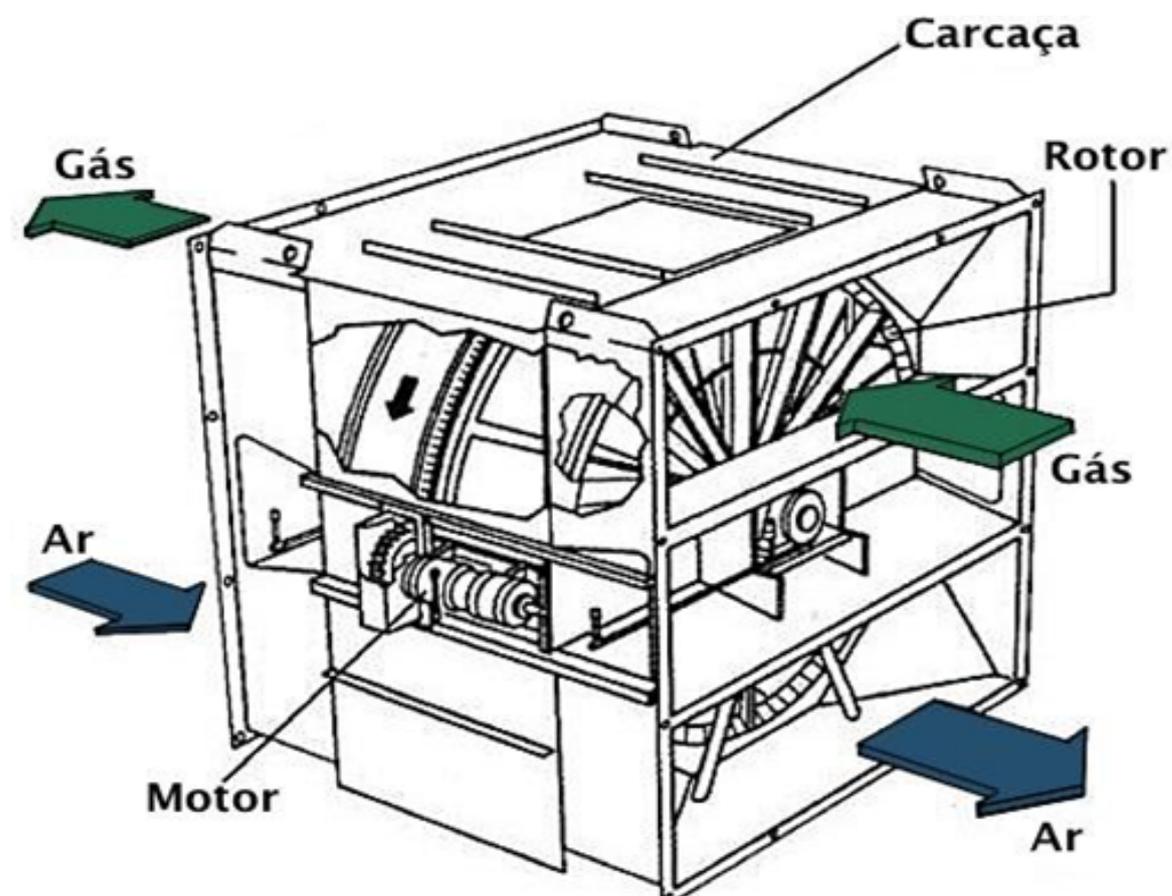


Figura 8: Pré-aquecedor de Ar Ljungström

(<http://steamofboiler.blogspot.com.br>)

Nos fornos de aquecimento de petróleo ele é utilizado para promover a troca de calor entre o ar usado na queima de combustíveis (corrente fria) e os gases de combustão (corrente quente). O gás quente escoar sobre a superfície dos elementos metálicos comumente denominados de matriz, aumentando a sua temperatura. À medida que o rotor gira, os elementos aquecidos se movem para dentro da corrente de ar frio que entra em sentido oposto, aumentando a sua temperatura.

Os trocadores de calor rotativos são produzidos em diversos tamanhos, dependendo da aplicação. Elementos de troca térmica diferentes são especificamente projetados para combustíveis ou aplicações específicas, com o desempenho refletindo um compromisso entre a resistência à erosão ou fuligem e a eficiência da transferência de calor.

Ao movimentar grandes quantidades de gás ou ar, os trocadores de calor regenerativos rotativos são uma solução extremamente eficiente e compacta. A razão disto é que ambas as superfícies de cada chapa do elemento são usadas simultaneamente para a transferência de calor, ao girarem através tanto do lado de gás quanto do ar.

