

METODOLOGIAS PARA ESTIMAR O IMPACTO DO DEPÓSITO DE FULIGEM EM FORNOS DE REFINARIAS

Carolina Rodrigues de Carvalho dos Santos

Daniel dos Santos Lustosa

Sylvio Lopes Junior

Elcio Pineschi

Jackeline Souza Aleixo Cintra

Luis Pedro Bonfim da Silva

Chemtech – A Siemens Company

1. RESUMO

A queima hidrocarbonetos líquidos, principalmente os mais pesados, nos queimadores de fornos tubulares (existentes em refinarias ou plantas petroquímicas) geram quase sempre um resíduo sólido (fuligem) constituído basicamente de carbono não queimado. Assim, os gases de combustão resultantes da queima de um hidrocarboneto líquido contêm fuligem em sua composição. Estes gases ao passarem através das serpentinas de tubos aletados da seção de convecção de um forno têm a fuligem aprisionada entre as aletas. A fuligem acumulada resulta numa resistência térmica que reduz a troca térmica entre os gases de combustão os tubos aletados da convecção.

Em geral os sistemas de limpeza dos equipamentos nem sempre sofrem uma manutenção adequada, prolongando o problema. Por outro lado, uma avaliação desse impacto no aumento da temperatura dos gases de exaustão e no aumento do consumo de combustível apresenta um cenário de perda energética e econômica bastante alta.

Atualmente existem poucas metodologias consolidadas para a avaliação quantitativa do impacto desse acúmulo de fuligem. Como os equipamentos variam muito entre si, o estabelecimento de relações proporcionais diretas é complexo.

Através desse trabalho é proposta uma comparação entre métodos de análise do impacto do acúmulo por simulação em software e por cálculo das eficiências dos fornos, comparando cenários em que o forno encontra-se limpo e com acúmulo de fuligem. Enquanto que a simulação oferece um cenário mais controlado em que é possível garantir as mesmas características do equipamento limpo e com acúmulo de fuligem, o balanço energético é vulnerável a alterações incontrolladas por modificações estruturais que possam ocorrer ao longo do tempo. Ainda assim, esse último método apresenta resultados aceitáveis em comparação com o primeiro, sendo mais simples de se aplicar.

Esses resultados podem sugerir metodologias de avaliação em uma refinaria para quantificar as perdas devido à elevação do consumo de combustível para garantir a especificação do produto e justificar investimentos em tecnologias para retirada da fuligem.

Palavras-chave: Fornos, Depósito de Fuligem, Eficiência Energética, Simulação, Balanço Energético, Consumo de Combustível.

2. INTRODUÇÃO

De forma resumida, os principais fatores que podem gerar ineficiência energética em um forno são:

- Processo de combustão inadequado como, por exemplo, atomização inadequada do óleo (desgaste da caneta de óleo, condições do vapor de atomização, viscosidade do óleo fora de projeto, liberação de calor fora da faixa operacional do queimador, etc.) e falta de controle do excesso de ar;
- Perdas térmicas como, por exemplo, as perdas em função das temperaturas dos gases para chaminé, perdas pela inadequação do revestimento refratário interno das partes do forno (materiais e espessuras inadequados, deterioração dos revestimentos) e perdas pela fuligem acumulada nos tubos (principalmente) das serpentinas da seção de convecção.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação de métodos que possam quantificar a influência da fuligem na eficiência de um forno. Para cumprir esse objetivo serão usados dados de um forno e a sua eficiência será calculada de três maneiras distintas.

Primeiramente será feito o cálculo da eficiência por métodos analíticos, o direto e o indireto. Posteriormente será feita uma simulação em software para esse mesmo forno chegando a valores de eficiência para o seu funcionamento considerando ele limpo e com acúmulo de fuligem. Esses valores serão comparados entre si para avaliação de sua validade.

Por se tratar de um sistema acessório dos fornos, os ramonadores por vezes não são operados e mantidos funcionando adequadamente. Esse trabalho visa mostrar o impacto que o acúmulo de fuligem pode representar na eficiência de um forno, através da regularização do consumo de combustível através da limpeza do equipamento.

3. DESENVOLVIMENTO

Os dados apresentado nas tabelas 3.1 e 3.2 foram obtidos de um forno tipo caixa, queimando óleo e gás combustível, sem sistema de preaquecimento de ar, considerando-se operação com mesmo excesso de ar e mesma carga térmica absorvida nas serpentinas de processo.

Tabela 3.1- Dados do período limpo

Gases de Combustão		Ar		Gás Combustível		Óleo Combustível			Fluido de Processo			
Temperatura (°C)	Vazão (ton/h)	Vazão (ton/h)	Temperatura (°C)	Vazão (ton/h)	PCI (kcal/kg)	Vazão (ton/h)	PCI (kcal/kg)	O2 (%)	Tent (°C)	Tsai (°C)	Vazão (m3/dia)	Carga Térmica atual (kcalh)
377,25	43,79	41,73	30,00	1,40	10707,54	0,51	9742,76	5,5	247,25	341,19	5.744,38	15.485.906,96

Tabela 3.2 – Dados do período sujo.

