UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA QUÍMICA
DE BIOCOMBUSTÍVEIS E PETROQUÍMICA
TPQB – EQ/UFRJ

Admar Jorge Machado Bueno

ESTUDO DAS PERDAS ENERGÉTICAS NA SUPERFÍCIE DA RADIAÇÃO NOS FORNOS DE PIRÓLISE

RIO DE JANEIRO

2016

ADMAR JORGE MACHADO BUENO

ESTUDO DAS PERDAS ENERGÉTICAS NA SUPERFÍCIE DA RADIAÇÃO NOS FORNOS DE PIRÓLISE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Luiz Fernando Leite, D.Sc.

RIO DE JANEIRO

2016

CIP - Catalogação na Publicação

MB928e

MACHADO BUENO, ADMAR JORGE
Estudo das Perdas Energéticas na Superfície da Radiação nos Fornos de Pirólise / ADMAR JORGE MACHADO BUENO. -- Rio de Janeiro, 2016.
99 f.

Orientador: LUIZ FERNANDO LEITE.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2016.

1. Forno de Pirólise. 2. Petroquímica. 3. Radiação. 4. Energia. 5. Refratários. I. LEITE, LUIZ FERNANDO, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ESTUDO DAS PERDAS ENERGÉTICAS NA SUPERFÍCIE DA RADIAÇÃO NOS FORNOS DE PIRÓLISE

Admar Jorge Machado Bueno

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

_____

Prof. Luiz Fernando Leite, D. Sc. (EQ/UFRJ) – Orientador

_____

Profa. Heloisa Lajas Sanches, D. Sc. (DEQ/EQ)

_____

Prof. André Luiz Hemerly Costa, D. Sc. (UERJ)

_____

Rodrigo Pio Borges Menezes, D. Sc. (Petrobras)

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2016

Em memória ao meu avô Admar Jorge de Figueiredo Machado pela grande contribuição à Engenharia de Petróleo no país e pelo apoio em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Carol, por estar sempre ao meu lado e pela compreensão em alguns momentos que precisei ficar ausente. À minha família, em especial a minha avó Ada pelo carinho e por me incentivar sempre a evoluir na minha formação acadêmica.

À Braskem por acreditar no meu trabalho e viabilizar a realização deste Mestrado.

Ao professor Leite que apesar da distância foi um orientador extremamente presente com uma colaboração valiosa para este trabalho.

À Giorgio Franceschetti pelos ensinamentos valiosos sobre fornos de pirólise e contribuição para este trabalho.

À Victor Bouzas e Raimundo Sampaio pela grande parceria e contribuição para este trabalho.

Agradeço a Deus, que me permitiu a inteligência.

A todos aqueles que acompanharam direta ou indiretamente este trabalho, o meu agradecimento.

“Não herdamos a Terra de nossos pais,

mas a pegamos de empréstimo de nossos filhos”.

(Henry Brown)

BUENO, Admar Jorge Machado. **Estudo das Perdas Energéticas na Superfície da Radiação nos Fornos de Pirólise.** Orientador: Luiz Fernando Leite. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Biocombustíveis e Petroquímica) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

RESUMO

O processo de produção de eteno e propeno mais importante é o *steam cracking* (SC). Neste processo ocorre a pirólise de hidrocarbonetos saturados produzindo olefinas. Os principais custos variáveis envolvidos na indústria petroquímica são a matéria prima e o custo dos energéticos (combustíveis e energia elétrica).

Geralmente 70% a 80% do consumo energético de um *cracker* ocorrem nos fornos de pirólise. Dado este cenário, o presente trabalho tem o objetivo de identificar oportunidades de redução do consumo energético dos fornos de pirólise, com foco em avaliar as perdas de energia pelas superfícies da zona de radiação.

Foi estruturado então um planejamento para a coleta das informações em campo de dois fornos de pirólise da unidade de *steam cracking* localizada no Polo Industrial de Camaçari, na Bahia. De posse dos dados em campo, foram quantificadas as perdas de energia pelas paredes da radiação dos fornos de pirólise e identificados os ganhos energéticos potenciais. O trabalho contemplou uma análise técnica e econômica mostrando o ponto ótimo de substituição dos refratários nos fornos. Considerando um *cracker* com vinte e dois fornos, o impacto econômico de uma maior ineficiência nas paredes dos fornos pode ser maior que 4,9 milhões de reais por ano.

Foram calculadas as reduções das emissões de CO_2 caso a substituição dos refratários seja realizada dentro das melhores práticas, que este trabalho contribui a estabelecer, visando-se reduzir o consumo energético do forno e consequentemente a redução das emissões de gases de efeito estufa que para uma unidade de *steam cracking* com vinte e dois fornos pode ser de até 10.423 t/ano de CO_2.

Palavras-chave: radiação, forno de pirólise, economia de energia, indústria petroquímica, *steam cracking*.

BUENO, Admar Jorge Machado. **Energy Losses Study in Radiation Box Surface in Pyrolysis Furnaces**. Supervisor: Luiz Fernando Leite. Rio de Janeiro, 2016. Masters Dissertation (Professional Master in Biofuels and Petrochemical Engineering) – Chemical School, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ABSTRACT

The most important process to produce ethylene and propylene is the steam cracking (SC), in which saturated hydrocarbons are cracked producing light olefins. The main variable costs of the petrochemical industry are feedstock and energy (fuel and electricity) costs.

Usually 70% to 80% of the energy consumption in a cracker occurs in the pyrolysis furnaces. In view of this scenario, this study aims to identify opportunities to reduce energy consumption of pyrolysis furnaces, focusing on energy losses by the radiation box surfaces.

A field data collecting plan was carried out for two pyrolysis furnaces of a steam cracker facility located in Camaçari Industrial Complex, Bahia. After the data collection the energy losses by the radiation box walls and the potential energy saving were calculated. The work included a technical and economic analysis showing the optimum time interval for refractory replacement in the furnace. Considering a cracker with twenty-two furnaces, the economic impact of higher inefficiency by radiation box walls may be greater than 1.3 million dollar per year.

The CO_2 emission reduction was calculated, considering the best practices for the refractory replacement, for which this work aim to contribute, looking for reducing the furnace energy consumption and consequently its greenhouse gas emissions, for a steam cracking unit with twenty-two furnaces can be 10.423 t/year of CO_2.

Keywords: radiation, pyrolysis furnaces, energy saving, petrochemical industry, steam cracking.

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO **16**

1.1 Objetivos 18

1.2 Estrutura da dissertação 18

CAPÍTULO 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO **19**

2.1 Processo de *Steam Cracking* 19

2.2 Forno de Pirólise 21

2.3 Mecanismos de transferência de calor 34

2.4 Refratários 41

2.5 Materiais Isolantes 44

2.6 Consumo de Energia e Meio Ambiente 47

CAPITULO 3 – METODOLOGIA **50**

3.1 Levantamento dos dados de Campo 50

3.2 Cálculos Térmicos 59

CAPITULO 4 – RESULTADOS **61**

4.1 Análise Energética 61

4.2 Análise Econômica 70

4.3 Análise Ambiental 74

CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **78**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **80**

ANEXOS **86**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cadeia produtiva petroquímica 20

Figura 2.2 Fluxograma Simplificado de um *Steam Cracking* 21

Figura 2.3 Distribuições das cargas que alimentam os fornos de pirólise no mundo.22

Figura 2.4 Características do coque catalítico 29

Figura 2.5 Características do coque pirolítico e de condensação 30

Figura 2.6 Curva de TMT durante a operação de um forno de pirólise 31

Figura 2.7 Arranjo geral simplificado de um Forno de Pirólise 34

Figura 2.8 Tipos de transferência de calor Condução, Convecção e Radiação..... 34

Figura 2.9 Transferência de calor unidimensional por condução..... 36

Figura 2.10 Transferência de calor por convecção. 36

Figura 2.11 Transferência de calor por radiação 40

Figura 2.12 Emissividade de refratários a diferentes temperaturas 46

Figura 2.13 Temperatura global desde 1855-1999 com projeção até 2.100..... 48

Figura 2.14 Opções para redução de 25 bilhões de toneladas de CO2 nos próximos 50 anos 49

Figura 3.1 Dimensões do forno em milímetros. 50

Figura 3.2 Representação dos pontos de medição das temperaturas das paredes do forno 51

Figura 3.3 Câmera de termovisão ou termográfica..... 53

Figura 3.4 Medições de áreas pela termovisão em algumas regiões do forno. 54

Figura 3.5 Fotos da parede do forno em zonas com elevadas temperaturas..... 54

Figura 3.6 Ilustração de um anemômetro digital. 56

Figura 3.7 Medidas de temperatura nas paredes da radiação do Forno 1..... 57

Figura 3.8 Medidas de temperatura nas paredes da radiação do Forno 2..... 58

Figura 4.1 Histograma das temperaturas de parede do Forno 1. 65

Figura 4.2 Teste de hipótese das medidas de temperatura do Forno 1..... 66

Figura 4.3 Histograma das temperaturas de parede do Forno 2. 67

Figura 4.4 Teste de hipótese das medidas de temperatura do Forno 2. 67

Figura 4.5 Mapa térmico do forno 1. 68

Figura 4.6 Mapa térmico do forno 2. 69

Figura 4.7 Temperatura ótima para substituição do refratário. 72

Figura 4.8 Temperatura ótima para substituição do refratário. 73

Figura 4.9 Composição do Gás Combustível que alimentam os fornos de pirólise. . 75

Figura 4.10 Resultados das emissões adicionais para o forno 1. 76

Figura 4.11 Resultados das emissões adicionais para o forno 2. 76

Figura 4.12 Resultados das emissões adicionais para a média dos fornos 1 e 2. 77

INIDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Impacto da qualidade da carga 24

Tabela 2.2 Principais contaminantes de carga 25

Tabela 2.3 Efeito da temperatura no rendimento dos produtos 28

Tabela 2.4 Valores típicos de coeficientes de troca térmica por convecção..... 37

Tabela 2.5 Classificação dos refratários baseado na composição química do material..41

Tabela 2.6 Propriedades dos tijolos 42

Tabela 2.7 Propriedades dos materiais isolantes..... 45

Tabela 3.1 Especificação da medição de velocidade do vento 55

Tabela 3.2 Especificação da medição de temperatura 55

Tabela 4.1 Perda de calor pela radiação do forno com temperatura de parede de referência de 60°C 62

Tabela 4.2 Perda de calor pela radiação do forno1. 63

Tabela 4.3 Perda de calor pela radiação do forno 2. 64

Tabela 4.4 Tabela Tarifária Gás Natural para uso industrial 71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química

ASME – *American Society of Mechanical Engineers* (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)

CIT – *Coil Inlet Temperature* (temperatura de entrada da serpentina)

COP – *Coil Outlet Pressure* (pressão de saída da serpentina)

COT – *Coil Outlet Temperature* (temperatura de saída da serpentina)

DIN – *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Normatização)

DS – *Dilution Steam* (vapor de diluição)

EVTE – Estudo de viabilidade técnico e econômica

FCC – *Fluid Catalytic Cracking* (Craqueamento Catalítico Fluido)

GAP – Gasolina de Pirólise

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GN – Gás Natural

GNL – Gás Natural Liquefeito

GOP – Gasóleo de Pirólise

HLR – Hidrocarbonetos leves de refinaria

HSS – *Hot Steam Standby* (passagem de vapor quente com o forno fora de operação)

HVC – *High Value Chemicals*

IR – Raios infravermelhos

MAPD – Metil Acetileno Propadieno

MTO – *Methanol-to-Olefins* (Metanol-a-Olefinas)

PCI – Poder calorífico inferior de um combustível

PCS – Poder calorífico superior de um combustível

PIONA – Parafinas, isoparafinas, olefinas, naftênicos e aromáticos

RAP – Resíduo Aromático de Pirólise

SC – *Steam cracking* (craqueamento a vapor)

TLE ou TLX – *Transfer Line Exchange* (trocador de calor da linha de transferência)

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

Olefinas leves são hidrocarbonetos insaturados de pequena cadeia carbônica que encontram grande aplicação na indústria química, pois a dupla ligação presente na molécula torna-a quimicamente reativa, possibilitando sua polimerização e outras reações que produzem uma grande variedade de produtos químicos. Eteno (ou etileno), propeno (ou propileno) são as olefinas de maior aplicação comercial, pois são geradores de duas importantes cadeias petroquímicas, sendo os precursores de resinas plásticas, fibras, elastômeros, solventes, tintas, adesivos e diversos outros produtos amplamente utilizados na sociedade moderna (LEITE, 2013).

O processo de produção de eteno e propeno mais importante é o *steam cracking* (SC). Neste processo ocorre a pirólise de hidrocarbonetos saturados produzindo olefinas. As principais matérias primas deste processo são a nafta, etano, HLR (hidrocarbonetos leves de refinaria), GLP, condensados, gasóleos e frações pesadas oriundas do refino do petróleo.

Segundo a empresa IHS Chemical, mudanças importantes vêm acontecendo no mercado do etileno. Entre elas se destacam o custo da matéria prima nitidamente divergente entre algumas regiões geográficas. Neste cenário a China continuará desempenhando um papel fundamental na demanda e oferta de eteno e seus derivados no mundo. Novos projetos de etileno a partir do carvão serão implantados na China e vão contribuir fortemente no aumento de capacidade mundial de eteno. Já nos EUA uma nova fonte abundante e de baixo custo de matéria prima, o *shale gas* ou gás de folhelho[1], em português, voltou a fortalecer a petroquímica americana. Em contrapartida, os produtores da Europa e países asiáticos desenvolvidos, como o Japão e Coreia, estão expostos a crescente concorrência internacional e apresentam fraco crescimento de seus mercados internos (IHS, 2014).

Em 2013, a demanda mundial de eteno foi 133 milhões de toneladas e está previsto um crescimento anual médio de 4,4 % até 2018 (LEWANDOWSKI, 2014). Já no mercado brasileiro a produção de eteno foi de aproximadamente 3,37 milhões de toneladas, e para o propeno (grau polímero e químico) foi 1,51 milhões de toneladas (BRASKEM, 2013). No Brasil, as unidades produtoras de eteno pertencem à Braskem. São quatro *crackers* localizados

[1] Em português, o termo *shale gas* tem sido frequentemente traduzido na mídia como gás de xisto, mas a tradução mais correta é gás de folhelho uma vez que o tipo de rocha aonde ele se encontra é denominado folhelho (rocha sedimentar) e não xisto (rocha metamórfica) – LAGE *et al*, 2013.

nos polos petroquímicos no país que são: a unidade de Camaçari, BA; Mauá em SP; Triunfo no RS e Duque de Caxias no Rio de Janeiro.

Além da matéria prima, outro custo variável importante para uma petroquímica competitiva é o custo energético. As reações que ocorrem no *steam cracking* são extremamente endotérmicas, ou seja, demandam um elevado consumo de energéticos. No Brasil esta é uma variável extremamente não competitiva, pois os custos dos combustíveis no país especialmente do Gás Natural (GN) e Óleo Combustível estão entre os mais caros do mundo (BRASKEM, 2015).

Os fornos de pirólise são um dos principais equipamentos em um *cracker*, pois é nele que ocorrem as reações para obtenção das olefinas. Para alcançar bons rendimentos em eteno são necessárias elevadas temperaturas, ou seja, um elevado consumo de gás combustível. Geralmente 70% a 80% do consumo energético de um SC ocorrem nos fornos de pirólise.

O elevado consumo de combustíveis nos fornos de pirólise aliado ao elevado custo de energia no Brasil torna fundamental identificar oportunidades de redução do consumo energético dos fornos. As principais perdas energéticas em um forno de pirólise ocorrem na zona de radiação e de convecção. A principal perda na zona de radiação ocorre pelas paredes e janelas de visita. Já na convecção a principal perda é devido à infiltração de ar e sujeira nos bancos de convecção da carga, vapor de diluição e água de alimentação de caldeira.

Existem diversas formas de calcular as perdas de energia pelas paredes da radiação, desde cálculos simplificados a cálculos rigorosos coletando informações em campo. Duas normas que tratam deste tema são a ASME PTC e a DIN.

Além do impacto no custo variável do *cracker*, a recomposição do refratário em fornos de pirólise é uma atividade de elevado custo de manutenção. Se realizadas avaliações periódicas da condição do mesmo, pode-se reduzir consideravelmente o nível de recomposição deste material.

Existe um ganho ambiental relacionado a este tema também, pois ao se reduzir o consumo energético do forno ocorre a redução das emissões de gases de efeito estufa pela chaminé do equipamento.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar as perdas de energia pelas paredes da radiação dos fornos de pirólise no *cracker* do polo petroquímico de Camaçari (BA). A partir desta análise, realiza-se uma análise econômica para identificar a viabilidade de recomposição do refratário e reduzir o consumo de energia e emissões de CO_2 dos fornos de pirólise.

1.2 Estrutura da dissertação

O texto está organizado em capítulos. O Capítulo 1 introduz o tema, destacando o cenário nacional e internacional além de apresentar os objetivos do estudo. No Capítulo 2, uma revisão bibliográfica é apresentada, contextualizando o tema através de uma descrição sobre o processo do *steam cracking*, fornos de pirólise, tipos de transferência de calor e uma descrição sobre refratários. A metodologia utilizada para quantificar as perdas de calor pela radiação dos fornos desde a coleta de dados em campo até a metodologia dos cálculos térmicos é mostrada no Capítulo 3. O Capítulo 4 mostra os resultados do trabalho e o Capítulo 5, as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros são apresentadas. A lista de referências bibliográficas consultadas também pode ser visualizada no final deste trabalho.

CAPÍTULO 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO

Este capítulo contempla um levantamento da literatura contextualizando o processo de *steam cracking*, a importância de um forno de pirólise em um *cracker*, os principais mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) e informações sobre refratários dos fornos.

2.1 Processo de *Steam Cracking*

O principal processo produtivo da cadeia petroquímica (Figura 2.1) para produção de produtos da 1ª Geração é o *Steam Cracking* (SC), em que os principais produtos são eteno, propeno, hidrogênio, butadieno e correntes C_5^+. Este processo é complexo e apresenta uma grande variedade de operações unitárias, pois inicialmente ocorre o craqueamento a vapor da matéria prima. Após esta etapa as correntes devem ser separadas incialmente a temperaturas acima de 0°C e após uma etapa de compressão e purificação dos gases ácidos, são necessárias temperaturas criogênicas para separar os compostos mais leves como hidrogênio, metano, eteno, etano, propeno, propano.

As principais áreas de um *Steam Cracking* são:

- **Área Quente**: Onde se destacam os fornos de pirólise, TLEs (*transfer line exchangers*), trocadores com óleo de *quench*, fracionadora de óleo e torre de água de *quench*.
- **Área de Compressão:** Nesta área o gás craqueado é comprimido pelo compressor de gás de carga além da remoção de gases ácidos em estágios intermediários do compressor com colunas de soda ou aminas e os secadores de gás de carga.
- **Área Fria:** Este sistema é composto pela caixa fria (*cold box*), trem de separação e colunas de fracionamento, reatores de hidrogenação seletiva e a hidroestabilização da gasolina.
- **Sistema de Refrigeração:** Esta área tem como objetivo gerar correntes frias para possibilitar as separações nas colunas de fracionamento. Geralmente estes sistemas são compostos por um ciclo a propeno e outro a eteno e podem ser abertos ou fechados.