2.5.1 Vazamentos

Em um regenerador rotativo a ocorrência de vazamento do gás de maior pressão para a corrente de gás de menor pressão é inevitável, pois há a necessidade de pequenas folgas de trabalho entre o rotor e a carcaça. Essas folgas permitem o funcionamento correto do equipamento, impedindo um possível travamento da matriz de elementos rotativos durante a operação.

De uma maneira geral, em sistemas que utilizam regeneradores rotativos, a corrente de fluido frio que passa pelo equipamento é mais pressurizada que a de fluido quente e os vazamentos decorrentes desta característica são denominados de vazamentos radiais.

Vazamentos axiais também ocorrem no regenerador, mas não têm relação com a diferença de pressão entre as correntes, já que não acontecem de uma corrente para outra (Mioralli, 2009). A figura 9 ilustra as folgas de vazamentos descritas.

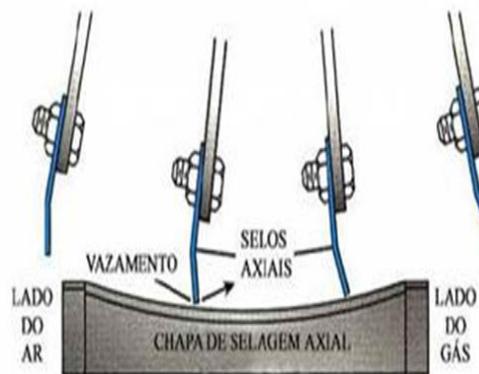
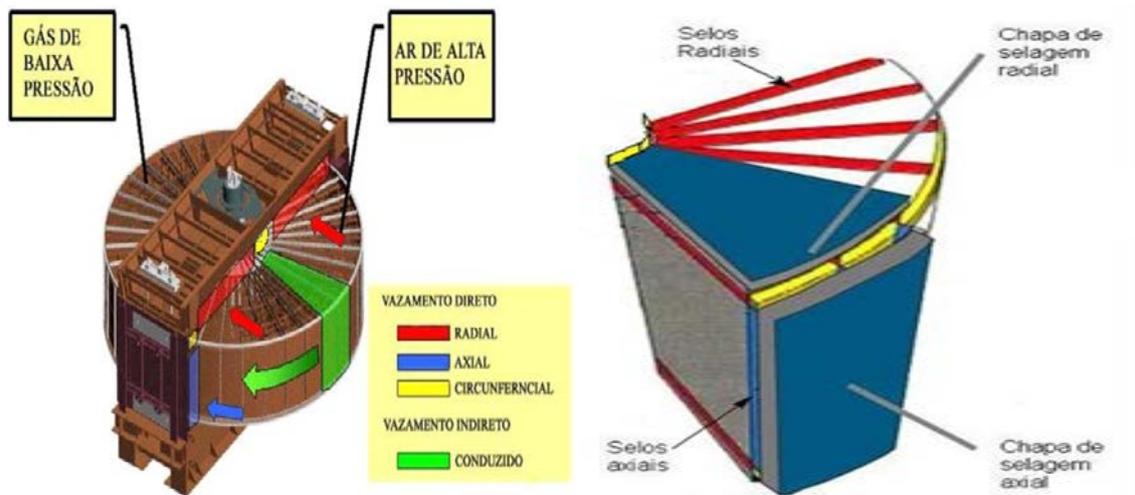


Figura 9: Folgas de vazamentos do pré-aquecedor regenerativo (Petrobras)

3. Apresentação do problema

Todo sistema que opera em regime contínuo deve periodicamente passar por algum tipo de manutenção. Nos trocadores de calor rotativos os problemas mais observados na prática são a corrosão dos elementos da matriz, perda de eficiência, desbalanceamento do conjunto rotativo, deformação de eixos, mancais danificados, danos no redutor de velocidade e vazamentos por corrosão da selagem.

O PAF, objeto de estudo deste trabalho, foi submetido à inspeção na última parada da unidade, quando foram evidenciados danos nos selos radiais, ocasionado

pela fadiga das peças. Estas chapas de selagem, conforme mostra a figura 10, estão projetadas para passarem rente à chapa da carcaça do permutador, reduzindo o vazamento.