Gases de Combustão		Ar		Gás Combustível		Óleo Combustível			Fluido de Processo			
Temperatura (°C)	Vazão (ton/h)	Vazão (ton/h)	Temperatura (°C)	Vazão (ton/h)	PCI (kcal/kg)	Vazão (ton/h)	PCI (kcal/kg)	O2 (%)	Tent (°C)	Tsai (°C)	Vazão (m3/dia)	Carga Térmica atual (kcalh)
481,43	68,02	65,34	30,00	1,35	10605,40	1,03	9821,16	5,5	247,47	344,76	5.752,19	15.800.522,52

3.1 Cálculo analítico das eficiências

Nos itens 3.1.1 a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** serão apresentadas as formas de cálculo da eficiência do forno além de ser feito o seu balanço energético para comparação com os valores encontrados.

3.1.1 Eficiência do forno pelo método direto;

$$E_d = \frac{Q_c}{Q_{cb}}$$

Equação 3.1 – Cálculo da eficiência do forno pelo método direto.

Em que:

E_d : Eficiência calculada pelo método direto (%);

Q_c : Quantidade de calor absorvida pela carga (kcal/h), nesse caso apenas o processo;

Q_{cb} : Quantidade de calor liberada pelo combustível (kcal/h).

3.1.2 Eficiência do forno pelo método indireto;

$$E_i = 1 - \text{perdas} - \left(\frac{m_{gc} \cdot Hg(@Tg)}{PCI \cdot m_{cb}} \right)$$

Equação 3.2 – Cálculo da eficiência do forno pelo método indireto.

Em que:

E_i : Eficiência calculada pelo método indireto;

Perdas: Perdas para o ambiente (2,5% valor típico);

m_{gc} : massa dos gases de combustão;

m_{cb} : massa de combustível;

$Hg(@Tg)$: Entalpia (kcal/kg) dos gases de combustão como função da sua temperatura;

PCI: Poder calorífico inferior (kcal/kg).

Tem-se, ainda, a composição dos gases de combustão considerando uma composição hipotética de combustível.

Tabela 3.3 – Composição dos gases de combustão do período limpo.

Composto	Relação massa gases/massa gás combustível	Fração de Peso gás combustível	Relação massa gases/massa óleo combustível	Fração de Peso óleo combustível
----------	---	--------------------------------	--	---------------------------------

Composto	Relação massa gases/massa gás combustível	Fração de Peso gás combustível	Relação massa gases/massa óleo combustível	Fração de Peso óleo combustível
CO ₂	2,736	0,128	3,225	0,158
H ₂ O	1,940	0,091	1,520	0,074
SO ₂	0,000	0,000	0,020	0,001
N ₂	15,435	0,724	14,538	0,710
O ₂	1,207	0,057	1,162	0,057
SOMA	21,318	1,000	20,464	1,000
ENTALPIA média (kcal/kg)	96,33			
PCI Médio do combustível(kcal/kg)	10225,14			
Relação massa gases/massa combustível média	20,89			

Tabela 3.4 – Composição dos gases de combustão do período sujo.

Composto	Relação massa gases/massa gás combustível	Fração de Peso gás combustível	Relação massa gases/massa óleo combustível	Fração de Peso óleo combustível
CO ₂	2,736	0,127	3,225	0,158
H ₂ O	1,941	0,090	1,520	0,074
SO ₂	0,000	0,000	0,020	0,001
N ₂	15,549	0,724	14,538	0,710
O ₂	1,241	0,058	1,162	0,057

Composto	Relação massa gases/massa gás combustível	Fração de Peso gás combustível	Relação massa gases/massa óleo combustível	Fração de Peso óleo combustível
SOMA	21,468	1,000	20,464	1,000
ENTALPIA média (kcal/kg)	125,79			
PCI Médio do combustível(kcal/kg)	10231,28			
Relação massa gases/massa combustível média	20,97			

Com base nos dados da Tabela 3.1, Tabela 3.2, Tabela 3.3 e Tabela 3.4, é possível calcular a quantidade de calor absorvida pelos gases de combustão, e a liberada pelos combustíveis.

- Quantidade de calor absorvida pelos gases de combustão:

$$Q_{gc} = V_{gc} \cdot \Delta H \cdot 1000$$

Equação 3.3 – Quantidade de calor absorvida pelo ar.

Em que:

Q_{gc} : Quantidade de calor absorvida pelos gases de combustão (kcal/h);

V_{gc} : Vazão dos gases de combustão (ton/h);

ΔH : Entalpia dos gases de combustão (kcal/kg);

1000: Conversão de tonelada para kg.