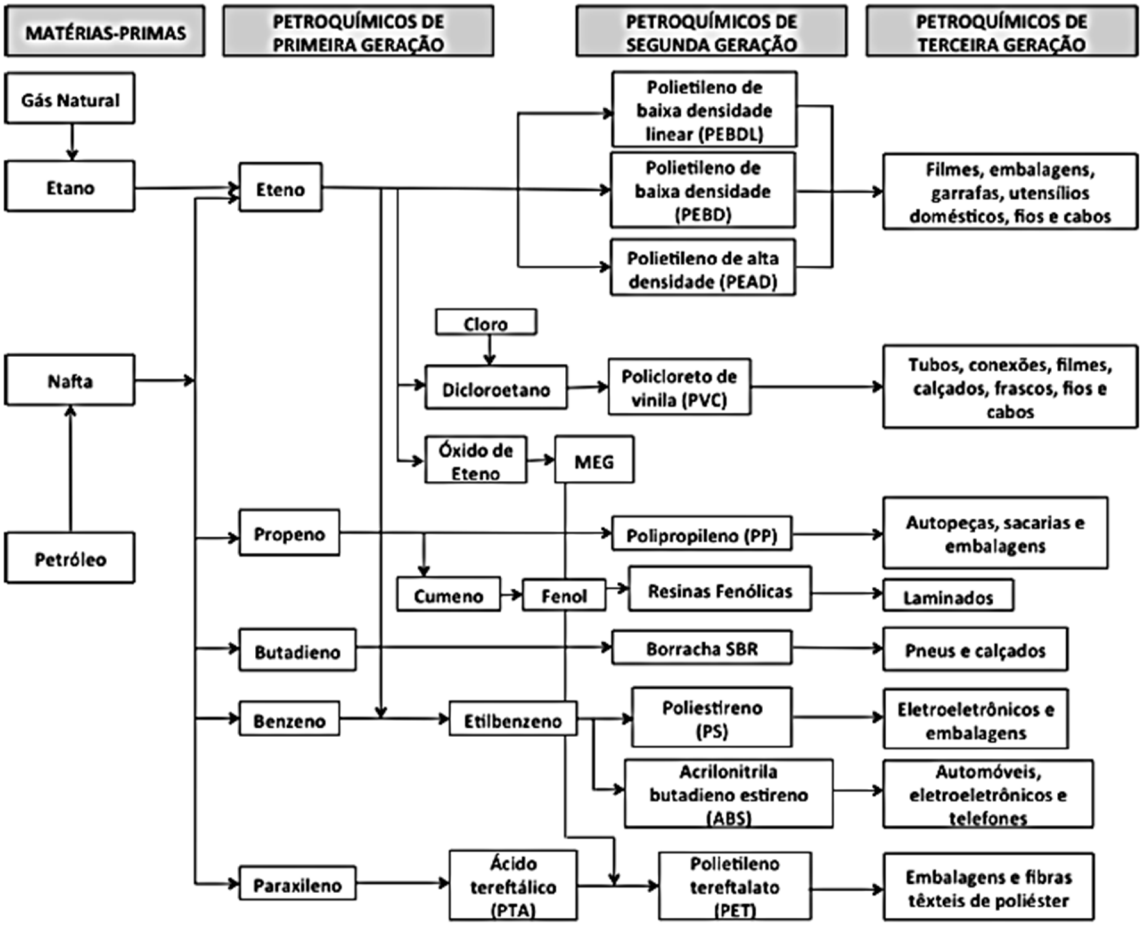


Figura 2.1 Cadeia produtiva petroquímica (ABIQUIM, 2013).

Uma unidade de pirólise é extremamente custosa, requerendo um alto investimento, além de ser intensiva no consumo de energia, devido às seguintes características: à alta severidade nos fornos de pirólise, necessária para a quebra das ligações C-C; alta pressão para a purificação dos produtos, resultando em elevada taxa de compressão para o compressor de gás de carga; alta demanda de utilidades frias e o fracionamento de produtos com volatilidades relativas próximas de um. Os principais licenciadores dessa tecnologia são a KBR (Kellogg Brown & Root), Linde AG, Lummus Technology e Technip que recentemente adquiriu a Stone Webster (Adaptado LEITE, 2013).

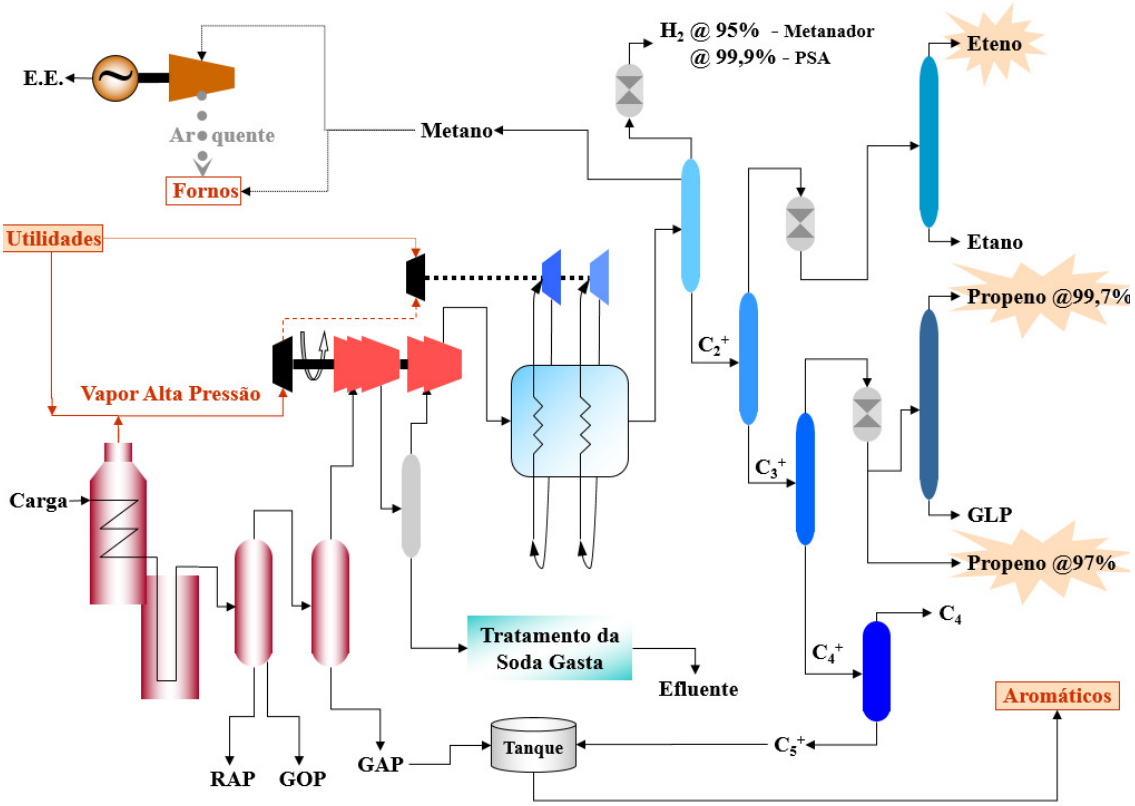


Figura 2.2 Fluxograma Simplificado de um *Steam Cracking* (BRASKEM).

Além do *Steam Cracking* existem outros processos de obtenção de eteno como a desidratação de etanol, eteno a partir do gás de FCC, eteno derivado de carvão e Metanol-a-Olefinas (MTO), entretanto são ainda processos pouco utilizados comparados ao SC.

2.2 Forno de Pirólise

Os fornos de pirólise estão entre os principais equipamentos em um *steam cracking*, pois neles a matéria prima (Figura 2.2) é convertida em outras espécies químicas, muitas das quais insaturadas. O processo de craqueamento envolve a quebra de ligações carbono-carbono e carbono-hidrogênio dos hidrocarbonetos, gerando os principais produtos da primeira geração, como o etileno e o propileno. As reações para maximizar a produção de eteno ocorrem a temperaturas entre 820°C e 880°C, tempos de residência na radiação de 100 a 600 milissegundos, pressões baixas e utilizando vapor de diluição para reduzir a pressão parcial dos hidrocarbonetos e a formação de coque.

2.2.1 Características da Carga

As principais matérias primas processadas em um forno de pirólise são:

- Nafta;
- Etano;
- Propano;
- Butano;
- Gases residuais das refinarias (HLR);
- Gasóleo atmosférico;
- Gasóleo de vácuo.

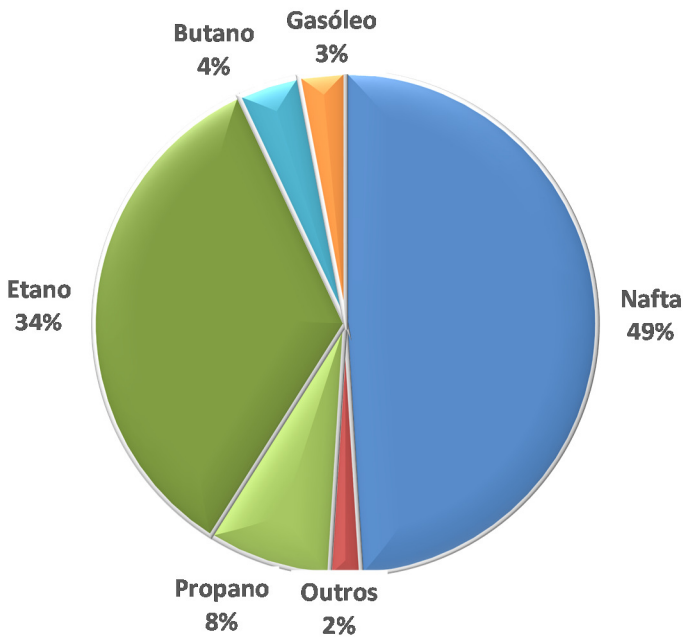


Figura 2.3 Distribuições das cargas que alimentam os fornos de pirólise no mundo. (Adaptado de ERAMO, 2012 apud LEITE, 2013).

O tipo de matéria prima a ser processada impacta diretamente no projeto e consequentemente nas dimensões do forno. As temperaturas, os tempos de residência e a razão entre carga e vapor de diluição para processamento dessas cargas varia devido às diferentes taxas de craqueamento dos vários hidrocarbonetos. Não se trata somente de quão longa é a

cadeia hidrocarbônica, mas também da sua estrutura. Por este motivo torna-se fundamental uma boa caracterização da carga. Em relação às características da matéria prima são importantes analisar: faixa de destilação, densidade, conteúdo de parafinas, isoparafinas, olefinas, naftênicos e aromáticos (análise PIONA) para cada número de carbono (Adaptado LEITE, 2013). Geralmente esta caracterização é realizada por cromatografia gasosa ou por infravermelho (ZIMMERMANN & WALTZ, 2008).

A qualidade da carga identifica o potencial em gerar produtos de alto valor agregado também conhecidos pela sigla em inglês HVC (*High Value Chemicals*). Geralmente são considerados HVC: Eteno, propeno, hidrogênio, 1,3 butadieno e o benzeno contido na gasolina de pirólise. Foi desenvolvido, então, um fator de qualidade para as naftas, a razão entre o percentual de isoparafinas e n-parafinas (I/P). Quanto menor esta razão, a nafta tenderá a produzir mais eteno e hidrogênio. Quanto maior a razão de I/P a nafta terá um maior potencial para gerar propeno e metano (LUMMUS, 2010).

Caso a carga do SC seja um gasóleo, é utilizado como parâmetro de qualidade o próprio número de cetano, que normalmente é usado como parâmetro de desempenho do diesel. Compostos aromáticos em cargas processadas no forno de pirólise praticamente não produzem eteno e propeno. À medida que a carga passa de etano para frações mais pesadas, com menor relação H/C, a produção de eteno diminui. A Tabela 2.1 mostra o rendimento do SC para diferentes cargas. Estes dados foram gerados tomando-se por base que o etano, propano e a corrente C4 são reciclados à extinção. É importante ressaltar que os resultados mostrados nesta tabela dependem de outros parâmetros além da qualidade da carga como: severidade, tipo de forno e condições operacionais, mas a qualidade da carga é determinante (LEITE, 2013).

Tabela 2.1 Impacto da qualidade da carga. (Adaptado LAUGIER 2009 apud LEITE, 2013).

Produtos (% p/p)	Carga					
	Etano	Propano	Butano	Nafta	Gasóleo	Gasóleo de Vácuo
Gás Combustível	13,8	32,9	28,6	18,0	12,0	10,0
Eteno	**84,0**	**46,0**	**46,2**	**35,0**	**28,5**	**26,0**
Propeno	1,2	14,5	18,0	18,0	17,0	16,5
Gasolina de Pirólise	0,8	5,8	20,0	20,0	26,5	25,0
Óleo Combustível	0,2	0,8	9,0	9,0	16,0	22,5
Total	100,0	100,0	121,8	100,0	100,0	100,0

Além da qualidade da matéria prima, é importante analisar os contaminantes presentes na carga dos fornos, pois impactam no desempenho do forno de pirólise ou em outras áreas de um *steam cracker*. Por exemplo, o cálcio, para valores acima de 1 ppm pode ocasionar sujeira nos bancos de convecção do forno além de corrosão. Outro contaminante que deve ser acompanhado de perto é o mercúrio, pois para valores acima de 5 ppb ocasiona corrosão dos equipamentos de alumínio, além de ser veneno de catalisadores da área fria e apresentar um problema de segurança pessoal por ser um metal pesado. A lista completa dos contaminantes, valores de especificação e impactos pode ser visualizada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Principais contaminantes de carga. (Adaptado LUMMUS, 2010).

Contaminante	Carga	Limite (em massa)	Impacto
Arsênio	C2, C3, GNL, Nafta	10 ppm	Veneno de catalisadores
Cálcio	GNL, Nafta e Gasóleo	< 1 ppm	Pode causar sujeira na convecção do forno e problemas de corrosão
Cinzas	GNL, Nafta e Gasóleo	ND	Pode causar sujeira na convecção do forno e problemas de corrosão
Cloreto	GNL, Nafta e Gasóleo	< 5 ppm	Potencializa corossão por *stress* durante *shutdowns*
COS e CS_2	C2 e FCC	2 ppm	Veneno de MAPD
Ferro	Nafta, GNL e Gasóleo	ND	Sujeira e aumenta formação de coque na serpentina
Fluoreto	C2,C3 e C4	2 ppm	Potencial para corrosão das serpentinas e veneno de catalisadores de C4
Chumbo	Gasóleo	30 ppb	Veneno de catalisadores e contaminação de produtos
Mercúrio	C2, C3, GNL	5 ppb	Corrosão em trocadores de alumínio e veneno de catalisador
MTBE	Nafta	50 ppm	Se decompõe em em metanol que é contaminante do propeno
Metanol	Nafta	50 ppm	Contaminante de propeno
Oxigênio	FCC e gás flare	< 10 ppm	Formação de sujeira, NOx e impacta na especificação do C4
Potássio	GNL e Gasóleo	< 1 ppm	Risco de corrosão das serpentinas dos fornos
Sódio	GNL, Nafta e Gasóleo	125 ppb	Danos nas serpentinas do forno e redução das campanhas do mesmo
Vanádio	GNL, Nafta e Gasóleo	< 1 ppm	Risco de corrosão das serpentinas dos fornos
Água	Todas cargas líquidas	isento água livre	Vaporização na convecção dos fornos

2.2.2 Variáveis de Processo

Além da qualidade da carga, as variáveis de processo impactam na maximização da produção de olefinas. As principais variáveis de processo são: **CIT** (*coil inlet temperature*), **COT** (*coil outlet temperature*), relação vapor de diluição/hidrocarboneto (**DS/HC**) e **COP** (*coil outlet pressure*).

As reações de craqueamento de hidrocarbonetos são altamente endotérmicas e temperaturas elevadas favorecem a formação de olefinas desejadas, de olefinas de alto peso molecular e aromáticos. Para cada tipo de matéria prima existe uma temperatura ideal para maximizar a produção de eteno e minimizar a formação de moléculas aromáticas polinucleadas que formam coque na serpentina do forno (LUMMUS, 2010). Por exemplo, o craqueamento do etano oriundo do gás natural, dá-se via radical livre, sendo obtidos eteno e hidrogênio, segundo a seguinte reação:

$$CH_3CH_3 \rightarrow CH_2CH_2 + H_2 \qquad \Delta H_{590°C} = +\ 143\ kJ \qquad (2.1)$$

Apesar da equação de reação química de formação do eteno (equação 2.1) ser simples, outras reações ocorrem formando além do eteno, hidrogênio, metano, acetileno, propeno, MAPD, butanos, butenos, benzeno, tolueno e componentes mais pesados.

Em 1930, foi descrito o mecanismo de radicais livres para decomposição dos hidrocarbonetos nas condições da pirólise, o que foi extremamente útil, embora este não explique completamente toda a distribuição de produtos, até mesmo para decomposição de um composto simples como o etano (LEITE, 2013). Os mecanismos de radicais livres do etano serão mostrados a seguir. Inicialmente o etano se decompõe em dois radicais metila (equação 2.2), na etapa de iniciação. Este radical metila reage com o etano molecular produzindo um radical de etila e metano (equação 2.3). Este radical de etila se decompõe em eteno e um radical de hidrogênio (equação 2.4). O átomo de hidrogênio reage com uma molécula de etano produzindo o hidrogênio molecular e um novo radical etila (equação 2.5). As equações 2.3 a 2.5 representam a etapa de propagação. As reações de terminação ocorrem quando radicais livres reagem formando compostos moleculares estáveis nas condições do forno. Na equação 2.11 é representado uma rota para formação de coque a partir do benzeno que também é produzido no craqueamento a vapor.

Iniciação

$$C_2H_6 \rightarrow CH_3\cdot + CH_3\cdot \quad (2.2)$$

Propagação

$$CH_3\cdot + C_2H_6 \rightarrow CH_4 + C_2H_5\cdot \quad (2.3)$$

$$C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_4 + H\cdot \quad (2.4)$$

$$H\cdot + C_2H_6 \rightarrow H_2 + C_2H_5\cdot \quad (2.5)$$

Terminação

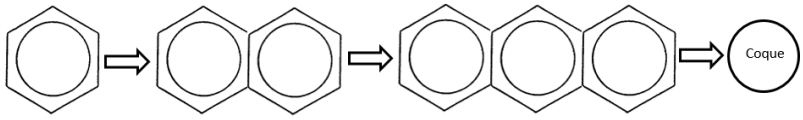
$$H\cdot + H\cdot \rightarrow H_2 \quad (2.6)$$

$$CH_3\cdot + H\cdot \rightarrow CH_4 \quad (2.7)$$

$$H\cdot + C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_6 \quad (2.8)$$

$$CH_3\cdot + C_2H_5\cdot \rightarrow C_3H_8 \quad (2.9)$$

$$C_2H_5\cdot + C_2H_5\cdot \rightarrow C_4H_{10} \quad (2.10)$$



(2.11)

As reações de craqueamento a vapor são altamente endotérmicas e volumétricas, portanto, favorecidas por altas temperaturas e baixas pressões. O COT é uma variável chave neste processo, pois determina a cinética e, portanto, o perfil de produtos no forno. Na Tabela 2.3 é apresentada a influência da temperatura de craqueamento para a nafta em uma serpentina de mesma tecnologia e mantendo as outras variáveis e qualidade de carga constantes. Na maioria das plantas de SC existe um controle do COT onde a variável manipulada é a vazão de gás combustível do forno.

Pode-se concluir que o aumento do COT em relação ao craqueamento da nafta gera um aumento do rendimento de hidrogênio, metano, etileno e benzeno. O impacto no rendimento de butadieno é desprezível. O aumento do COT diminui o rendimento de propeno e gasolina de pirólise. Além do COT é importante acompanhar o CIT em um forno de pirólise, pois se este valor for maior que 650ºC a reação de pirólise irá iniciar na zona da convecção e é extremamente indesejado a formação de depósitos nesta secção.

Tabela 2.3 Efeito da temperatura no rendimento dos produtos (Adaptado LEITE, 2013).

Variável	Carga	
	Nafta	Nafta
COT (°C)	815,0	855,0
Hidrogênio (% m)	0,66	0,81
Metano (% m)	13,82	17,40
Eteno (%m)	24,71	29,17
Propeno (%m)	17,34	14,44
Butadieno (%m)	4,180	3,990
Benzeno (%)	4,890	7,080
Gasolina (C5+)	22,640	20,01

Outras variáveis importantes para a formação dos produtos em um SC são o COP e a relação entre o vapor de diluição e a carga de hidrocarboneto (DS/HC). Uma menor pressão de operação resulta em uma maior facilidade para formação de olefinas e redução da formação de coque, pois estas reações são volumétricas. Portanto, procura-se operar os fornos de pirólise com a menor pressão possível. Já a relação DS/HC é importante, pois ao se injetar vapor de diluição é reduzida a pressão parcial dos hidrocarbonetos, o que aumenta a taxa de reação desejada de olefinas leves em detrimento de cadeias polinucleadas e compostos pesados que contribuem para um aumento na produção de coque e menores campanhas operacionais dos fornos.