Todavia, como em decorrência de corrosão da carcaça havia uma superfície irregular de vedação, na última parada foi instalada uma chapa plana sobre esta superfície. A deformação desta chapa causou interferência com as selagens radiais e os ciclos de deformações acarretaram a fadiga. (Como o rotor gira a cerca de 3 RPM, a cada dia eram mais de 1440 ciclos). As fotos da figura 10 mostram as selagens radiais do lado frio com danos causados pela fadiga.



Figura 10: Danos causados pela fadiga nas selagens radiais.

Apesar de já conhecidos os danos no PAF, é necessário dimensionar os custos operacionais dos mesmos para a decisão da viabilidade econômica da sua substituição.

4. Análise Técnica

4.1 Dados de projeto e sintomas

A tabela 5 mostra os dados de projeto para o permutador Ljungstrom do sistema objeto de estudo deste trabalho para 100% da carga térmica dos fornos.

Vazão (t/h)	AR	Entrada	150,94	
		Saída	136,2	
	GASES	Entrada	146,46	
		Saída	161,2	
Temperatura (°C)	AR	Entrada	60	
		Saída	332	
	Gases	Entrada	415	
		Saída	Sem vazamento	180
			Com vazamento	170

Tabela 5: Dados de projeto do trocador regenerativo Ljungström.

Considerando as temperaturas de entrada e saída do gás e do ar no permutador na situação sem vazamento do projeto temos a seguinte relação:

$$\Delta T_{ar} / \Delta T_{gás} = 1.16 \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

ΔT_{ar} = Temperatura de saída do ar – Temperatura de entrada do ar

$\Delta T_{gás}$ = Temperatura de entrada do gás – Temperatura de saída do gás

A figura 11 mostra as condições do processo para os parâmetros de temperatura dos fluidos envolvidos:

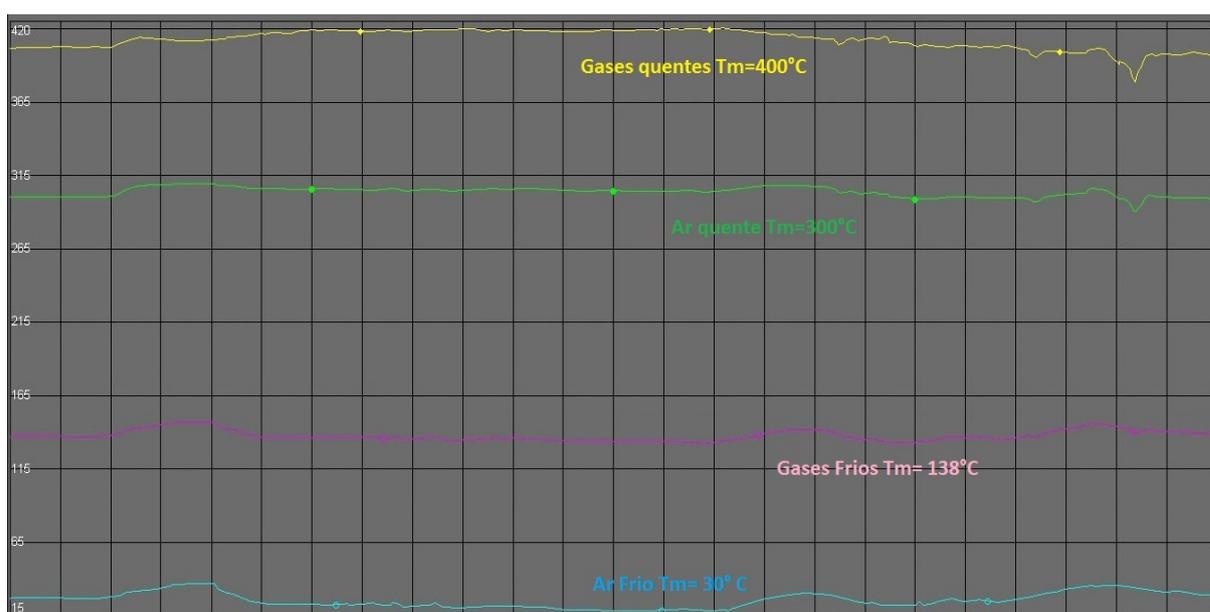


Figura 11: Temperaturas de entrada e saída dos gases e do ar no PAF

A análise dos dados médios do gráfico permite o cálculo pela equação (9) da relação obtida nas atuais condições operacionais chegando ao resultado de **1,01**. Admitindo a passagem da corrente de ar saindo junto com os gases frios, este valor caracteriza um sintoma de vazamento no PAF, pois o vazamento de ar frio diminuiria a temperatura de saída dos gases, diminuindo a razão ΔT .