- Quantidade de calor liberada pelos combustíveis:

$$Q_{cb} = (V_g \cdot PCI_g + V_o \cdot PCI_o) \cdot 1000$$

Equação 3.4 – Quantidade de calor liberada pelos combustíveis.

Em que:

Q_{cb} : Quantidade de calor liberada pelos combustíveis (kcal/h);

V_g : Vazão do gás combustível (ton/h);

PCI_g : PCI do gás combustível (kcal/kg);

V_o : Vazão do óleo combustível (ton/h);

PCI_o : PCI do óleo combustível (kcal/kg);

1000: Conversão de tonelada para kg.

Tabela 3.5 - Eficiências calculadas para o forno.

Períodos	Ed (%)	Ei (%)
Período limpo	77.82	77.82
Período sujo	69.65	71.68
Δ (limpo – sujo)	8.17	6.14

3.2 Simulação

As simulações foram feitas usando o Xfh da **HTRI Xchange Suite** v.5.

A simulação tem como *input* os dados estruturais e de projeto do forno, obtendo-se os resultados da Tabela 3.6 e da **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

- HTRI

Tabela 3.6 – Dados da simulação no HTRI.

Liberação (MM kcal/hr)	Absorvido Total (MM kcal/hr)	Fouling $m^2.hr.^{\circ}C/kcal$	Eficiência %	Consumo de Combustível kg/hr
19.48096	15.64321	0	80.3	1905.20
19.70178	15.64321	0.005	79.4	1926.80
20.74697	15.64321	0.025	75.4	2029.02
22.12619	15.64321	0.05	70.7	2163.90

Para todos os casos, foram mantidas as mesmas condições de combustão, tais como excesso de ar e proporção entre gás e óleo. Para a avaliação e comparação entre os métodos direto e indireto, foram

interpolados os dados da tabela 3.5 nos dados da tabela 3.6. O resultado obtido foi o apresentado na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Valores de consumo de combustível para os métodos direto e indireto.

Método	Consumo de Combustível kg/hr
Direto	217.3805528
Indireto	162.7049657

3.3 Economia esperada

A redução de combustível obtida em cada método é apresentada na Tabela 3.8

Tabela 3.8 – Valores de consumo de combustível para os métodos direto e indireto.

	Redução (kg/hr)		Diferença
	Medido	Software	%
Direto	272.46	217.38	20%
Indireto	209.63	162.70	22%

Pode-se estimar então um fator a ser aplicado nas simulações realizadas de modo a aproximar o resultado do software com o esperado em operação. Pretende-se então, com estes valores, aproximar os cálculos de consumo de combustível baseado em software com o que realmente acontece em operação.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pelos diferentes métodos utilizados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos com os diferentes métodos avaliados

Condição do Forno	Cálculo da Eficiência Direta (%)	Cálculo da Eficiência Indireta (%)	Simulação HTRI (%)
Forno Limpo	77.8	77.8	80.3
Forno Sujo	69.6	71.6	70.7
Ganho	8.2	6.2	9.6

Deve-se levar em consideração que os dados de operação estão sujeitos a erros de medição e, por isso, é notável alguma diferença entre os três métodos. Nesse caso a simulação proporciona um ambiente mais controlado porque é possível variar apenas a fuligem acumulada, garantindo que o forno analisado não sofreu qualquer modificação.

A simulação pode auxiliar estudos posteriores e tomadas de decisão. Entretanto, as condições reais e influências operacionais não são levadas em conta nas rotinas de cálculo implementadas nos principais softwares comerciais.

Desta forma o fator apresentado neste trabalho pretende aproximar estas correlações, teóricas, dos dados reais e assim proporcionar um ambiente mais confiável para as tomadas de decisões.

O trabalho comparou os dois métodos apresentados, o direto e o indireto, e estes apresentaram resultados próximos para o valor a ser corrigido. À partir destes resultados, emprega-se uma correção de 1.2 (20%) ao valor calculado pelo software para inserir nos resultados as influências operacionais inerentes ao processo e ao equipamento.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Lopes, S. Fornos Industriais. Universidade Corporativa Chemtech. Rio de Janeiro - RJ, 2009.
2. API Standard 560, Fired Heaters for General Refinery Services. American Petroleum Institute. Third Edition, May 2001.
3. Nogueira, L. A. H. et. al. Eficiência Energética no uso de vapor. Eletrobrás. Rio de Janeiro - RJ, 2005.
4. Onofre, R. M. Controle de Eficiência da Combustão. Site: www.help-temperatura.com.br/html/interesse/files/combust.pdf [pesquisado em abril/2009].
5. Grusnky, A. Sootblowing Application and Maintenance Guide. Final Report, California – USA, 2001;
6. Brasil, N. I. Introdução à Engenharia Química. Editora Interciência, 2ª Ed., Rio de Janeiro – RJ, 2004.