A formação de coque em um forno de pirólise é um fenômeno inerente ao processo de *steam cracking* e sua taxa de formação depende do tipo de matéria prima craqueada, das variáveis de processo do forno (COT, DS/HC e COP) e tecnologia da serpentina (tempo de residência e metalurgia do tubo).

A temperatura das serpentinas após o decoque é de aproximadamente 1.000 °C. Os hidrocarbonetos próximos à parede dos tubos fluem a uma velocidade muito mais baixa comparativamente à velocidade no seio do fluido, que geralmente está na faixa de 200 a 300 m/s. Dependendo da rugosidade da superfície interior do tubo, podem existir zonas próximas da imobilidade, levando à formação de um filme fluido, no qual suas espécies hidrocarbônicas

estão submetidas à temperatura muito superior à média do escoamento, o que favorece sensivelmente as reações indesejadas (Adaptado, LEITE 2013).

A formação de coque se inicia quando a superfície metálica do tubo está ainda limpa e exposta, recebendo carga a elevadas temperaturas. O coque formado nesta etapa do processo é denominado coque catalítico em função da formação do coque ser catalisada pelo metal do tubo. A estrutura do coque é determinada pela severidade do processo, quando são processadas naftas em temperaturas superiores a 900°C, é formado um coque laminar de cor negra. Em temperaturas inferiores a 900°C é formado um coque composto de partículas esféricas de cor cinza escuro (Braskem, 2014).

Os principais mecanismos de formação do coque são:

- Reações heterogêneas de decomposição de hidrocarbonetos na superfície do metal da serpentina, com formação de coque catalítico tipo filamentoso (Figura 2.4) contendo de 0,2 a 2% de metal. Normalmente ocorrem na superfície dos tubos limpos em início de campanha dos fornos, catalisados por metais como o ferro, níquel e outros metais.

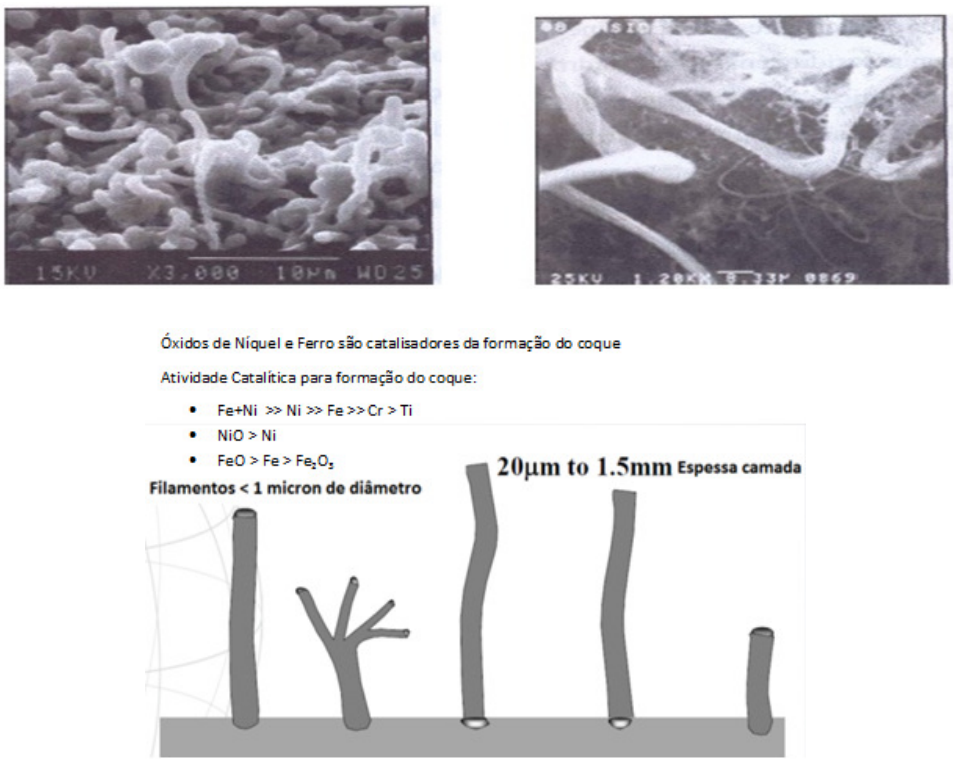


Figura 2.4 Características do coque catalítico (Curso LUMMUS, 2012).

- Reações de desidrogenação e condensação de hidrocarbonetos insaturados, especialmente aromáticos policíclicos, em fase gasosa, com formação de coque assintótico tipo amorfo ou pirolítico (Figura 2.5), que ocorrem normalmente em superfície já cobertas com coque (sem o contato com o metal) e altas temperaturas, típica de campanhas em andamento.

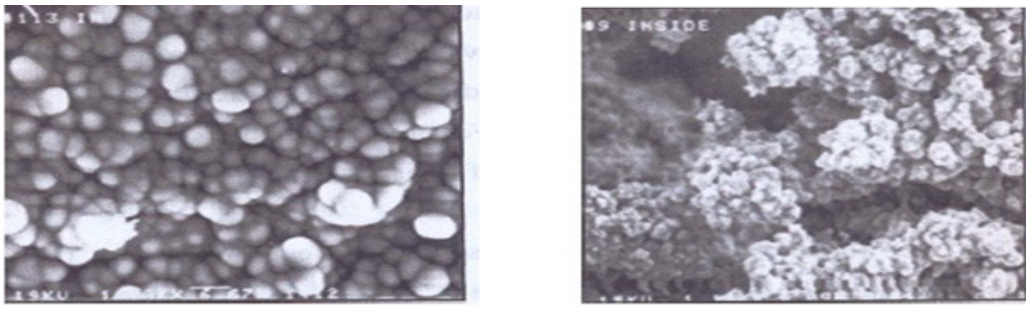


Figura 2.5 Características do coque pirolítico e de condensação (Braskem, 2014).

No primeiro estágio a taxa de deposição do coque é maior devido à influência catalítica do metal da parede do tubo sobre a decomposição dos predecessores do coque. A atividade catalítica dos metais decresce segundo a seguinte ordem: Fe > Ni > Ti > Zr > Cu > W.

O coque contém 0,20 a 2% de metal que migrou da superfície do tubo para o interior do mesmo, sendo o cromo o principal metal migrado. Esse metal migrado para o coque acumula-se principalmente na superfície do mesmo, com menores quantidades de metal ao longo do coque.

No decorrer da campanha ocorre um decréscimo na taxa de formação do coque que se mantém relativamente constante até o final, devido ao fato da diminuição da atividade catalítica e de prevalecer a formação do coque tipo pirolítico e de condensação na superfície coberta com camada de carbono.

Uma forma indireta de verificar a taxa de formação de coque nas serpentinas é pela TMT (**T**emperatura no **M**etal do **T**ubo) conforme pode ser visualizado na Figura 2.6.

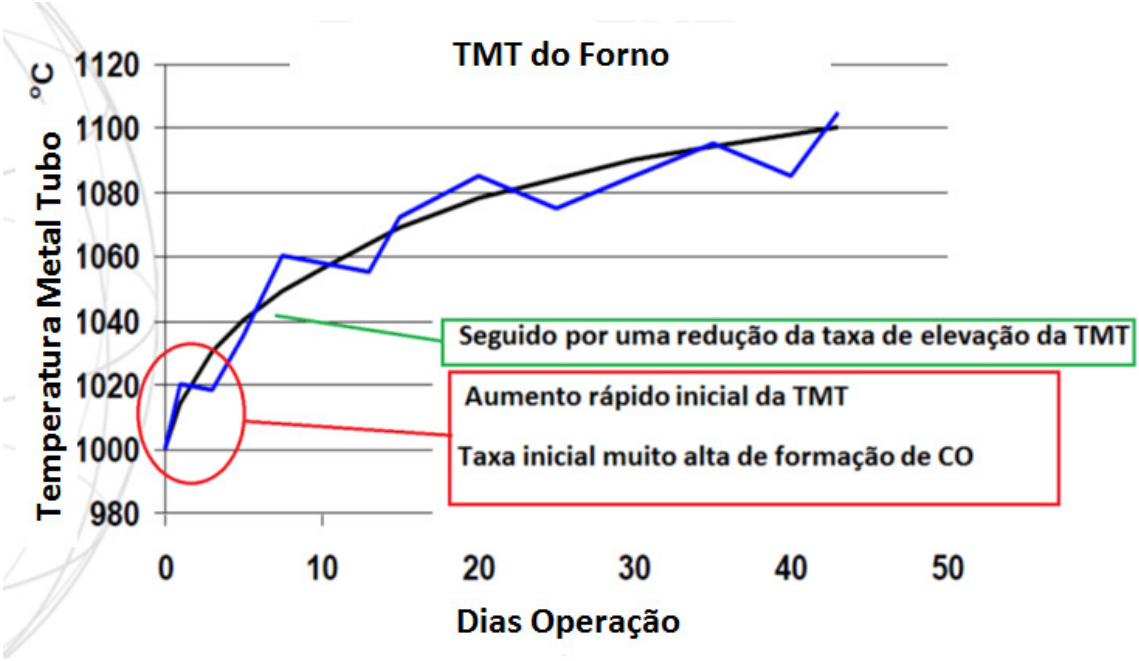


Figura 2.6 Curva de TMT durante a operação de um forno de pirólise (Adaptado LUMMUS, 2012).

Os principais impactos pela formação do coque são:

1) A espessura do coque na serpentina se comporta como uma resistência à transferência de calor o que aumenta de forma significativa a temperatura do metal da serpentina até o limite do material (geralmente varia de 1.100 a 1.150 °C). Quando esta temperatura for alcançada, o forno deverá ser retirado de operação para realizar o decoque da serpentina;
2) O coque formado reduz a área da seção transversal para o escoamento dos produtos, aumentando a perda de carga na serpentina;
3) Demanda paradas regulares (geralmente entre 40 e 60 dias) para realizar o processo de decoque do forno, implicando em perda de produção, consumo energético, aumento de carburização da serpentina além de submeter o metal do tubo a um ciclo térmico que pode prejudicá-lo.

O **processo de decoque**, é um processo onde ocorre a queima controlada do coque nas serpentinas dos fornos com vapor e ar. Independente da operação do forno e mesmo minimizando a formação de coque nas serpentinas, a cada 40 a 60 dias o forno deverá sair de operação para realizar a etapa de decoque. A operação se inicia primeiramente retirando a carga de hidrocarbonetos e passando somente vapor pela serpentina (este processo é conhecido também como *Hot Steam Stand-by* ou HSS). Após a retirada de carga, a corrente

que passa pelo forno é desviada da linha de transferência para o pote de decoque ou para a câmara de radiação do forno. Para evitar uma reação descontrolada entre o ar e o coque, o decoque ocorre em diversas etapas ou fases onde o ar é dosado lentamente, de modo a queimar progressivamente o coque depositado. O teor de O_2 varia de 1% até 15% na última etapa do decoque. O vapor atua como diluente e removedor de calor liberado na combustão do coque além interagir com o coque, produzindo CO, CO_2 e H_2. Uma variável importante a ser acompanhada durante o processo de decoque é o COT, que pode variar na faixa de 750 a 850 °C (LUMMUS, 2010; LEITE, 2013).

2.2.3 Principais componentes em um Forno de Pirólise

O tipo de matéria prima a ser processada impacta diretamente no projeto e consequentemente nas dimensões do forno. As reações de craqueamento a vapor são extremamente endotérmicas, necessitando de grandes cargas térmicas nos fornos. Um dos grandes desafios no projeto do forno é recuperar o máximo de calor possível, pois tem um impacto significativo no custo variável da planta. Desta forma um forno convencional dispõe de, pelo menos três bancos de tubos, como é descrito a seguir:

- A matéria prima entra à temperatura entre 60°C e 140°C na zona de convecção, em estado líquido ou parcialmente vaporizada. Após a passagem pelos tubos de aquecimento e vaporização da carga, cada passe recebe a injeção de vapor de diluição. O principal objetivo do vapor de diluição é reduzir a pressão parcial dos hidrocarbonetos, diminuindo a formação de coque na serpentina e possibilitando uma maior campanha operacional dos fornos.

- O banco intermediário de tubos normalmente tem por função pré-aquecer a água de caldeira (BFW) que alimenta o tubulão de vapor de super alta pressão ou superaquecer o vapor que foi gerado nos TLE´s. Nas plantas mais novas é comum existirem as duas opções.

- O banco inferior da zona de convecção aquece a mistura vapor/hidrocarbonetos até uma temperatura de 650°C antes de se dirigir à zona de radiação. Acima desta temperatura ocorre o craqueamento dos hidrocarbonetos na zona de convecção que é uma condição extremamente indesejada.

Existem muitos arranjos de banco de convecção e variam ao longo do tempo e entre os diferentes licenciadores. A tendência é recuperar ao máximo o calor na zona de convecção para melhorar a eficiência térmica, existindo fornos com até sete bancos de tubos (LEITE, 2013). Um arranjo simplificado de um forno de pirólise pode ser visualizado na Figura 2.7

A zona de radiação é constituída por uma câmara, em que queimadores, que podem ser de chão e de parede, irradiam calor para as serpentinas. Geralmente os queimadores queimam gás combustível produzido no próprio forno. Tipicamente os queimadores de parede são auto-aspirados, ou seja, a velocidade do gás combustível determina a quantidade de ar que será aspirado.

Diferentemente da zona de convecção, na zona de radiação as serpentinas são colocadas verticalmente, de modo a permitir um elevado fluxo indireto de calor para os tubos. As temperaturas na zona de radiação podem chegar a 1.200°C na parede da serpentina, desta forma os tubos exigem materiais de ligas especiais contendo 25 a 35% de cromo, 20% a 45% de níquel. Ligas austeníticas HP estabilizadas com nióbio também são bastante utilizadas (LIMA, 2002).

O forno também pode apresentar diferentes arranjos em relação à tiragem, em que se destacam os fornos com tiragem induzida e balanceada. Após a reação de craqueamento a vapor é necessária uma redução brusca de temperatura para cessar a reação. O equipamento responsável por esta função é o TLE ou TLX (*transfer line exchanger*) um trocador especial em que a água saturada do tubulão é vaporizada através de *risers* resfriando o gás craqueado de aproximadamente 840 °C a temperaturas entre 400°C e 500°C. Outro componente importante em um forno de pirólise é a TLV (*transfer line valve*). A válvula da linha de transferência tem por função isolar o forno do restante do processo, para realizar as operações de remoção de coque ou manutenções no equipamento.

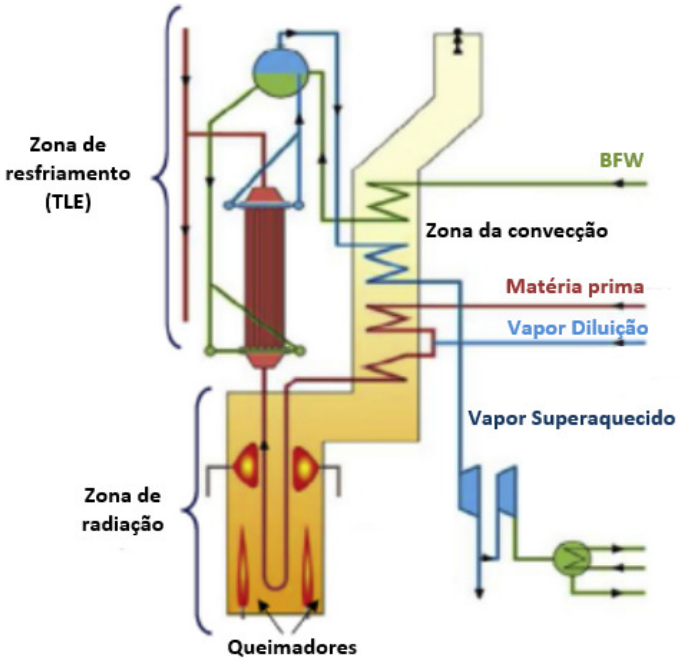


Figura 2.7 Arranjo geral simplificado de um Forno de Pirólise (Adaptado Curso LUMMUS, 2012).

2.3 Mecanismos de transferência de calor

A transferência de calor ou propagação térmica é a transmissão de energia térmica de uma massa (corpo) mais quente para uma massa mais fria. Em outras palavras, é a troca de energia calorífica entre dois sistemas de temperaturas diferentes. A energia térmica pode passar de um corpo para outro fundamentalmente de três maneiras diferentes: condução, convecção e radiação conforme pode ser visualizado na Figura 2.8.

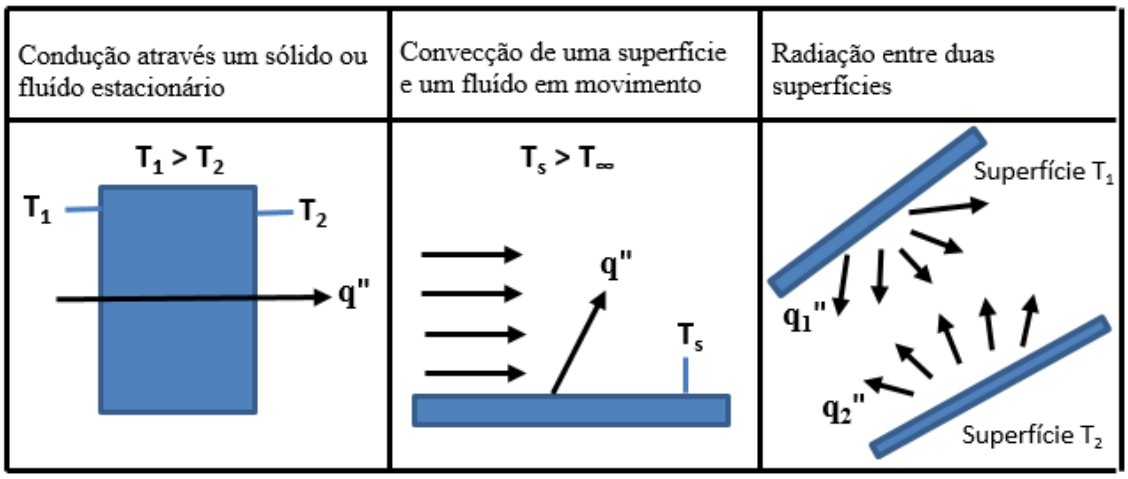


Figura 2.8 Tipos de transferência de calor Condução, Convecção e Radiação (Adaptado INCROPERA e DEWITT, 1996).

2.3.1 Condução

Condução é um tipo de transferência de energia entre átomos e/ou moléculas vizinhas em uma substância devido a um gradiente de temperatura. Diferentemente da convecção, na condução não há movimento da matéria na escala macroscópica. A condução está presente no nosso dia a dia em muitos exemplos como em um dia de inverno onde uma grande quantidade de energia é perdida do quarto aquecido para o ar externo. Esta perda é ocasionada principalmente pela transferência de calor por condução da parede que separa o quarto do ar externo (INCROPERA e DEWITT, 1996).

A condução através de um metal ocorre através de movimentos randômicos dos elétrons através do metal. Os elétrons que estão na parte quente do metal apresentam maior energia cinética dos elétrons que estão na extremidade mais fria do metal, resultando em uma transferência de calor do lado quente para o lado frio do metal (THOME, 2015).

É possível quantificar os tipos de transferência de calor através de apropriadas equações de taxa. Estas equações são utilizadas para quantificar o montante de calor transferido por unidade de tempo. Para a condução esta equação é conhecida como Lei de Fourier. Para o fluxo de calor unidimensional tem-se as equações (2.11) e (2.12):

$$q_x'' = -k\frac{dT}{dx} \tag{2.11}$$

$$q_x = q_x'' \cdot A \tag{2.12}$$

onde:

q_x'' (W/m^2): o fluxo de calor é a taxa de calor na direção x por unidade de área;

q_x (W): é a taxa de calor unidimensional na direção x;

k (W/m K): é a condutividade térmica e depende das características dos materiais;

dT: diferencial de temperatura.