A comparação dos teores de O_2 nos gases de combustão em diferentes pontos do sistema, quais sejam radiação ($\%O_2\text{rad}$), antes do PAF ($\%O_2\text{ap}$) e depois do PAF ($\%O_2\text{dp}$), permite confirmar o percentual de vazamentos.

Uma relação $\Delta T > 1.16$ seria explicada com uma possível infiltração de “ar falso” no forno causado por problemas de vedação. Para este caso:

$$\%O_2\text{rad} < \%O_2\text{ap} \approx \%O_2\text{dp}$$

Para uma relação $\Delta T < 1.16$ temos duas possíveis causas:

- Vazamento pelo damper da chaminé. Neste caso os teores de oxigênio nos diferentes pontos não variam significativamente.
- Vazamento no PAF. Comprovado pelo aumento significativo no teor de oxigênio depois do trocador no lado dos gases.

Os dados dos analisadores contínuos de O_2 no processo reforçam o diagnóstico de vazamento pela diferença de 4 a 5% nos valores dos teores de O_2 antes e depois do PAF demonstrados na figura 12:

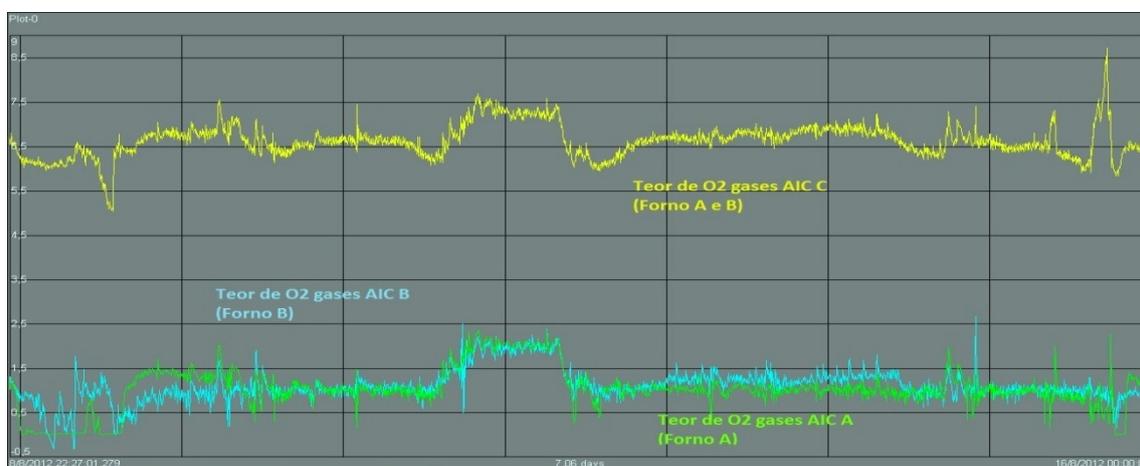


Figura 12: Teores de O_2 (%) antes e depois do PAF

4.2 Balanços de energia e massa

A figura 13 representa o volume de controle do pré-aquecedor:

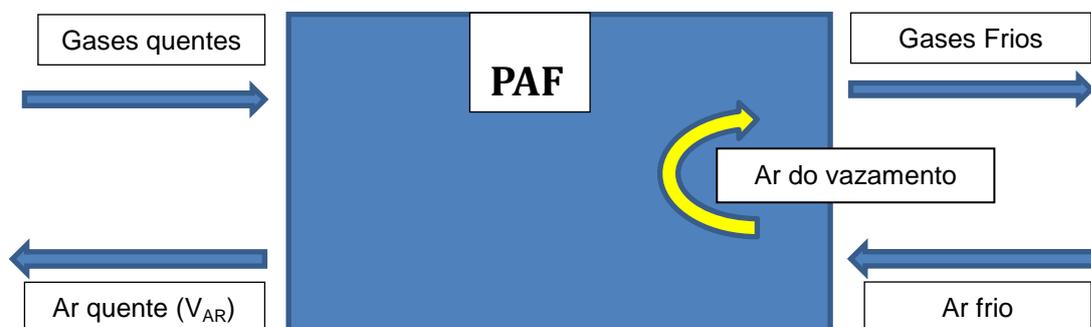


Figura 13: Volume de controle

A ferramenta utilizada para o tratamento de dados foi a construção de uma planilha em Excel, conectada aos servidores de dados das unidades de processamento da refinaria, que permite calcular as médias dos valores de processo em um período definido pelo usuário. Devido à constante mudança nas condições operacionais do sistema e ao grande número de variáveis, os dados de processo que serão aplicados nas equações de balanço são valores médios e os períodos escolhidos são aqueles em que a unidade está processando sua capacidade máxima de vazão de petróleo.