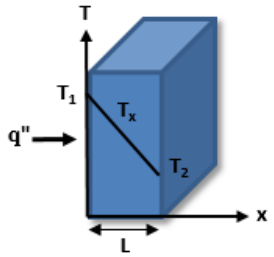


Figura 2.9 Transferência de calor unidimensional por condução (Adaptado INCROPERA e DEWITT, 1996).

2.3.2 Convecção

A convecção pode ser definida como o processo pelo qual energia é transferida da região mais quente para a região mais fria de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. O mecanismo da convecção pode ser facilmente entendido considerando, por exemplo, um circuito sendo refrigerado (ar ventilado) como mostra a figura a seguir.

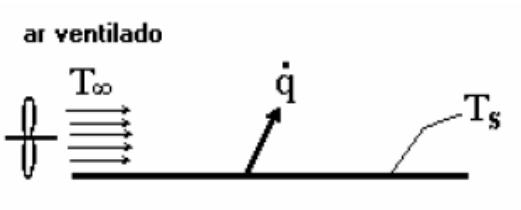


Figura 2.10 Transferência de calor por convecção.

Neste modo de transferência de calor, quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento de uma massa de fluido, a transferência de calor entre uma superfície solida e o fluido é por pura condução (Adaptado CENGEL, 2012).

A velocidade da camada de ar próxima à superfície é muito baixa em razão das forças viscosas. Nesta região o calor é transferido por condução. Por conseguinte, ocorre um armazenamento de energia pelas partículas presentes nesta região. Na medida em que estas partículas passam para a região de alta velocidade, elas são carreadas pelo fluxo transferindo calor para as partículas mais frias. No caso da figura, a convecção foi forçada, pois o movimento de mistura foi induzido por um agente externo, no caso o ventilador. Caso o ventilador estivesse parado, podemos afirmar que a convecção é natural. A convecção obviamente é maior quando é forçada em comparação à natural. Existe também a convecção com mudança de fase que apresenta elevados coeficientes de troca térmica de convecção (*h*) conforme visualizado na

Tabela 2.4. Para determinar o coeficiente de película é necessário definir as condições de contorno, pois o coeficiente é influenciado pela geometria, natureza da movimentação do fluido além das propriedades termodinâmicas e de transporte (INCROPERA e DEWITT, 1996).

Tabela 2.4 Valores típicos de coeficientes de troca térmica por convecção (INCROPERA e DEWITT adaptado, 1996).

Processos	*h* (W/m2 K)
Convecção Natural	
Gases	2 a 25
Líquidos	50 a 1000
Convecção Forçada	
Gases	25 a 250
Líquidos	50 a 20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2.500 a 100.000

A equação que determina o fluxo de calor por convecção, também conhecida como lei de Newton de resfriamento, é mostrada na Equação (2.13):

$$q_x^{''} = h(T_s - T_\infty) \tag{2.13}$$

onde:

$q_x^{''}$ (W/m^2): o fluxo de calor é a taxa de calor na direção x por unidade de área;

h(W/m^2 K): Coeficiente de troca térmica por convecção ou coeficiente de película;

T_s (K): Temperatura da superfície;

T_∞ (K): Temperatura do seio do fluído;

Alguns parâmetros adimensionais importantes para o estudo da transferência de calor por convecção são mostradas nas Equações (2.14) à (2.18):

$$Re \equiv \frac{\rho v L_c}{\mu} \tag{2.14}$$

onde Re é o número de Reynolds também conhecido como a razão entre as forças de inercia e as forças viscosas, ρ é a massa específica, v a velocidade, μ a viscosidade e L_c o comprimento característico da superfície.

$$Pr \equiv \frac{v}{\alpha} \tag{2.15}$$

onde Pr é o número de Prandtl, υ é a viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica do fluido.

$$Nu \equiv \frac{hLc}{k} \tag{2.16}$$

onde Nu é o número de Nusselt, a razão entre as taxas de calor convectivo e de condução.

$$Gr \equiv \frac{g\beta(Tsup - T_\infty)Lc^3}{\upsilon^2} \tag{2.17}$$

O número de Grashof é a razão entre as forças de empuxo e as forças viscosas, onde g é a aceleração da gravidade, β o coeficiente volumétrico de expansão térmica.

$$Ra \equiv Gr \times Pr \tag{2.18}$$

O número de Rayleigh representa a magnitude das forças de empuxo e das forças viscosas no fluido.

Todas as propriedades físicas do fluido devem ser avaliadas na temperatura média do filme, a qual é calculada pela média aritmética entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido.

Quando a razão entre $Gr/Re^2 >> 1$ é possível desprezar os efeitos da convecção forçada e quando $Gr/Re^2 << 1$ a convecção natural pode ser desprezada.

Em situações em que os efeitos da convecção natural e da convecção forçada têm a mesma ordem de magnitude, ambos devem ser considerados na análise. Isso ocorre quando a relação $Gr/Re \approx 1{,}0$. Uma prática usual é correlacionar esses resultados pela Equação (2.19):

$$\overline{Nu}^3 = \overline{Nu}_F^3 \pm \overline{Nu}_N^3 \tag{2.19}$$

Sendo Nu_F o valor médio devido à convecção forçada e Nu_N, Nusselt médio resultante da convecção natural. O sinal positivo se aplica para escoamentos paralelos e transversais, enquanto que o sinal negativo é usado em escoamentos opostos (Incropera e DeWitt, 1996).

Para a convecção livre externa em uma placa vertical, Churchill e Chu (1975), apud Incropera et al. (1996) desenvolveram a seguinte correlação empírica mostrada na Equação (2.20):

$$\overline{Nu} = \left\{0{,}825 + \frac{0{,}387Ra^{1/6}}{\left[1+(0{,}492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2 \tag{2.20}$$

onde Nu e Ra estão definidos em termos do comprimento da placa. Esta equação fornece um coeficiente médio sobre a placa e pode ser usada para qualquer valor de Rayleigh.

2.3.3 Radiação

A radiação pode ser definida como a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação não exige a presença de um meio interveniente. De fato, a transferência de calor por radiação é mais rápida (na velocidade da luz) e ela não sofre atenuação no vácuo (CENGEL, 2012). O exemplo mais evidente que podemos dar é o próprio calor que recebemos do sol. Neste caso, mesmo havendo vácuo entre a superfície do sol (temperaturas de aproximadamente 5.500°C) e a superfície da terra, a vida na Terra depende desta energia recebida através de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são comuns a muitos outros fenômenos: raio-X, ondas de rádio e TV, micro-ondas e outros tipos de radiações. As suas características são primeiramente que todos os corpos em temperatura acima do zero absoluto emitem continuamente radiação térmica. Outras características importantes são que as intensidades das emissões dependem somente da temperatura e da natureza da superfície emitente e a radiação térmica viaja na velocidade da luz.

As principais equações utilizadas na transferência de calor por radiação são dadas nas Equações (2.21) - (2.26):

$$E_b = \sigma T_s^4 \tag{2.21}$$

A equação (2.21), conhecida também como Lei de Stefan-Boltzmann calcula a energia emitida (E_b) por uma superfície na temperatura T_s e considera a constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5,67 x 10^{-8} W/m^2 K^4). Nesta equação foi considerada uma superfície ideal chamada de corpo negro. Na prática toda superfície emite menos que um corpo negro desta forma a equação 2.21 se torna a Equação (2.22):

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 \tag{2.22}$$

onde ε é a emissividade. A emissividade deve apresentar valores entre zero e um. Quanto mais próximo de um a emissividade do corpo se aproxima ao do corpo negro.

Apesar das superfícies emitirem radiação, elas também a absorvem. Desta forma, a energia absorvida por uma superfície pode ser representada:

$$G_{abs} = \propto G \tag{2.23}$$

onde α é a absortividade que deve apresentar valores na faixa 0 < α < 1. Com os conceitos de emissividade, absortividade e corpo negro a equação de transferência de calor por radiação se torna:

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \tag{2.24}$$

$$q_{rad} = h_r A(T_s - T_{sur}) \tag{2.25}$$

$$h_r \equiv \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \tag{2.26}$$

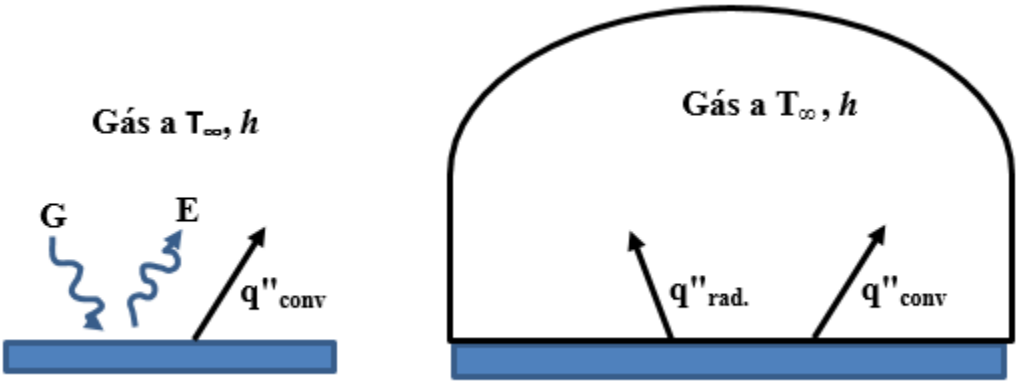


Figura 2.11 Transferência de calor por radiação (Adaptado INCROPERA e DEWITT, 1996).

2.4 Refratários

As principais características dos refratários são (UNEP, 2006):

1) Capacidade de resistir a altas temperaturas;
2) Resistência mecânica elevada;
3) Resistência à erosão;
4) Resistência aos ataques químicos de ácidos, bases, metais etc. que podem ser encontrados nos gases de combustão do forno.

Os tipos de refratários podem ser classificados pela composição química conforme visualizado na Tabela 2.5 ou também pelo uso final e pelo processo de produção.

Tabela 2.5 Classificação dos refratários baseado na composição química do material (Gilchrist Adaptado, 1977).

Composição Química	Exemplos
Ácido que rapidamente reage com bases	Sílica, Semisilica e Aluminosilicato
Básicos, que consistem óxidos metálicos que resistem a ação de bases	Magnesita, cromo-magnesita, Magnesita-cromita, Dolomita
Neutros, que não reagem nem com ácidos nem com bases	Tijolos refratários, Cromo, Alumina pura
Especiais	Carbono, Carboneto de Silício e Zircônia

2.4.1 Tijolos Refratários

Tijolo refratário é o tipo mais comum de material para essas aplicações. É amplamente utilizado na indústria de ferro e aço, metalurgia de não-ferrosos, indústria de vidro, fornos de cerâmica, indústria de cimento, indústria química entre muitos outros setores. Esses tijolos consistem de silicatos de alumínio com diferentes teores de sílica (SiO_2) de até 78% e conteúdo de Al_2O_3 de até 44%. A Tabela 2.6 mostra que os pontos de fusão dos tijolos refratários diminuem com o aumento das impurezas e redução do teor de Al_2O_3. Esses materiais são frequentemente utilizados em fornos e caldeiras, porque são amplamente disponíveis e relativamente baratos (UNEP, 2006). Após sua instalação é necessário um procedimento de cura e secagem, a fim de que toda a umidade existente seja eliminada.

Tabela 2.6 Propriedades dos tijolos (UNEP Apud BEE Adaptado, 2005).

Tipo de Tijolo	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Outros componentes (%)	Ponto Fusão (°C)
Super troca	49-53	40-44	5-7	1745-1760
Alta troca	50-80	35-40	5-9	1690-1745
Intermediário	60-70	26-36	5-9	1640-1680
Alta troca (Silício)	65-80	18-30	3-8	1620-1680
Baixa troca	60-70	23-33	6-10	1520-1595

2.4.2 Refratário de Alto Teor de Alumina

Refratários de silicato de alumina apresentam mais de 45% de alumina e são geralmente denominados de materiais de alta alumina. As propriedades de reflexão destes refratários aumentam com o aumento do teor da alumina. As aplicações para estes tipos de refratários incluem chaminés de fornos, fornos de cerâmica, fornos de cimento, tanques de vidro e equipamentos para fusão de uma ampla gama de metais (UNEP, 2006).

2.4.3 Tijolos de Sílica

Os tijolos de sílica são um tipo de refratário que contém pelo menos 93% de SiO_2. A matéria prima são rochas de elevada qualidade. Esse refratário tem ampla utilização em fornos de fusão de ferro, aço e na indústria de vidro. Além de elevado ponto de fusão, outra propriedade importante é a sua alta resistência ao choque térmico. Estas características contrastam com a de muitos outros refratários como por exemplo ao silicato de alumina, que começam a fundir-se e a decompor-se a temperaturas consideravelmente inferiores aos seus pontos de fusão. Outras vantagens são estabilidade e alta resistência à fragmentação (UNEP, 2006).

2.4.4 Magnesita

Os refratários de magnesita são materiais básicos pois são oriundos de uma base forte e um ácido fraco. Esse refratário contém pelo menos 85% de óxido de magnésio. Eles são

feitos de magnesita que ocorrem naturalmente ($MgCO_3$). As propriedades deste refratário dependem da concentração de silicato e temperatura de operação do equipamento. A boa qualidade da magnesita geralmente resulta de uma relação CaO-SiO_2 de menos do que dois com uma concentração mínima de ferrita, particularmente se os fornos irão operar em meios de oxidação e redução. A resistência à escória é elevada especialmente para escórias ricas em óxidos de cálcio e ferro (UNEP, 2006).

2.4.5 Refratários Cromita

Os refratários de cromita são basicamente de dois tipos:

1) Refratários **Cromo-magnesita**, que normalmente contêm de 15-35% de Cr_2O_3 e 42-50% de MgO. Eles são utilizados para construção de partes críticas de fornos de alta temperatura. Estes materiais podem suportar escórias e gases corrosivos e tem alto índice de refração.
2) Refratários **Magnesita-cromita**, que contêm, pelo menos, 60% de MgO e 8-18% de Cr_2O_3. Eles são adequados para serviço em temperaturas mais elevadas e para contato com as escórias de características mais básicas utilizadas na fusão do aço. Magnesita-cromita normalmente tem uma melhor resistência à fragmentação do que a cromo-magnesita (UNEP, 2006).

2.4.6 Refratários de Zircônia

Dióxido de zircónio (ZrO_2) é um material polimórfico. É essencial estabilizá-lo antes da sua aplicação como um refratário, através da incorporação de pequenas quantidades de cálcio, magnésio e óxido de cério entre outros componentes. As suas propriedades dependem principalmente do grau de estabilização e da qualidade da matéria-prima original. Refratários de zircônia têm uma resistência muito alta à temperatura ambiente, até 1500 ºC. Eles são, portanto, úteis como materiais para equipamentos de combustão que alcançam essas temperaturas. A condutividade térmica de dióxido de zircónio é muito menor do que a da maior parte dos outros refratários e, por conseguinte, o material é utilizado como um refratário isolante. Os refratários de zircônia têm vasta aplicação em fornos de vidro, pois não são facilmente umedecidos por vidro fundido e não reagem facilmente com o mesmo (UNEP, 2006).

2.4.7 Refratários Monoblocos ou Monolíticos

Refratários monolíticos são tipos de refratários produzidos em monoblocos. As principais vantagens deste tipo de produção de refratário são (UNEP, 2006):

- Facilidade na montagem;
- Eliminação das articulações que são necessárias em refratários que não são monoblocos;
- Não exige elevada qualificação para instalação do refratário;
- Facilidade de transporte e manuseio;
- Redução do tempo para reparos;
- Redução das perdas por calor;
- Maior resistência e estabilidade dentro do equipamento.

2.5 Materiais Isolantes

Os materiais isolantes têm como o objetivo reduzir de forma significativa as perdas de calor através as paredes dos fornos. Isso é possível utilizando uma camada de um material com baixa condutividade térmica instalado entre a superfície interna quente de um forno e o revestimento exterior, mantendo assim a temperatura externa baixa. As principais características destes materiais são:

1) Isolar a câmara de combustão dos elementos estruturais;
2) Reirradiar o calor não absorvido pelos tubos para dentro da câmara;
3) Evitar perdas de calor para o exterior;
4) Evitar que os gases de combustão, que normalmente contêm gases ácidos como NOx, SO_2 e CO_2 atinjam as chapas da carcaça metálica onde se condensariam provocando corrosão ácida.

Os materiais isolantes podem ser classificados nos seguintes grupos:

- Tijolos isolantes;

- Concretos isolantes;

- Fibras cerâmicas;

- Silicato de cálcio;

- Revestimento cerâmico.

Materiais isolantes apresentam baixa condutividade pelas características de seus poros enquanto sua capacidade térmica depende da densidade e calor específico. Existem materiais isolantes onde é injetado ar em seus poros devido à condutividade térmica muito baixa deste composto. Cada material isolante apresenta uma temperatura em que o desempenho do material é afetado. Portanto a escolha de um material isolante deve ser baseada na sua capacidade para resistir à determinada carga térmica e a temperatura em que o material é submetido. Um material isolante bastante utilizado é a diatomita, também conhecido como *Kiesel guhr*, que consiste de uma massa de esqueletos de plantas aquáticas depositadas a milhares de anos atrás em mares e lagos. Sua composição química é de sílica contaminada com argila e matéria orgânica. Uma vasta gama de isolamentos refratários com grandes combinações de propriedades já está disponível. A Tabela 2.7 mostra as principais propriedades físicas de alguns importantes refratários isolantes.

Tabela 2.7 Propriedades dos materiais isolantes (UNEP Apud BEE Adaptado, 2005).

Tipo	Condutividade térmica a 400°C (cal/K m)	Temperatura máx. (°C)	Resistência a compressão a frio (kgf/cm^2)	Porosidade (%)	Massa específica aparente (kg/m^3)
Diatomita Sólida	0,025	1000	270	52	1090
Diatomita Porosa	0,014	800	110	77	540
Argila	0,03	1500	260	68	560,0
Alumina	0,028	1500-1600	300	66	910,0
Silica	0,04	1400	400	65	830,0

2.5.1 Revestimentos de alta emissividade

A emissividade de um material, conforme visualizada na Equação (2.22), é a capacidade de emissão de energia por radiação da sua superfície. Possuem a capacidade de emitir energia eletromagnética todos os corpos a temperatura superior a zero Kelvin. Essa taxa de emissão é calculada através da razão entre a energia irradiada por um determinado material e a energia irradiada por um corpo negro para um mesmo comprimento de onda. Qualquer objeto que não seja um verdadeiro corpo negro tem emissividade menor que um e superior a zero. O desenvolvimento de revestimentos ou *coatings* de alta emissividade permite que a emissividade da superfície de materiais refratários seja aumentada. Geralmente estes revestimentos são aplicados na superfície interior dos refratários ou isolantes dos fornos. A

Figura (2.12) mostra que a emissividade de vários materiais de isolamento reduz com o aumento da temperatura. Ao se utilizar esses revestimentos a emissividade praticamente fica constante com a temperatura e até levemente superior. Por exemplo, um forno com fibra cerâmica apresenta emissividade de 0,3 com 1.200 °C. Já com o revestimento esta emissividade pode chegar a 0,8, o que resulta em um aumento da transferência de calor através da radiação. Outros benefícios destes revestimentos são aquecimento uniforme, maior vida útil dos refratários e menor erosão do material isolante. Para fornos que operam em batelada reduziu-se entre 25-45% do consumo de combustíveis ou energia (UNEP 2006).