4.3 Demonstrações do cálculo

As tabelas 6 e 7 mostram uma compilação de dados extraídos da planilha para um dado período, sendo que a vazão volumétrica é dada pelos instrumentos do processo e a vazão mássica de ar foi calculada multiplicando-se pela densidade do ar $1,29 \text{ Kg/ m}^3$ (Incropera, 2008) e a vazão mássica de gás combustível pela densidade média do gás $0,82 \text{ kg/m}^3$ (Dados Petrobras).

Variáveis de Processo	Vazão (Nm ³ /h)	Vazão Mássica (kg/h)
Vazão de ar para o Forno A	66239	85448
Vazão de ar para o Forno B	63955	82502
Vazão total de ar para os fornos (V_{AR})	130194	167950
Vazão de GC Forno A	4054	3324
Vazão de GC Forno B	4115	3375
Vazão total de GC	8170	6699
Gases de combustão Forno A	70293	88772
Gases de combustão Forno B	68071	85877
Total	138363	174649

Tabela 6: Vazões médias das correntes envolvidas

Conforme a as premissas teóricas do item 2.1.4 aplica-se a equação (8) para o cálculo dos fluxos de calor de cada corrente, utilizando os valores de processo, obtendo os seguintes resultados:

$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$		m (kg/h)	C _p (kcal/kg.°C)	ΔT (°C)
Fluxo de Calor recebido pelo ar (Gcal/h)	12,1	167950	0,245	293
Fluxo de Calor cedido pelos gases (Gcal/h)	13,9	174649	0,295	270
(Q_d) Diferença (Gcal/h)	1,8			

Tabela 7: Dados de cálculo dos fluxos de calor envolvidos

A tabela 7 nos permite concluir que há uma diferença (Q_d) entre o calor cedido pelos gases e o calor com que o ar sai do regenerador. Essa diferença é atribuída ao calor cedido ao ar que vaza para a corrente de gases, uma vez que o calor perdido para o ambiente é desprezível, devido às características já descritas no item 2.5 deste trabalho. Essa é a diferença de fluxo de calor que está deixando de ser aproveitado para o aquecimento do ar que vai para a queima. Podemos

estimar a vazão mássica de ar vazando (V_{av}) aplicando este valor diretamente na equação de fluxo de calor:

$$V_{av} = \frac{Qd}{C_p \cdot \Delta T} \quad (10)$$

$V_{av} = 67879 \text{ kg/h}$

$$\%Vazamento = \frac{V_{av}}{V_{ar} + V_{av}} \times 100 \quad (11)$$

Substituindo os valores na equação (10) e (11) com os dados da tabela 7 obtemos um percentual de vazamento de 28,7 %. Este valor está bem acima dos níveis normais de vazamento do equipamento que estão entre 7 e 10% da vazão de ar do ventilador.

5. Análise econômica

5.1 A análise por consumo de combustível

Quando se fala do consumo de energia de uma determinada planta de produção de uma indústria, não se refere apenas ao consumo de energia elétrica, mas sim à somatória de todas as fontes de energia utilizadas, tais como os combustíveis.

Como cada combustível possui determinada quantidade de energia para cada unidade de massa consumida (PCI), não é correto apenas somar as quantidades utilizadas de combustível entre si. Antes de efetuar essa soma, faz-se necessário traduzir cada combustível em uma unidade comum, expressa em kg de Óleo Combustível Padrão Equivalente (kg OCPE). Logo, o consumo total de energia de uma refinaria pode ser expresso em massa OCPE por determinado espaço de tempo (hora, dia, mês).

Com o fluxo de calor perdido no ar que vaza demonstrado na tabela 7 converte-se essa energia perdida para OCPE obtendo o valor de 190 kg/h.