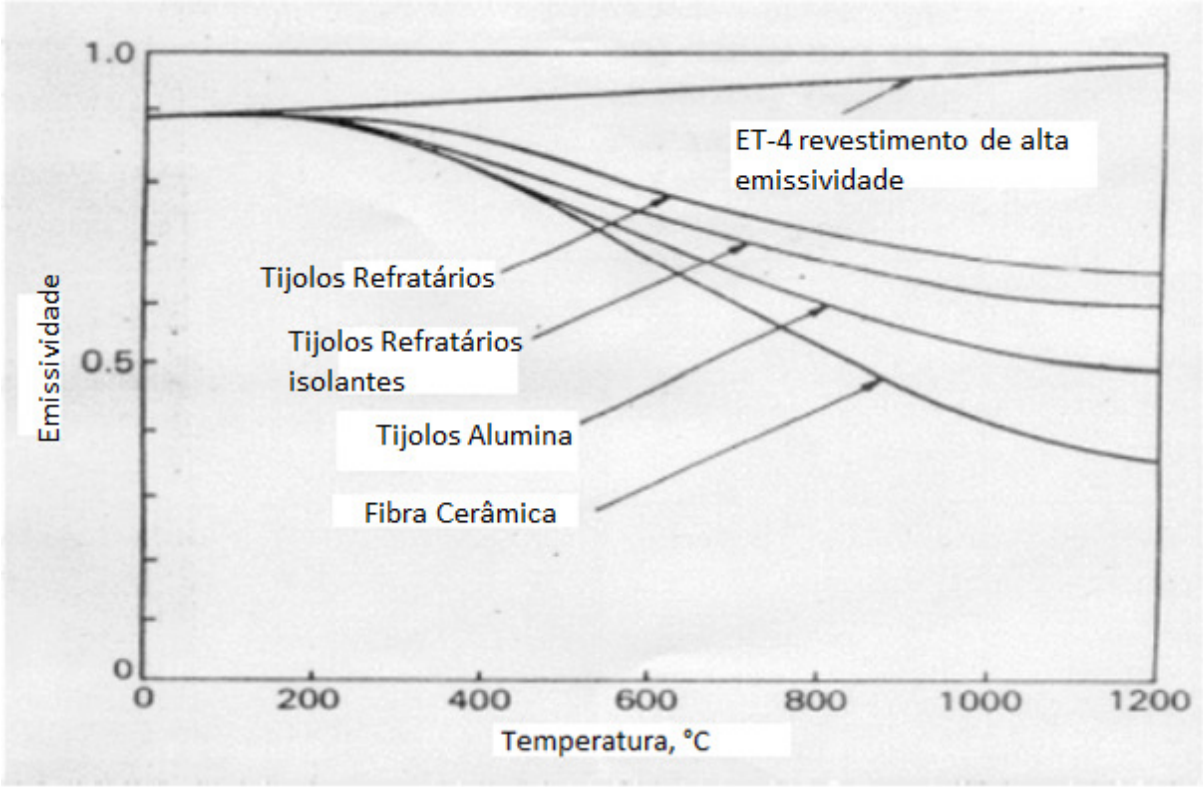


Figura 2.12 Emissividade de refratários a diferentes temperaturas (Adaptado BEE, 2005).

2.6 Consumo de Energia e Meio Ambiente

Em 1997 foi discutido e negociado em Quioto um protocolo com a iniciativa de reduzir a emissão de gases do efeito estufa devido às mudanças climáticas na Terra. O protocolo é consequência de diversos eventos iniciados com a *Conference on the Changing Atmosphere* em Toronto, Canadá (outubro 1988), seguida pelo *IPCC´s First Assessment Report* na Suécia (1990) e na ECO-92, no Rio de Janeiro, Brasil (junho de 1992). O protocolo de Quioto constitui-se em um tratado internacional com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que agravam o efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações cientificas, como causas antropogênicas do aquecimento global. O Conselho de Ministros da União Europeia (EU) acordou que o aumento médio de 2°C na temperatura global constitui um limite que não deve ser ultrapassado. O perfil de temperatura média global e as respectivas projeções estimadas pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) podem ser visualizadas na Figura 4.9. O conselho decidiu para os países desenvolvidos reduzir as suas emissões de gases de efeito estufa entre 15% a 30% abaixo dos níveis de 1990, observando a provável necessidade de uma redução global que poderá atingir os 50% até 2050.

Segundo Elkington, os três pilares da sustentabilidade: Ambiental, Social e Econômico já existiam, mas sua nova abordagem no sentido da transparência e dos princípios das partes interessadas, foram cruciais na formulação de iniciativas importantes para o meio ambiente como a GRI (*Global Reporting Initiative*) ou os Índices de Sustentabilidade *Dow Jones* (Adaptado ELKINGTON, 1997).

Um resumo das principais opções para redução de emissões até 2050, desenvolvidas por Socolow e Pacala, são mostradas na Figura 4.10. Entre as 15 opções, diversas ações estão relacionadas a redução do consumo de energia de grandes consumidores como usinas termoelétricas e indústrias.

A Braskem, maior petroquímica das Américas e líder mundial na produção de biopolímeros, assinou, em São Paulo, a Carta Aberta ao Brasil sobre Mudança do Clima de 2015. O documento, foi apresentado aos ministros Joaquim Levy (Fazenda) e Izabella Teixeira (Meio Ambiente), renovando e ampliando os compromissos assumidos pelas empresas na Carta Aberta de 2009, além de propor um conjunto de ações para estimular o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono competitiva, responsável e inclusiva. Segundo a carta, o desafio da mudança do clima é uma oportunidade de promover no Brasil inovações, tecnologias

e ações que produzam um novo salto de desenvolvimento, criação de empregos, conservação dos recursos naturais, redução das desigualdades e ampliação do progresso social.

As entidades signatárias do documento têm como meta reduzir emissões de gases de efeito estufa e aumentar sua eficiência energética, assim como eliminar de suas redes de produção e comercialização produtos oriundos de desmatamento ou exploração ilegal (Adaptado BRASKEM, 2015).

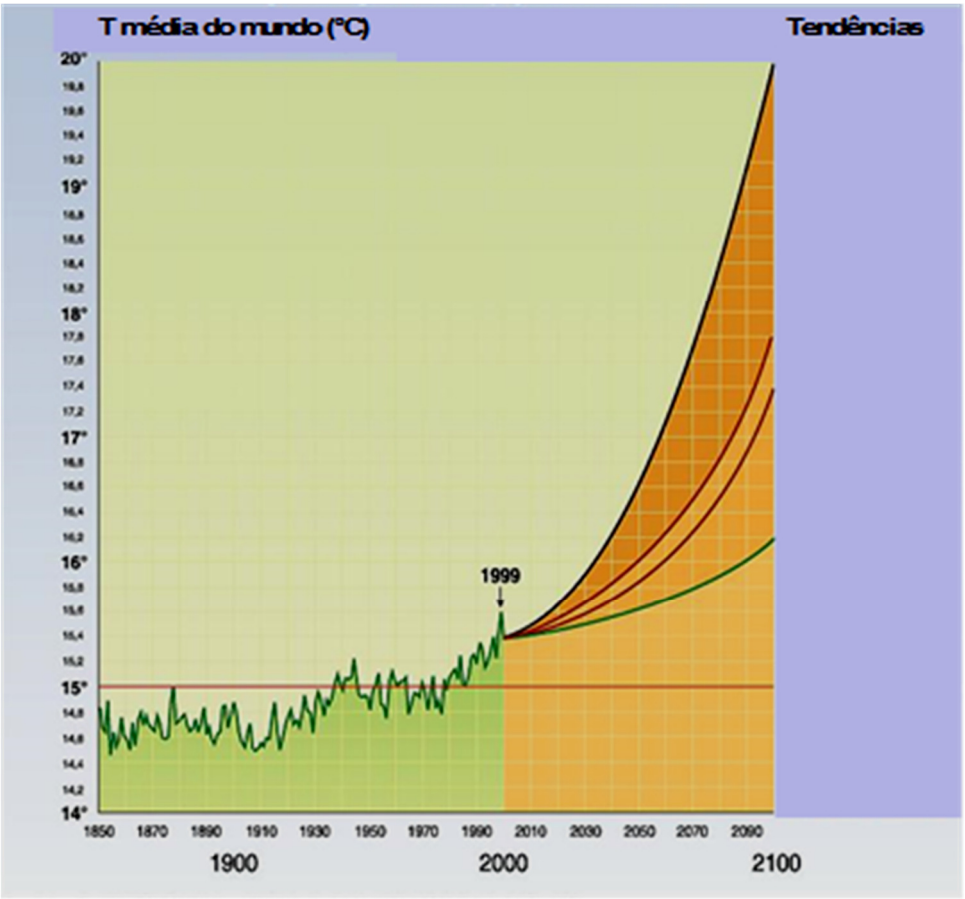


Figura 2.13 Temperatura global desde 1855-1999 com projeção até 2.100 (Adaptado, IPCC, 2005).

O *steam cracker* é considerado uma unidade industrial intensiva em consumo energético, pois a reação de craqueamento da matéria prima para obter os principais produtos da primeira geração é extremamente endotérmica conforme mostrado no capítulo 2. Desta forma, reduzir as perdas pelas paredes dos fornos tem uma contribuição ambiental pois, demandando menor consumo de combustíveis, menor será a emissão de CO_2 para a atmosfera.

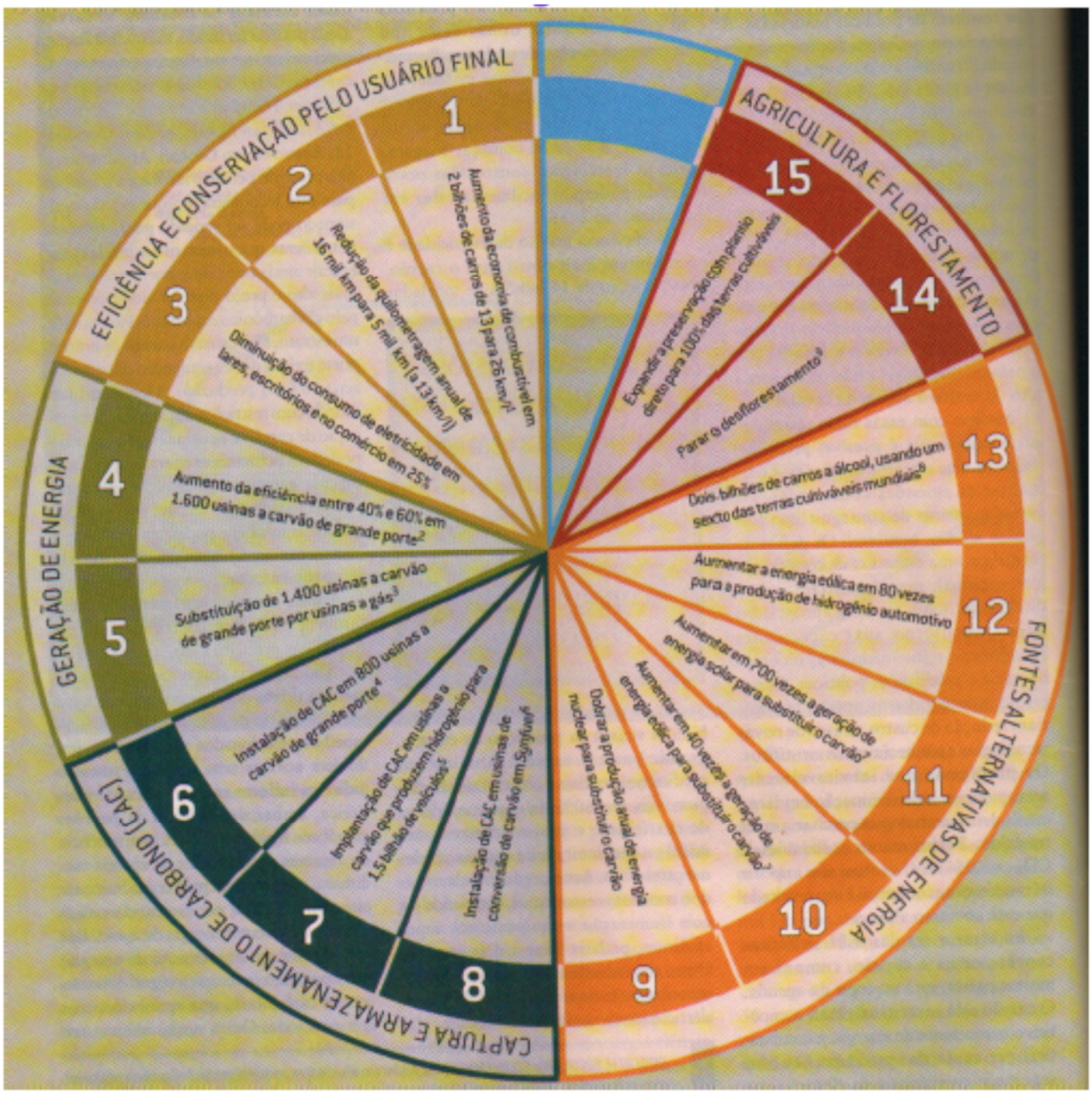


Figura 2.14 Opções para redução de 25 bilhões de toneladas de CO_2 nos próximos 50 anos (Socolow e Pacala,2006).

CAPITULO 3 – METODOLOGIA

Este capítulo é subdividido em duas partes. Na primeira serão mostradas as premissas que foram utilizadas para levantamento dos dados de campo. Na segunda, poderão ser visualizadas as principais equações utilizadas para quantificar as perdas de energia pelas paredes dos fornos de pirólise.

3.1 Levantamento dos dados de Campo

Para quantificar as perdas de energia para o ambiente foram realizadas medições de temperaturas das paredes da zona de radiação de dois fornos de mesma tecnologia. São fornos que entraram em operação em 1978 e foram fabricados pela ABB Lummus Global, atualmente CBI Lummus. Os refratários utilizados nas paredes da radiação desses dois fornos são módulos de fibra cerâmica. Na Figura 3.2 está apresentada uma ilustração dos pontos de medição das temperaturas das paredes da zona de radiação dos fornos analisados. Foram medidas as temperaturas das paredes Norte, Sul, Leste e Oeste excluindo a caixa dos queimadores. O topo da radiação não foi medido, pois existem muitas interferências que impactam na medição (tubulação, zonas não planas etc.). Entretanto, para o cálculo das perdas esta zona será considerada utilizando as informações mais próximas do topo. Não foi contemplada neste trabalho a avaliação da zona de convecção por ser uma região de menores temperaturas, variando de 150°C no topo da convecção a 700°C no primeiro banco acima do *cross over*, enquanto a zona de radiação opera com 1.200 °C. Além disso, o acesso do local é congestionado e limitado (são fornos "*back to back*").

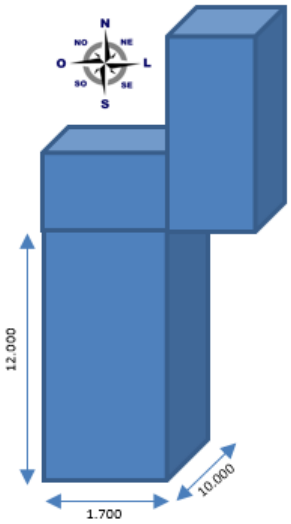


Figura 3.1 Dimensões do forno em milímetros.

Paredes Leste e Oeste

5º Plataforma Área 1	**5º Plataforma Área 2**	**5º Plataforma Área 3**
4º Plataforma Área 1	**4º Plataforma Área 2**	**4º Plataforma Área 3**
3º Plataforma Área 1	**3º Plataforma Área 2**	**3º Plataforma Área 3**
2º Plataforma Área 1	**2º Plataforma Área 2**	**2º Plataforma Área 3**
1º Plataforma Área 1	**1º Plataforma Área 2**	**1º Plataforma Área 3**

Paredes Norte e Sul

5º Plataforma Área 1	**5º Plataforma Área 2**
4º Plataforma Área 1	**4º Plataforma Área 2**
3º Plataforma Área 1	**3º Plataforma Área 2**
2º Plataforma Área 1	**2º Plataforma Área 2**
1º Plataforma Área 1	**1º Plataforma Área 2**

Figura 3.2 Representação dos pontos de medição das temperaturas das paredes do forno**.**

Para medição das temperaturas de parede dos pontos citados na Figura 3.2, foi utilizado um equipamento de termovisão conhecido como câmera de termografia. Todo corpo seja ele inanimado ou animado, que esteja acima de 0 Kelvin (-273º C), emite uma energia de sua superfície. Esta energia se dá devido à movimentação dos átomos e moléculas da superfície dos objetos. A energia emitida se propaga através de ondas eletromagnéticas pelo ar ou por qualquer outro meio de condução. A quantidade de energia está relacionada diretamente com sua temperatura.

O infravermelho é uma forma de radiação eletromagnética assim como as ondas de rádio, microondas, raios ultravioletas, luz visível, raios-X, e raios gama. A banda do comprimento de onda dos raios infravermelhos está entre 0,78 e 1000µm (INCROPERA e DEWITT, 1996).

Uma câmera infravermelha de termografia é um dispositivo que detecta energia infravermelha (calor), converte em sinal eletrônico produzindo imagens e executando cálculos de temperatura. O calor detectado por uma câmera termográfica pode ser quantificado ou medido de forma muito precisa, não apenas monitorando o comportamento térmico, mas também identificando e avaliando a gravidade dos problemas de aquecimentos. Inovações recentes tais como, tecnologia de detectores, imagem visual integrada, funcionalidade automática e desenvolvimento de software, oferecem soluções mais produtivas para inspeções termográficas (FLIR, 2015).

A termografia é aplicada nas seguintes áreas:

- ✓ Manutenção Preditiva dos Sistemas Elétricos de empresas geradoras;
- ✓ Monitoramento de sistemas mecânicos como rolamentos e mancais, vazamentos de vapor;
- ✓ Análise de isolamento térmico e refratário;
- ✓ Monitoramento de Processo produtivo do vidro e do papel;
- ✓ Acompanhamento de performance de placas e circuitos eletrônicos;
- ✓ Pesquisas científicas de trocas térmicas;
- ✓ Medicina;
- ✓ Indústria Automotiva;
- ✓ Siderurgia

Figura 3.3 Câmera de termovisão ou termográfica.

A emissividade varia com a condição da superfície do objeto e também com a variação da temperatura e comprimento de onda. Em outras palavras, uma variação ou alteração em emissividade causará uma alteração nas indicações da câmera IR.

Uma variável importante a ser configurada na câmera de termovisão é a emissividade. Para determinar a emissividade real da zona de radiação do forno foi colocado um adesivo na parede de emissividade conhecida (ϵ = 0,97) e após 10 minutos foi lida a temperatura do elemento e a temperatura da parede adequando a emissividade até as medições de temperatura ficarem semelhantes. Para as condições das paredes dos fornos analisados a emissividade adequada foi de 0,95.

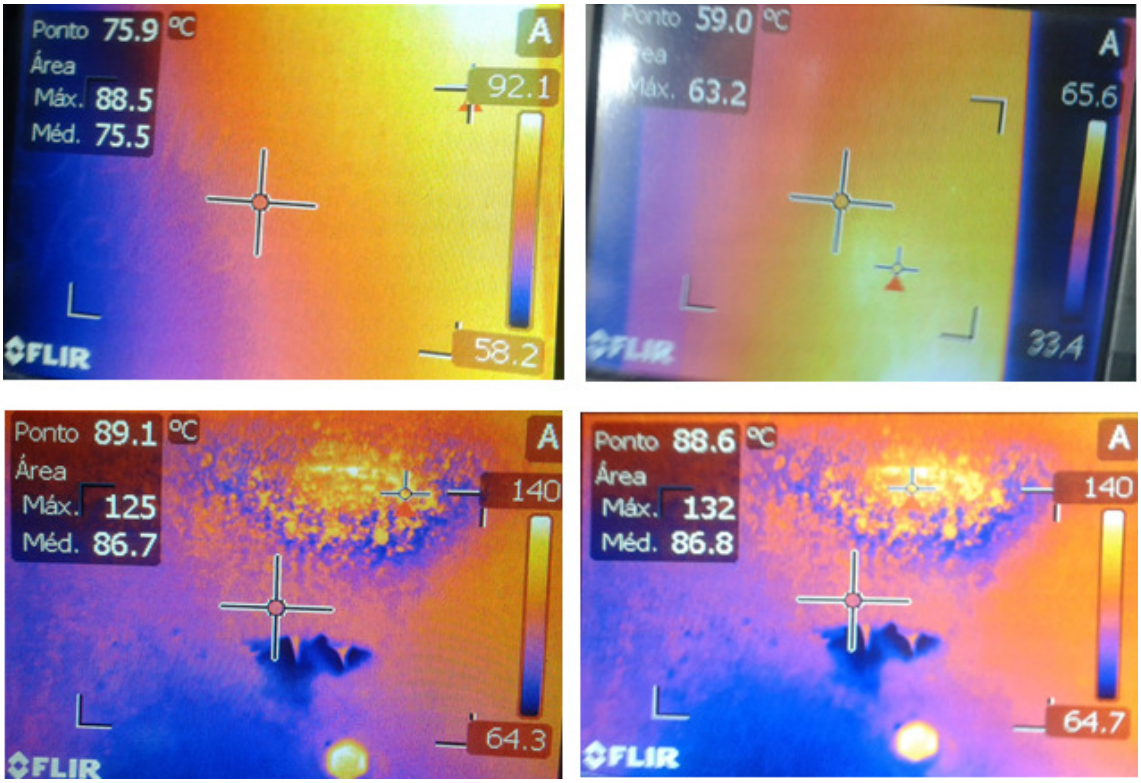


Figura 3.4 Medições de áreas pela termovisão em algumas regiões do forno.