Dados de cálculo	OCPE
Redução do calor perdido (kcal/h)	1.862.628
Poder calorífico inferior (kcal/kg)	9.833*
Economia de combustível (kg/h)	190
Custo do combustível (US\$/kg)	0,50*
Economia anual (US\$)	820.800

Tabela 8: Cálculo de economia de combustível (* Dados Petrobras)

5.2 O impacto na produção de diesel

Conforme descrito no item 2.3.1 os fornos da unidade podem apresentar limitações nas suas cargas térmicas ao processar petróleos mais leves. Isso se dá pela maior quantidade de calor latente necessária para vaporização.

Para manter a quantidade de processamento, nestes casos o petróleo acaba saindo dos fornos em uma temperatura mais baixa, por exemplo, em torno de 367°C. A consequência deste fato é que parte da retirada na torre atmosférica que seria para a corrente de diesel acaba degradando para a corrente de fundo de resíduo atmosférico. Os cálculos da engenharia de otimização chegaram a um valor de 1,5% de diesel que se “perde” para o fundo da torre.

Diante destas limitações, qualquer incremento na capacidade térmica dos fornos representa um ganho na produção de diesel, derivado com valor agregado maior. Cada m³ de diesel degradado está estimado em um custo de aproximadamente US\$ 200,00. Para uma carga de processamento de 20000m³/dia, considerando que esta limitação ocorra em 70% do tempo, teremos um aumento de receita na ordem de US\$ 42000 / dia totalizando US\$1.260.000 por mês.

$$(20.000 \text{ m}^3/\text{dia}) \times 0,015 \times (200,00 \text{ US\$/m}^3) \times 0,70 = \text{US\$ 42.000,00 / dia}$$

5.3 Investimentos para um novo pré-aquecedor

Os serviços de instalação, além da compra de um novo equipamento, têm grande impacto no custo final do empreendimento, uma vez que a dimensão das máquinas, a complexidade das atividades envolvidas e a mão-de-obra especializada são os fatores que contribuem para o aumento do preço final. A compra de um novo PAF está cotada em **US\$ 600.000**. Os serviços de instalação são estimados em **US\$ 550.000**.

O total do investimento é de cerca de **US\$ 1.150.000**. Nota-se que este valor será recuperado em menos de um mês, considerando o cálculo do rendimento de diesel apresentado no item 5.2. Deste patamar em diante, retirada a limitação atual, os ganhos serão significativos, tanto do ponto de vista da produção de diesel, quanto na economia de energia.

6. CONCLUSÃO

As inspeções nas últimas paradas de manutenção do PAF já indicavam um potencial de vazamento de ar no equipamento. O objetivo deste trabalho foi o de analisar os sintomas e dar um dimensionamento aos vazamentos. O método adotado foi o balanço térmico e análise dos teores de O₂ no sistema. Desta forma:

- Pela análise da economia de combustível, se conclui que o retorno do valor total de investimento, deve se dar em aproximadamente 17 meses.
- Analisando o impacto na produção pode-se afirmar que se está perdendo em rendimento de diesel um pouco mais que um regenerador novo e instalado por mês.
- Quando o forno é a principal restrição em uma unidade de destilação de petróleo todo o calor que pode ser recuperado vai para o aquecimento do petróleo, permitindo desta forma temperaturas de saída maiores, o que impacta diretamente na produção de diesel.

Identificadas essas situações, recomenda-se a substituição do regenerador Ljungström, que deverá ser feita o quanto antes, avaliando-se um período em que se possa operar com os dois fornos em tiragem natural, uma vez que é possível a realização dos serviços com a unidade em operação.

REFERÊNCIAS

- ANNARATONE, D. **Engineering Heat Transfer**. 1ed. Berlim: Springer, 2010. 328p.
- BRASIL, I. N. **Processamento de Petróleo e Gás**. 1ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- FARAH, M.A. **Petróleo e seus derivados**. 1ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.261p.
- GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 1ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.345p.
- <http://steamofboiler.blogspot.com.br> acessado em 10/10/2012.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A.S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC,2008.643p.
- LIEBERMAN N. P.; LIEBERMAN E.T. **A Working Guide to Process Equipment**. 2ed. Londres: Mc-Graw Hill, 2008. 425p.
- KING, M. **Process Control: A Practical Approach**. 1ed. Londres: Wiley, 2011.
- MIORALLI, P. C. **Transferência de Calor em um Regenerador Rotativo com Perda de Carga Estabelecida nos Dutos da Matriz**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- PUJADÓ, P.R.; JONES D.S.J. **Handbook of Petroleum Processing**. 1ed.Berlim: Springer, 2006.
- VINAYAGAM, K. **Understand the secrets of fired heaters tuning. Hydrocarbon Processing**, 2007.