Foi possível observar que em regiões onde as temperaturas de parede excederam os 100°C a tinta da parede do forno estava deteriorada conforme visualizado na figura a seguir. As janelas de inspeção apresentaram elevadas temperaturas.

Figura 3.5 Fotos da parede do forno em zonas com elevadas temperaturas.

Para medição da velocidade do vento e da temperatura do ambiente foi utilizado um anemômetro modelo GM 816 da Benetech que apresenta as especificações visualizadas nas tabelas a seguir.

Tabela 3.1 Especificação da medição de velocidade do vento.

Unidade	Range	Resolução	Exatidão
m/s	0 a 30	0,1	± 5%
ft/min	0 a 5860	19	
knots	0 a 55	0,2	
km/h	0 a 90	0,3	
mph	0 a 65	0,2	

Tabela 3.2 Especificação da medição de temperatura.

Unidade	Range	Resolução	Exatidão
°C	-10 a 45°C	0,2	± 2°C
°F	14°F a 113 °C	0,36	3,6 °F
Temperatura operação		-10 a + 45°C	
Umidade máxima permitida		< 90%	
Temperatura armazenamento		-40 a + 60°C	

As medições foram realizadas utilizando como referência a ASME PTC 4, ou seja, entre 2 a 5 ft das medições de temperatura.

Figura 3.6 Ilustração de um anemômetro digital.

A coleta de dados ocorreu com os fornos operando com as principais variáveis de processo próximas ao de projeto:

Carga: razão entre real e projeto = 0,96

COT: razão entre real e projeto = 0,99

DS/HC: razão entre real e projeto = 1,04

Considerado as características do clima de Camaçari que não apresenta grandes flutuações de temperatura ambiente nas diferentes estações, a coleta de dados em campo foi realizada na primavera durante o mês de outubro.

Nas Figuras 3.7 e 3.8 são apresentadas as medições de temperaturas média por área analisadas dos fornos de pirólise.

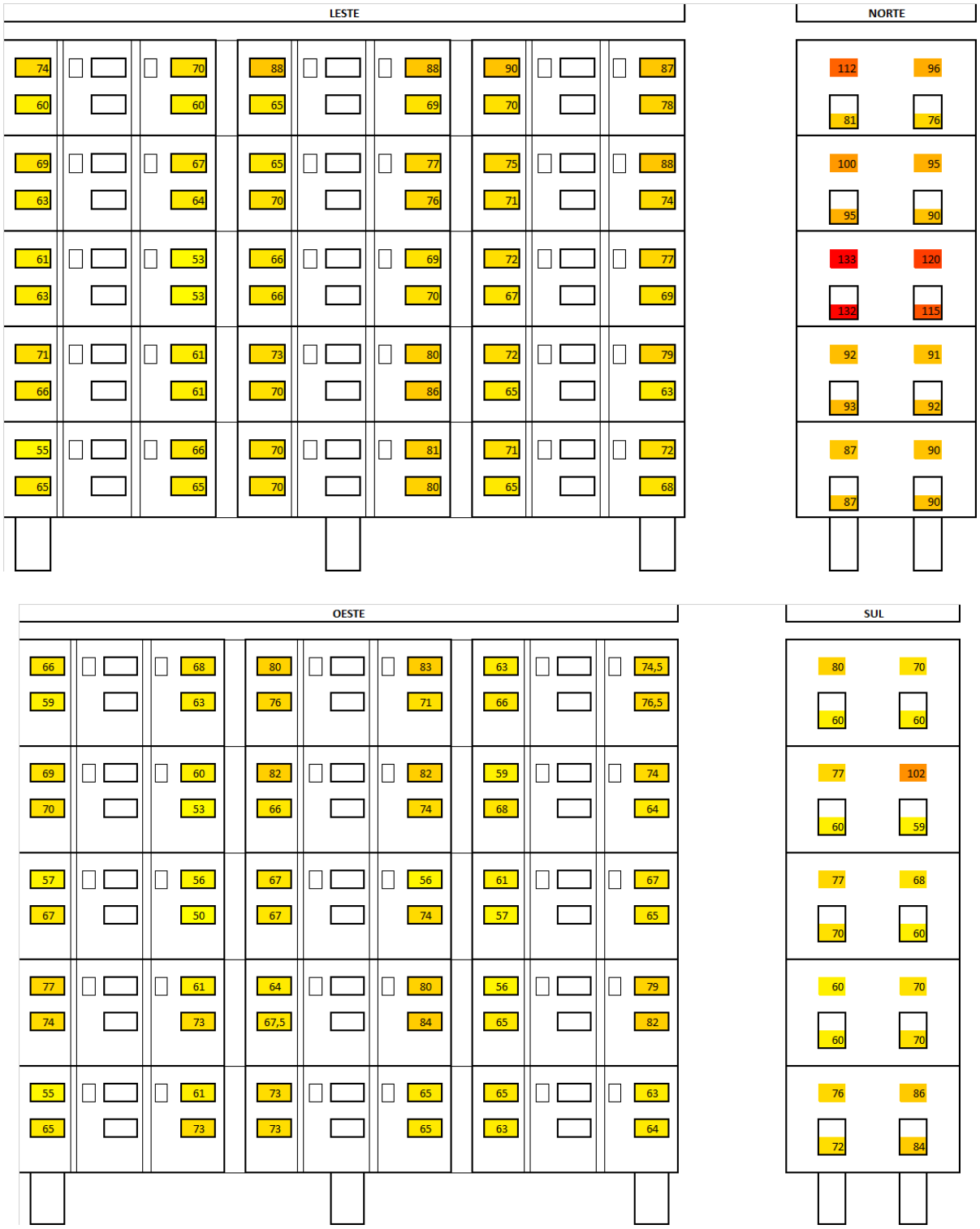


Figura 3.7 Medidas de temperatura nas paredes da radiação do Forno 1.

Figura 3.8 Medidas de temperatura nas paredes da radiação do Forno 2.

3.2 Cálculos Térmicos

Após levantamento dos dados de campo, foram calculadas as perdas de energia pelas paredes da zona de radiação dos fornos de pirólise, utilizando como referência a norma ASME PTC 4 de 1998.

A perda de energia pelas paredes é determinada indiretamente pela medida da temperatura da carcaça metálica do forno, temperatura ambiente e velocidade do vento próximo ao ponto de medição. Para esta avaliação não poderão ser considerados dados de projetos, nem da temperatura ambiente, nem da temperatura externa da parede do forno e velocidade do vento. Desta forma a perda de energia poderá ser calculada:

$$QrLSrc = Cl \sum(Hcaz + Hraz)\, Afz\, (TMnAfz - TMnAz) \tag{3.1}$$

$$Hcaz = o\ maior\ entre\ 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3}\ ou\ 0{,}35VAz^{4/5} \tag{3.2}$$

$$Hraz = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 \tag{3.3}$$

onde:

QrLSrc: Calor perdido pela superfície das paredes da caixa de radiação (Btu/h);

Cl: Conversão de unidade (1,0 para Btu/h ou 0,293 W h/Btu);

Hcaz: Coeficiente de transferência da convecção (Btu/ft^2/h/ºF);

Hraz: Coeficiente de transferência de calor por radiação (Btu/ft^2/h/ºF). Esta correlação foi desenvolvida para temperaturas ambientes de 25°C e uma emissividade de 0,80. Se as condições de temperatura ou emissividade forem diferentes destas, a incerteza deste cálculo pode chegar a 20%;

Afz: É uma secção z (ft^2) da área superficial externa da parede do forno. Se na área z analisada estiver algum componente não plano, ele deverá ser excluído da avaliação.

TMnAfz: Temperatura média (°F) da superfície da área z;

TMnAz: Temperatura média ambiente (°F) próximo ao local "z". Esta temperatura deve ser medida entre 2 a 5 ft da superfície do forno que será analisada;

TDi: (*TAfz* – *TAz*);

VAz: velocidade média do vento (ft/s) próximo a superfície a ser medida, tipicamente entre 2 a 5 ft;

Para o cálculo da perda de calor as temperaturas utilizadas foram a média das temperaturas medidas pela termovisão na região "z" analisada.

Para quantificar o potencial de energia perdido pelas paredes dos fornos de pirólise foi considerado uma temperatura de referência de 60°C, ou seja, qualquer valor acima disso apresenta um potencial de recuperação de energia na zona de radiação dos fornos utilizando isolamentos e refratários disponíveis no mercado. Esta temperatura é considerada uma referência por fabricantes de isolantes e licenciadoras de tecnologia.

CAPITULO 4 – RESULTADOS

Este capítulo é subdividido em três partes. Na primeira parte serão mostrados os resultados dos cálculos térmicos utilizando as medições realizadas em campo, utilizando as equações mostradas no capítulo anterior e realizando uma análise estatística dos dados. Na segunda, uma análise técnica e econômica será realizada mostrando a viabilidade da substituição dos refratários nos fornos. Na última parte será mostrado o ganho na redução de emissão de gases de efeito estufa com a implantação do trabalho.

4.1 Análise Energética

Através das equações visualizadas no Capítulo 3 foram calculadas as perdas de energia pelas paredes dos dois fornos e impacto na eficiência, considerando a carga térmica nominal do forno (37,9 MW). Inicialmente também foram calculadas as perdas de energia pela radiação caso os fornos apresentassem a temperatura média de parede de 60°C conforme visualizado na Tabela 4.1.

No caso em que a temperatura média da parede do forno for 60°C existe uma perda de 1.756 MJ/h que corresponde a 1,29% da eficiência do forno.

Com as temperaturas obtidas para o forno 1 (Tabela 4.2) foi calculado uma perda de 2.712 MJ/h ou 1,99% na eficiência do forno.

Com as temperaturas obtidas para o forno 2 (Tabela 4.3) foi calculado uma perda de 3.041 MJ/h ou 2,23% na eficiência do forno.

Conforme visualizado pelos resultados podemos observar que um aumento de apenas 10°C na temperatura média da parede do forno provoca um impacto relevante na eficiência do forno e, portanto, no custo variável do mesmo. Considerando que um *cracker* geralmente é composto de quatro a dez fornos de pirólise o impacto energético pode ser muito maior. Por exemplo, considerando que duas unidades de *steam cracking,* com vinte e dois fornos (como é o caso da planta de Camaçari) apresente uma ineficiência de 0,5% acima do caso de referência (60°C) isso pode significar um aumento no consumo energético de 184.241 GJ/ano, o que corresponde, ao consumo anual de 7.170 brasileiros (BEN, 2013).

Tabela 4.1 Perda de calor pela radiação do forno com temperatura de parede de referência de 60°C.

Forno 1																		
TMnAz (°F)	Hcaz Leste (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Oeste (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Norte (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Sul (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Topo (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Leste (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Oeste (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Norte (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Sul (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Topo (Btu/ft2/h/ºF)	QrLSrc Leste (Btu/h)	QrLSrc Oeste (Btu/h)	QrLSrc Norte (Btu/h)	QrLSrc Sul (Btu/h)	QrLSrc Topo (Btu/h)	QrLSrc Total (Btu/h)	QrLSrc Total (MJ/h)	Perda (%)
95	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659		1.656.483	1.756	1,46%
	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
95	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
95	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
95	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71	0,71	0,71		0,96	0,96	0,96	0,96		4.607	4.607	1.659	1.659				
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
95	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	4.607	4.607	1.659	1.659	1.659			
	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	4.607	4.607	1.659	1.659	1.659			
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
	0,71	0,71				0,96	0,96				4.607	4.607						
95	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	11,52	11,52	7,68	7,68	7,68	**674.189**	**674.189**	**83.275**	**83.275**	**70.778**			

Tabela 4.2 Perda de calor pela radiação do forno1.

Forno 1																		
TMnAz (°F)	Hcaz Leste (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Oeste (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Norte (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Sul (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Topo (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Leste (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Oeste (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Norte (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Sul (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Topo (Btu/ft2/h/ºF)	QrLSrc Leste (Btu/h)	QrLSrc Oeste (Btu/h)	QrLSrc Norte (Btu/h)	QrLSrc Sul (Btu/h)	QrLSrc Topo (Btu/h)	QrLSrc Total (Btu/h)	QrLSrc Total (MJ/h)	Perda (%)
95	0,71	0,71	0,91	0,83		0,96	0,96	1,10	1,03		4.607	4.607	4.137	2.870		2.558.133	2.712	1,99%
	0,78	0,80	0,93	0,90		1,00	1,01	1,11	1,08		6.473	6.963	4.448	3.934				
	0,83	0,76				1,03	0,98				7.971	5.755						
	0,80	0,75				1,01	0,98				6.963	5.521						
95	0,78	0,84	0,94	0,71		1,00	1,04	1,12	0,96		6.595	8.488	4.713	1.659				
	0,76	0,76	0,93	0,80		0,99	0,99	1,12	1,01		5.992	5.992	4.607	2.507				
	0,84	0,80				1,04	1,01				8.488	7.212						
	0,80	0,87				1,01	1,06				7.212	9.549						
95	0,73	0,73	1,12	0,83		0,97	0,97	1,36	1,03		5.059	5.059	9.672	2.870				
	0,71	0,71	1,06	0,75		0,96	0,96	1,27	0,98		4.607	4.607	7.687	1.988				
	0,80	0,73				1,01	0,97				6.963	5.059						
	0,82	0,76				1,02	0,99				7.715	5.992						
95	0,76	0,80	0,97	0,78		0,99	1,01	1,16	1,00		5.992	6.963	5.312	2.331				
	0,77	0,76	0,94	0,87		0,99	0,98	1,13	1,06		6.231	5.755	4.766	3.438				
	0,83	0,80				1,03	1,01				8.228	7.212						
	0,87	0,79				1,06	1,00				9.820	6.717						
95	0,77	0,74	0,96	0,80	0,83	0,99	0,97	1,15	1,01	1,03	6.231	5.289	5.201	2.507	2.893			
	0,80	0,81	0,90	0,76	0,82	1,01	1,02	1,09	0,98	1,03	7.212	7.462	4.035	2.072	2.824			
	0,86	0,80				1,05	1,01				9.280	7.212						
	0,88	0,84				1,07	1,04				10.368	8.358						
95	0,80	0,78	0,97	0,80	0,82	12,12	11,98	9,29	8,11	8,22	**1.008.137**	**926.344**	**258.958**	**127.362**	**118.666**			

Tabela 4.3 Perda de calor pela radiação do forno 2.

Forno 2																		
TMnAz (°F)	Hcaz Leste (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Oeste (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Norte (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Sul (Btu/ft2/h/ºF)	Hcaz Topo (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Leste (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Oeste (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Norte (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Sul (Btu/ft2/h/ºF)	Hraz Topo (Btu/ft2/h/ºF)	QrLSrc Leste (Btu/h)	QrLSrc Oeste (Btu/h)	QrLSrc Norte (Btu/h)	QrLSrc Sul (Btu/h)	QrLSrc Topo (Btu/h)	QrLSrc Total (Btu/h)	QrLSrc Total (MJ/h)	Perda (%)
95	0,87	0,95	0,77	0,80		1,06	1,13	0,99	1,01		9.820	13.536	2.244	2.507		2.868.769	3.041	2,17%
	0,67	0,84	0,82	0,76		0,94	1,04	1,02	0,98		3.733	8.488	2.778	2.072				
	0,76	0,83				0,99	1,03				5.992	8.228						
	0,86	0,85				1,05	1,04				9.280	8.750						
95	0,84	1,00	0,87	0,92		1,04	1,19	1,06	1,11		8.488	16.963	3.536	4.344				
	0,79	0,88	0,92	0,76		1,00	1,07	1,11	0,99		6.717	10.368	4.344	2.158				
	0,76	0,84				0,98	1,04				5.755	8.488						
	0,76	0,85				0,99	1,04				5.992	8.750						
95	0,82	0,92	0,94	0,92		1,02	1,11	1,13	1,11		7.715	12.064	4.766	4.344				
	0,80	0,93	0,97	0,86		1,01	1,11	1,16	1,05		6.963	12.354	5.423	3.342				
	0,80	0,93				1,01	1,11				7.212	12.354						
	0,76	0,98				0,98	1,17				5.755	15.373						
95	0,75	0,81	0,91	0,90		0,98	1,02	1,10	1,08		5.521	7.462	4.137	3.934				
	0,76	0,90	0,87	0,76		0,98	1,09	1,06	0,98		5.755	11.206	3.438	2.072				
	0,74	0,87				0,97	1,06				5.289	9.549						
	0,78	0,87				1,00	1,06				6.473	9.820						
95	0,80	0,76	0,80	0,71	0,77	1,01	0,98	1,01	0,96	0,99	7.212	5.755	2.597	1.659	2.222			
	0,86	0,73	0,80	0,77	0,79	1,05	0,97	1,01	0,99	1,01	9.280	5.059	2.552	2.244	2.474			
	0,87	0,74				1,06	0,97				9.820	5.289						
	0,83	0,77				1,03	0,99				8.099	6.231						
95	**0,79**	**0,86**	**0,87**	**0,82**	**0,78**	**12,11**	**12,75**	**8,52**	**8,21**	**7,99**	**999.722**	**1.362.711**	**171.707**	**138.041**	**98.294**			

Através dos dados coletados foi possível realizar uma análise estatística das temperaturas utilizando o *software* comercial Minitab e os principais resultados podem ser visualizados na Figura 4.1.

A média da temperatura do forno 1 foi de 74,6 °C com desvio padrão de 13,7 °C. A distribuição dos dados foi não normal. Desta forma foram testadas diferentes distribuições e a que melhor representou a amostra foi a distribuição 2 parâmetros exponencial. O nível sigma do conjunto de dados considerando o limite superior de 60°C foi de – 1,85.

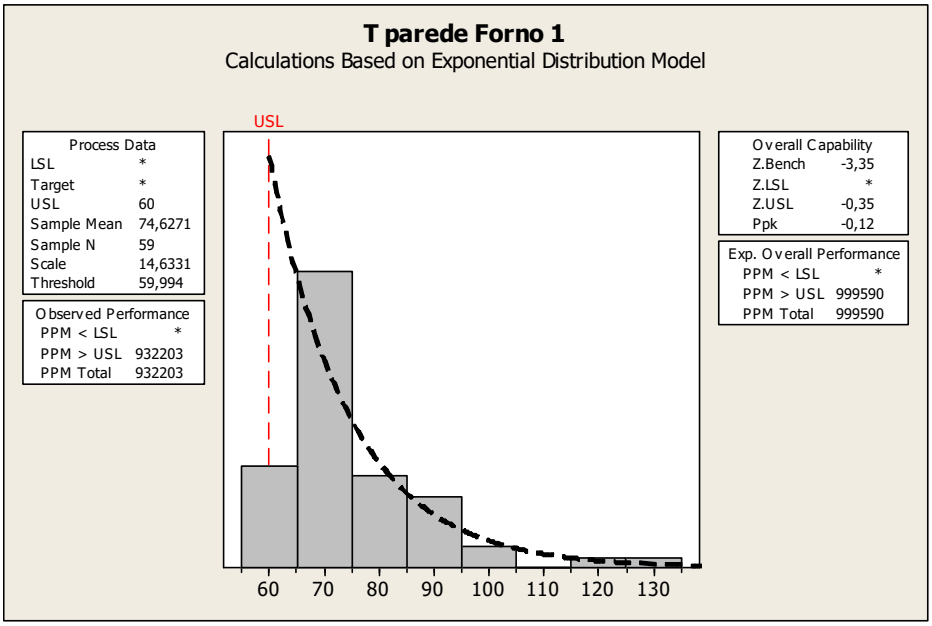
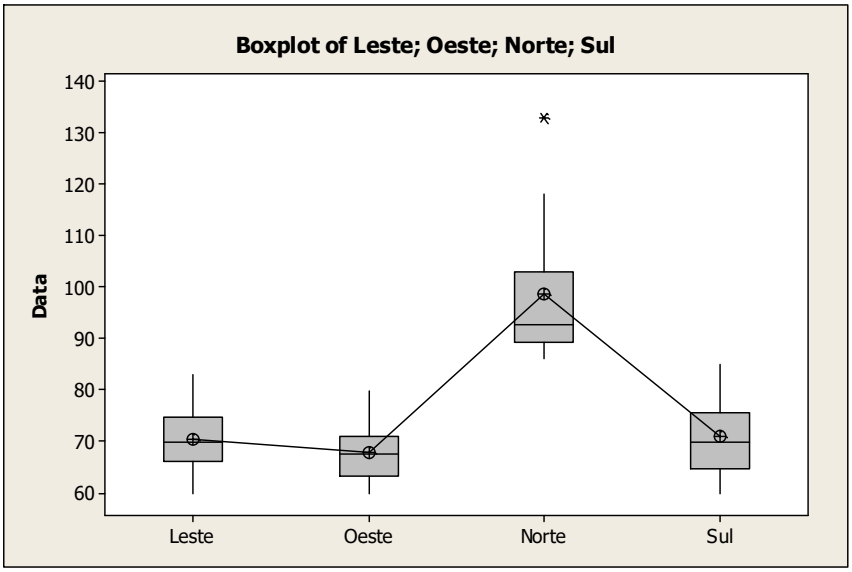


Figura 4.1 Histograma das temperaturas de parede do Forno 1.

Outro teste estatístico realizado foi o teste de hipótese ANOVA. Este teste tem por objetivo, avaliar se um conjunto de dados pode ser considerado diferente estatisticamente com 95% de confiança. Como resultado do teste foi possível afirmar que estatisticamente as temperaturas da parede Norte do forno 1 foram mais elevadas que as temperaturas das outras paredes conforme a figura 4.2.




```
                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level   N   Mean  StDev  ------+---------+---------+---------+---
Leste  20  70,40   6,39     (--*---)
Oeste  20  67,95   5,58  (---*---)
Norte  10  98,60  15,09                              (-----*----)
Sul    10  71,00   7,54    (----*----)
                          ------+---------+---------+---------+---
                               70        80        90       100
```

Figura 4.2 Teste de hipótese das medidas de temperatura do Forno 1.

De forma semelhante foi realizada a análise do forno 2. A média da temperatura do forno 2 foi de 76,0 °C com desvio padrão de 10,95 °C. A distribuição dos dados foi não normal. Desta forma foram testadas diferentes distribuições e a que melhor representou a amostra foi a distribuição Weibull com 3 parâmetros. O nível sigma do conjunto de dados considerando o limite superior de 60°C foi de – 0,21.

Com o resultado do teste ANOVA foi possível afirmar que estatisticamente as temperaturas da parede Leste apresentam temperaturas menores que as paredes Oeste e Norte. Diferentemente do forno 1 não houve nenhuma parede que se destacasse por apresentar uma elevada temperatura comparado com as outras. Entretanto o forno 2 apresentou uma média de temperatura mais elevada o que justifica uma maior perda de energia comparado ao forno 1.

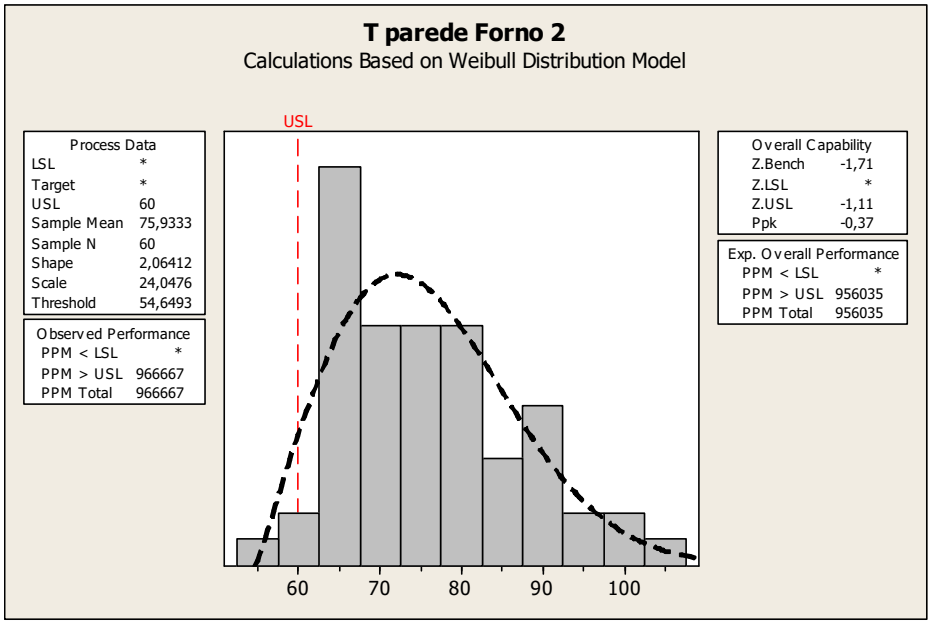
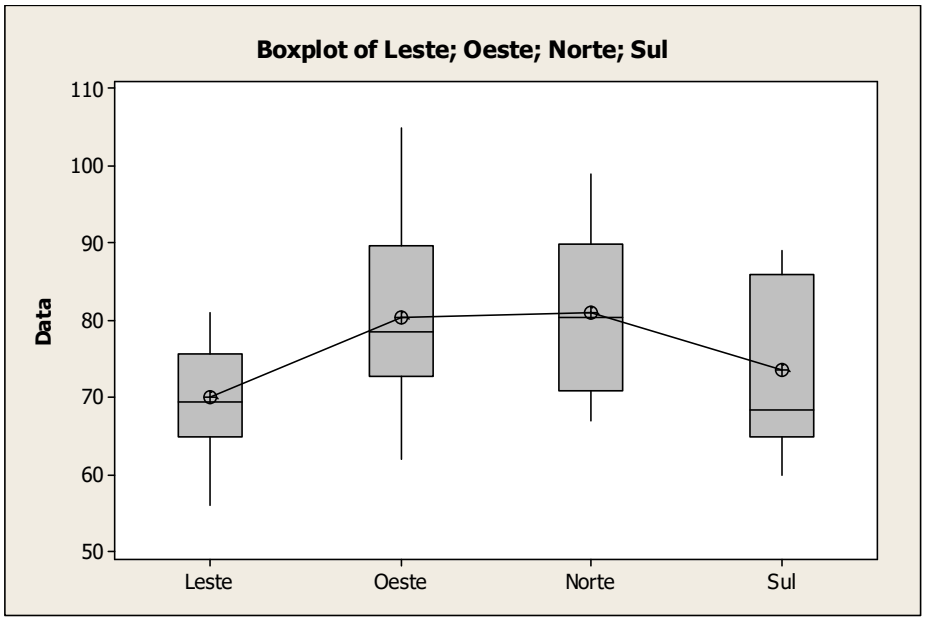


Figura 4.3 Histograma das temperaturas de parede do Forno 2.



Level	N	Mean	StDev
Leste	20	70,13	6,74
Oeste	20	80,40	11,90
Norte	10	81,05	10,75
Sul	10	73,50	10,96

```
Individual 95% CIs For Mean Based on
Pooled StDev
  -+---------+---------+---------+--------
  (-------*------)
                    (-------*-------)
                  (-----------*-----------)
     (----------*---------)
  -+---------+---------+---------+--------
66,0      72,0      78,0      84,0
```

Figura 4.4 Teste de hipótese das medidas de temperatura do Forno 2.

Outro resultado do trabalho foi a geração de mapas de calor para os dois fornos. Isso foi possível pois foi utilizada uma câmera termográfica e apesar de consideramos a temperatura média de cada região toda a área foi medida. O mapa de calor mostra de forma visual os principais resultados e análises estatísticas mostradas anteriormente.

Figura 4.5 Mapa térmico do forno 1.

Figura 4.6 Mapa térmico do forno 2.

4.2 Análise Econômica

Ao avaliar a substituição do refratário em um forno de pirólise dois pontos importantes precisam ser analisados:

1) **Aumento do custo variável**: A medida que o refratário se degrada ou perde suas características, aumenta a perda de energia pelas paredes, o que demanda maior consumo de combustível para atender a carga térmica necessária para a reação de craqueamento da matéria prima. Esse aumento de consumo do combustível ocasiona um incremento no custo variável da unidade do *steam cracking*;
2) **Custo Fixo da reposição**: A medida com que o refratário é substituído com maior frequência, menores serão as temperaturas nas superfícies do forno, entretanto maior será o custo fixo da unidade.

Desta forma, o grande desafio é encontrar o ponto ótimo entre estes dois custos, pois o objetivo final é reduzir o custo total.

Para determinar a temperatura ótima de substituição do refratário foi construída uma curva de aumento de custo variável em função da temperatura na parede, utilizando as equações descritas no Capítulo 3 e determinando a energia adicional perdida. A energia adicional calculada foi convertida em consumo de gás combustível utilizando o poder calorifico inferior (PCI) do mesmo. Para precificação do gás combustível foi utilizado como referência a tabela tarifária da Bahiagás, corrigindo proporcionalmente pelo poder calorifico de cada combustível ($m_{GC}\frac{PCI_{GC}}{PCI_{GN}}$), considerando um consumo industrial semanal de 245.001 m^3 a 420.000 m^3 conforme visualizado na Tabela 4.4.

Para o custo fixo de reposição do refratário (mão de obra e material) é importante considerar as seguintes atividades:

- Remoção do refratário/isolante;

- Aplicação do novo refratário/isolante. Para esta avaliação foi considerado o custo da fibra cerâmica por ser o material presente nos dois fornos avaliados neste trabalho.

- Aplicação de revestimento a depender do tipo de refratário;

- Remoção e colocação dos queimadores.

Maiores detalhes dos custos fixos podem ser visualizados na tabela do **Anexo II**.

Para esse estudo foi desconsiderado a degradação do refratário/isolante após substituição deste material.

É importante ressaltar que todos os custos (variável e fixo) foram calculados para um m^2 de área do forno.

Os fornos de pirólise durante a vida útil de sua serpentina (aproximadamente 6 anos) devem realizar paradas preventivas a cada 1,5 anos, para limpeza de TLEs, medição de carburização da serpentina entre outras atividades de manutenção e inspeção. Desta forma, pode-se desconsiderar os impactos de lucro cessante para esta avaliação pois a substituição dos refratários, quando viável, será implantada nessas paradas preventivas que já são contempladas no planejamento de produção da unidade.

Tabela 4.4 Tabela Tarifária Gás Natural para uso industrial (Bahiagás, 2015).

	Faixas de consumo semanal m³ *		Tarifa s/ impostos	Tarifa c/ impostos PIS/COFINS/ICMS
1 - Industrial	MIN	MAX	R$/m³	R$/m³
	1	105	2,0155	2,5594
	106	350	1,2640	1,6051
	351	1050	1,2004	1,5243
	1051	3500	1,1687	1,4841
	3501	7000	1,1469	1,4564
	7001	42000	1,1215	1,4241
	42001	84000	1,1085	1,4076
	84001	140000	1,0844	1,3770
	140001	245000	1,0721	1,3614
	245001	420000	1,0581	1,3436
	420001	2800000	1,0367	1,3164
	2800001	4900000	1,0247	1,3012
	4900001	7000000	1,0150	1,2889
	7000001	-	1,0076	1,2795

Na Figura 4.7 é possível visualizar os resultados encontrados na análise econômica da temperatura ótima de substituição do refratário. Na figura é possível observar três custos de manutenção. O custo de manutenção 1 é considerando que cada m^2 será recuperado a cada ano.

O custo de manutenção 2, considera a recuperação do refratário a cada três anos anualizado. Já o custo de manutenção 3, considera que a recuperação deste material será realizada somente a cada seis anos, igualmente anualizado. O motivo por gerar estas curvas é devido a possibilidade de recuperar o refratário danificado em paradas preventivas dos fornos que ocorrem geralmente entre um ano e seis anos de operação da serpentina.

A média das temperaturas das superfícies da radiação dos fornos 1 e 2 foram respectivamente 74,6°C e 76°C, ou seja, valores acima do valor de referência em 14,6°C e 16°C respectivamente. Considerando que ao substituir o refratário das áreas dos fornos 1 e 2 iremos reduzir a temperatura média do forno para este novo patamar, com três anos já é viável realizar a substituição destes refratários.

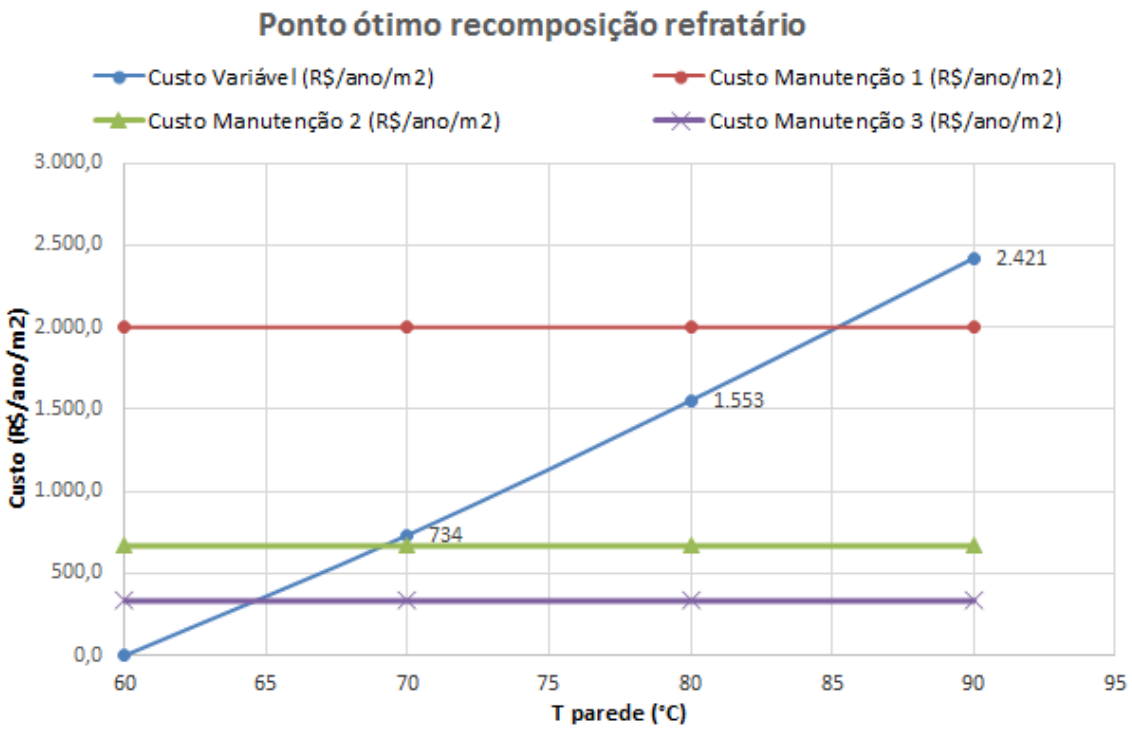


Figura 4.7 Temperatura ótima para substituição do refratário.

Na seção 4.1 foi possível identificar que os perfis de temperatura de parede, na superfície de radiação dos dois fornos, apresentam um elevado desvio padrão, ou seja, se o refratário de todo o forno for substituído não significa necessariamente que será alcançada a temperatura de referência que é 60°C. Isso é devido a diversos motivos como por exemplo a velocidade do vento que é diferente ou as linhas de correntes do gás exausto do forno que preferencialmente podem seguir um caminho em detrimento de outro etc. O elevado desvio

padrão das temperaturas de parede mostram que algumas ações podem reduzir estas diferenças como aumentar a frequência de substituição destes trechos ou avaliar mudar a espessura do refratário.

Outra alternativa para se avaliar o ponto ótimo de substituição do refratário é estruturar um *baseline* de perfis de temperatura de parede após uma recomposição completa do refratário e após intervalos de um, três e seis anos verificar o incremento de temperatura em cada região. A Figura 4.8 mostra qual o acréscimo de temperatura de parede em um m^2 em que a partir deste ponto é viável a recomposição do refratário. A lógica dos custos de manutenção 1,2 e 3 é a mesma utilizada na Figura 4.7.

Pelos resultados alcançados:

1) Se a temperatura de parede aumentar 5°C ou mais em seis anos, já é viável substituir o refratário;
2) Se a temperatura de parede aumentar 9°C ou mais em três anos, já é viável substituir o refratário;
3) Se a temperatura de parede aumentar 25°C ou mais em um ano, já é viável substituir o refratário.

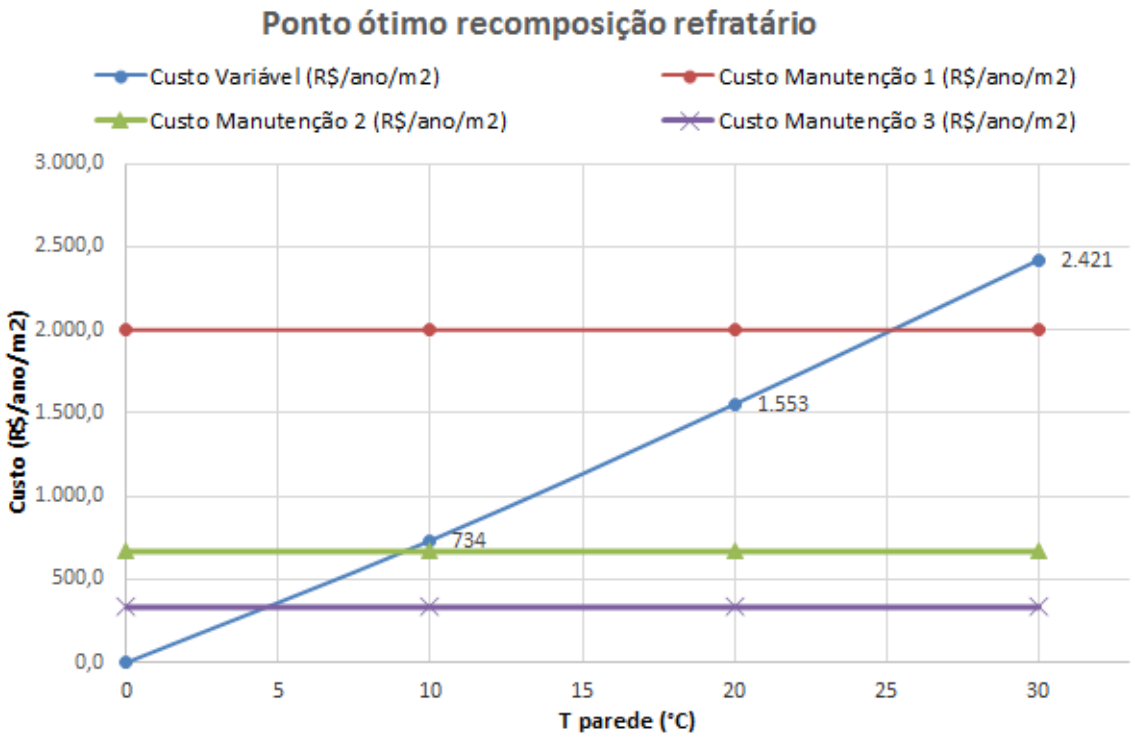


Figura 4.8 Temperatura ótima para substituição do refratário.

Com os resultados alcançados é possível estimar que, considerando que uma unidade de *steam cracking* com vinte e dois fornos apresente uma perda pelas paredes semelhante à média das perdas energéticas dos fornos 1 e 2, isto significa que caso seja recuperado o refratário, existe um potencial de ganho financeiro anual da ordem de R$ 4.953.553.

4.3 Análise Ambiental

Para quantificar os impactos nas emissões de CO_2 nos fornos de pirólise devido à perda pelas paredes foi utilizado um software comercial Acomb5 (IPT).

As principais equações utilizadas pelo software poderão ser visualizadas a seguir:

$$\lambda = \frac{massa\ de\ ar\ utilizado}{massa\ de\ ar\ estequiometrico} \tag{4.1}$$

Com esta definição, tem-se, $\lambda = 1$ para combustão estequiométrica, $\lambda > 1$ para combustão com excesso de ar e $\lambda < 1$ para combustão com falta de ar (incompleta).

Considerando que somente o teor de O_2 no gás exausto foi medido (fO_2), para calcular o valor de λ é necessário levantar a composição do combustível como equação 4.2:

$$\lambda = \frac{fO_2 * \left\{22{,}4 * \left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32}\right] - 0{,}8 * n - 0{,}7 * s - 1{,}87 * c\right\} - 22{,}4 * \left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + (s-o)/32\right]}{\left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + (s-o)/32\right] * (106{,}62 * fO_2 - 22{,}4)} \tag{4.2}$$

Desta forma, para calcular o impacto das emissões pelas perdas adicionais de calor pelas paredes da radiação dos fornos, primeiramente foram coletadas amostras do gás combustível queimado e inseridos no software conforme figura a seguir.

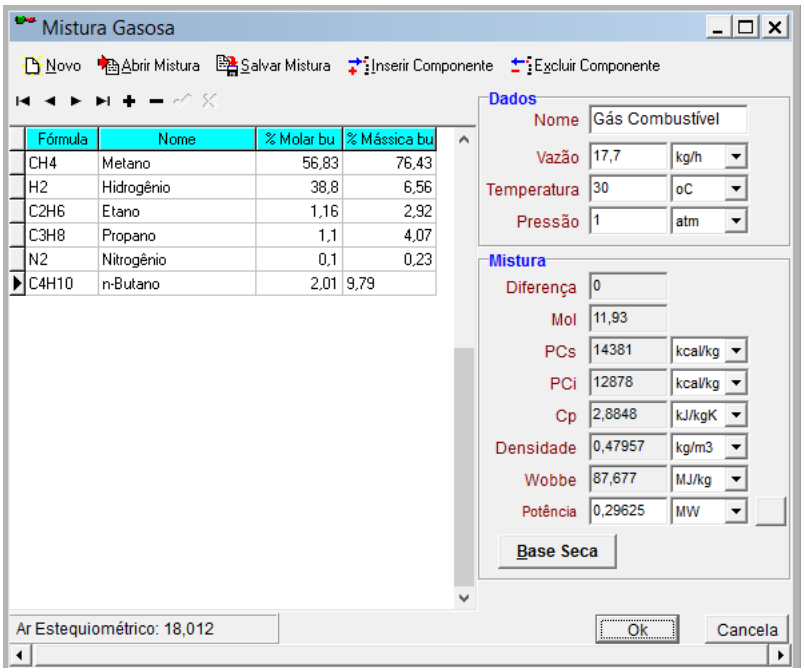


Figura 4.9 Composição do Gás Combustível que alimentam os fornos de pirólise.

Após o preenchimento da composição do gás combustível foi informada a vazão adicional que cada forno irá consumir, por apresentar temperaturas de parede acima de 60°C, considerando o PCI do gás combustível informado que neste caso é 12.878 kcal/kg. Para as simulações foi considerado um excesso de ar de 15%, valor próximo do medido pelo analisador online do forno, localizado na região de *cross over*.

Com isso foi possível estimar a emissão de CO_2 adicional conforme visualizado nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. Nas três figuras a única diferença pela simulação é a vazão de gás combustível e, portanto, a vazão de gás exausto, pois nos três casos foi considerado um mesmo valor de excesso de ar.

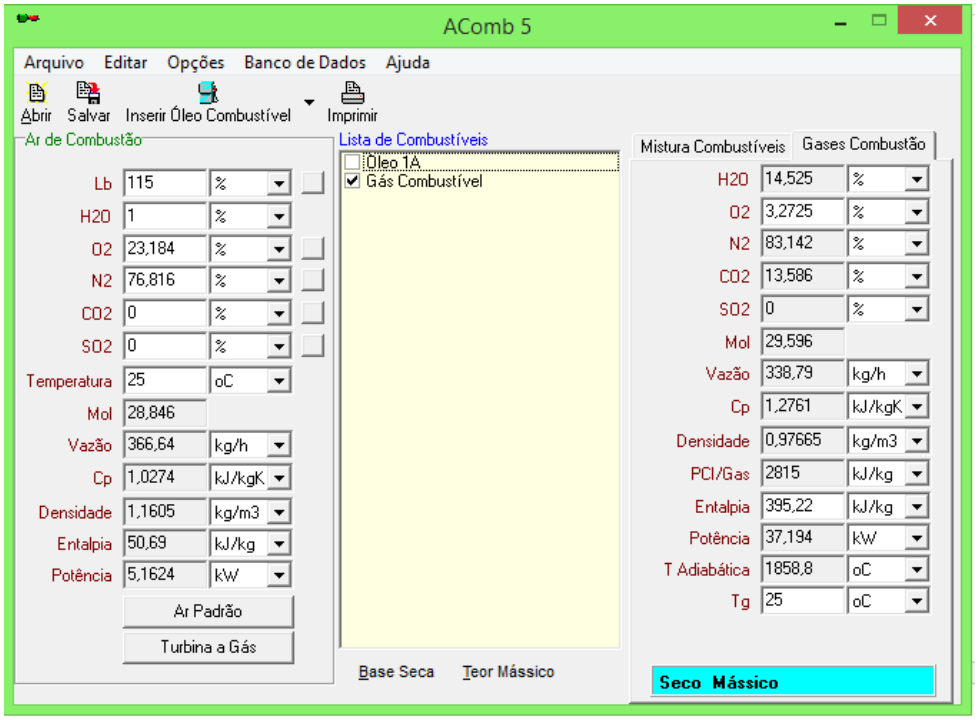


Figura 4.10 Resultados das emissões adicionais para o forno 1.

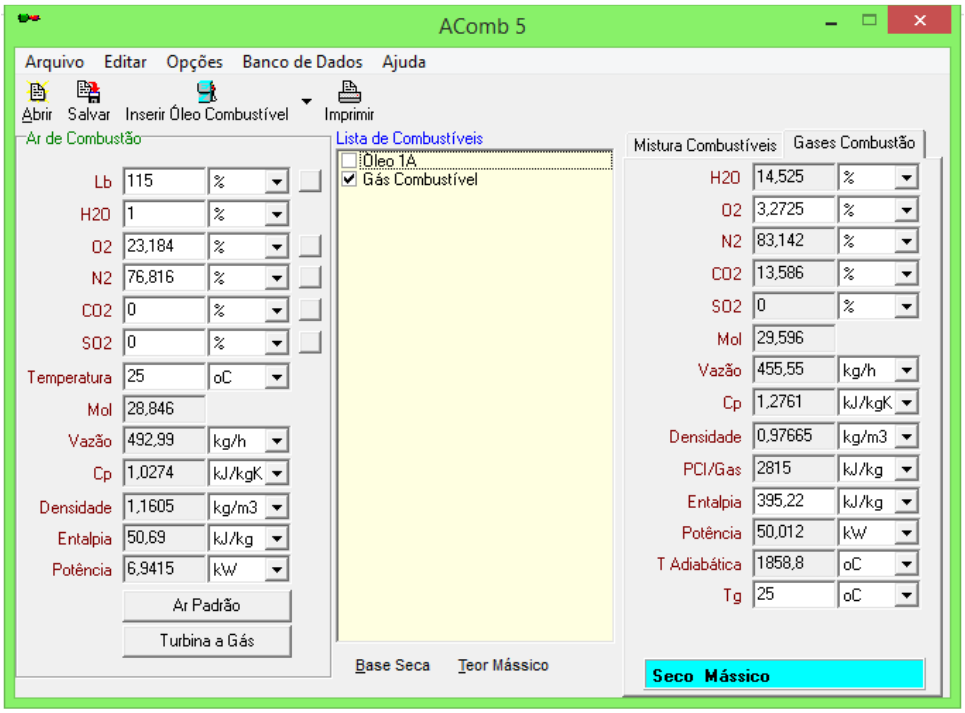


Figura 4.11 Resultados das emissões adicionais para o forno 2.

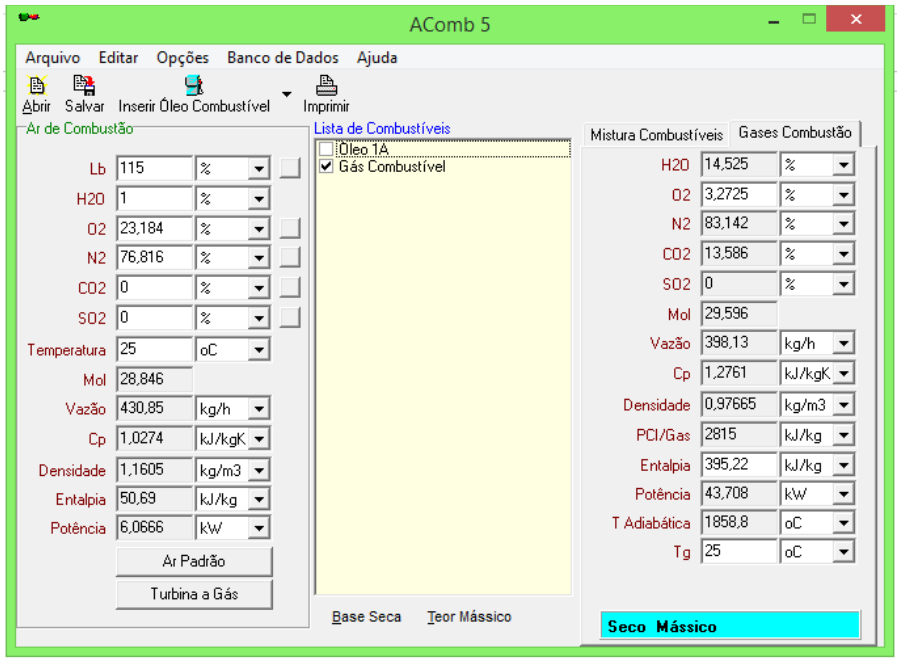


Figura 4.12 Resultados das emissões adicionais para a média dos fornos 1 e 2.

Considerando um *cracker* com vinte e dois fornos de pirólise apresentando uma maior perda pela superfície da radiação, equivalente à média dos fornos 1 e 2 analisados, poderíamos concluir que esta unidade tem um potencial de redução de 10.423 t/ano de CO_2, o que corresponde, a plantação de 62.544 árvores por ano (IBF, 2010).

CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo de *steam cracking* é intensivo em consumo de energia devido as suas reações serem extremamente endotérmicas. No Brasil esta é uma variável extremamente não competitiva, pois os custos dos combustíveis no país estão entre os mais caros do mundo. Estas reações ocorrem nos fornos de pirólise que geralmente são responsáveis por 70% a 80% do consumo energético de um *cracker*.

Apesar desse panorama adverso no país, iniciativas com o objetivo de aumento de eficiência energética podem contribuir para melhores resultados econômicos nos *crackers*. Dado este cenário, o trabalho teve por objetivo identificar oportunidades de redução do consumo energético dos fornos de pirólise, com foco na avaliação das perdas de energia pelas superfícies da radiação.

Frente aos resultados alcançados, foi possível constatar que os fornos de pirólise analisados apresentaram perdas de energia pela radiação acima dos valores ótimos levantados pela literatura. Através das análises estatísticas realizadas, foi possível identificar que existe um elevado desvio padrão entre as temperaturas de parede do forno, ou seja, um monitoramento completo, por termografia, da carcaça metálica do forno é fundamental para encontrar as regiões de maiores perdas energéticas.

Com as temperaturas de parede dos dois fornos, foi possível calcular as perdas de energia pelas superfícies da radiação e quantificar o impacto econômico provocado por esta ineficiência, que para um *cracker* com vinte e dois fornos, pode ser maior que 4,9 milhões de reais por ano. Um aumento de apenas 10°C na temperatura média da parede do forno provoca um impacto relevante na eficiência do mesmo e, portanto, no custo variável da unidade.

Além disso, é preciso avaliar os custos fixos de recomposição dos refratários para garantir qual o melhor intervalo para substituição destes materiais, que garantam o menor custo total (custo fixo + custo variável) desta atividade. Pelos fornos analisados, pode-se concluir que a partir do terceiro ano já é viável recompor os refratários que estão degradados ocasionando perda acima de 9°C na superfície de radiação do equipamento.

Esta conclusão está fortemente correlacionada com o custo do combustível e o custo fixo de reposição do refratário.

Com a realização do trabalho foi possível perceber a importância de monitorar, em um determinado intervalo de tempo, a evolução do aumento de temperatura na superfície de radiação de cada forno para planejar adequadamente o escopo de recomposição de refratário.

O presente trabalho teve, em última análise, a avaliação ambiental do impacto das emissões de CO_2 adicionais, devido ao aumento de ineficiência dos fornos de pirólise. Esta avaliação mostra que iniciativas de redução do consumo de energia de indústrias de grande porte contribuem para redução da emissão de gases de efeito estufa e por consequência além de proporcionar ganhos financeiros, promovem ganhos ambientais significativos. Este estudo revelou um potencial de redução de emissões de até 10.423 t/ano de CO_2 para uma unidade semelhante a planta localizada no Polo Industrial de Camaçari.

Como sugestões para trabalhos futuros, semelhante ao que foi realizado, recomenda-se:

1. Comparar os resultados obtidos neste trabalho, onde o tipo de refratário foi fibra cerâmica, com fornos de pirólise que utilizam outro tipo de refratário;
2. Conforme citado no trabalho utilizando como referência a norma ASME, o valor da emissividade impacta na incerteza das equações empíricas que foram utilizadas nesta avaliação. Desta forma, como trabalho futuro, seria interessante desenvolver equações, para quantificar as perdas pelas superfícies, para diferentes valores de emissividade;
3. Os fornos analisados utilizam como refratário módulos de fibras cerâmica. Algumas referências citam que estes módulos apresentam muitas vantagens, entre elas, a rápida substituição. Entretanto este tipo de refratário tem uma desvantagem que é o arraste de fibra da zona de radiação para as aletas das serpentinas da zona de convecção do forno. Desta forma uma contribuição importante para este tema seria avaliar o impacto da velocidade erosional do gás exausto, em um forno de pirólise que utilize fibra cerâmica na radiação e suas consequências na zona de convecção, isto é, a redução de transferência de calor nesta zona;
4. Conforme citado no capitulo 2.4.3 existem revestimentos de refratários que aumentam a eficiência da zona de radiação. Desta forma, sugere-se estudar o impacto da utilização de revestimentos com alta emissividade na eficiência da radiação de um forno de pirólise;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1- ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química. Anuário da Indústria Química Brasileira. Edição 2013.

2- ABIQUIM, disponível em http://www.abiquim.org.br/home/associacao-brasileira-da-industria-quimica, acessado em 22/03/2015.

3- AL-HAJ IBRAHIM H., *Fired Process Heaters*, Syria, 2010.

4- AREIA, F. Em busca do shale gas: Braskem reforça investimentos na América do Norte de olho no gás barato, Brasil Energia: Petróleo & Gás, ano 33, No. 405, pp. 57-58, agosto 2014.

5- ASME, *STD ASME PTC 4*, *American Society of Mechanical Engineers,* New York, 1998.

6- ASTM C1054-03, *Standard Practice for Pressing and Drying Refractory Plastic and Ramming Mix Specimens,* 2005.

7- ASTM C134-95, *Standard Test Methods for Size, Dimensional Measurements, and Bulk Density of Refractory Brick and Insulating,* 2005.

8- ASTM C201-93, *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories*, 2004.

9- ASTM C863-00, Standard Test Method for Evaluating Oxidation Resistance of Silicon Carbide Refractories at Elevated Temperatures, 2005.

10- ASTM C865-02, *Standard Practice for Firing Refractory Concrete Specimens,* 2005.

11- BAHIAGÁS, Tabela tarifária do Gás Natural, disponível em http://www.bahiagas.com.br/gas-natural/tabela-tarifaria/, acessado em 15/11/2015.

12- BARON R., Custo da energia inviabiliza novos investimentos no Brasil, disponível em http://www.andradecanellas.com.br/default.asp?id_materia=8853, acessado em 20/11/2015.

13- BASTOS, V.D. Desafios da petroquímica brasileira no cenário global. BNDES Setorial. Rio de Janeiro, No 29, pp. 322-350, 2009.

14- BEN, Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia, disponível em https://ben.epe.gov.br, acessado em 01/11/2015.

15- BENETECH, Manual do anemômetro, 2012.

16- BOWEN, C. P.; JONES, D.F. *Mega-olefin plant design: reality now*, Hydrocarbon Processing, pag. 71-80, April 2008.

17- BP, *Petrochemicals*, disponível em http://www.bp.com/en_us/bp-us/what-we-do/petrochemicals.html, acessado em 08/11/2015.

18- BRAGA W., Transmissão de Calor, Pioneira Thonsom Learning, São Paulo, 2004.

19- BRASKEM, Braskem Amplia Compromisso com Agenda Climática Internacional, disponível em http://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/Braskem-amplia-compromisso-com-agenda-climatica-internacional, acessado em 05/12/2015.

20- BRASKEM, Química e Plásticos, disponível em https://www.braskem.com.br, acessado em 20/07/2015.

21- BRASKEM, Relatório Anual 2013, disponível em http://rao2013.braskem.com/desempenho-economico-financeiro/desempenho-operacional/petroquimicos-basicos/, acessado em 14/08/2014.

22- BS EN 993-12, BS 1902-5.2, *Methods of test for dense shaped refractory products. Determination of pyrometric cone equivalent (refractoriness)*, 1997.

23- BS EN 993-4, BS 1902-3.9, *Methods of test for dense shaped refractory products. Determination of permeability to gases*, 1995.

24- BS EN 993-6, BS 1902-4.4, *Methods of test for dense shaped refractory products. Determination of modulus of rupture at ambient temperature*, 1995.

25- BS EN 993-8, *Methods of test for dense shaped refractory products. Determination of refractoriness-under-load*, 1997.

26- BS EN 993-9, *Methods of test for dense shaped refractory products. Determination of creep in compression*, 1997.

27- Bureau of Energy Efficiency, Ministry of Power, India. Energy *Efficiency in Thermal Utilities*. 2005.

28- CENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa, 4ª edição, McGraw-Hill, Bookman, São Paulo, 2012.

29- CHUCK CARR, Global Ethylene Outlook: One Product … Many Strategies, IHS, Houston, USA, 2013.

30- DRYDEN I., *The Efficient Use Of Energy*, 2ª Edição, Elsevier, pag. 394-412, 1982.

31- ELKINGTON J., *Cannibals with forks, the triple bottom line of 21st century business,* 1ª Edição, Capstone Publishing Ltd, Oxford, 1997.

32- FADIGAS C., O Futuro da Indústria Química, Encontro Anual da Indústria Química, ABIQUIM, 2013.

33- FLIR, Câmera termográfica disponível em http://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-1/camera-termografica-flir-b.htm, acessado em 10/10/2015.

34- FLIR, Câmeras de demostração, disponível em http://www.flir.com.br/instruments/display/?id=71104, acessado em 01/09/2015.

35- FROMENT GF, *Coke formation in the thermal cracking of hydrocarbons*, rev Chem Eng, 1990;6:295-328.

36- GILCHRIST J. D. Fuels, *Furnaces and Refractories*, Pergamon Press, 1977.

37- HOWARD R., *Ethylene and Polyethylene Global Overview*, 2011.

38- HYDROCARBON PROCESSING, *Petrochemical Processes 2005*, pag. 71, 2005.

39- IBF, Instituto Brasileiro de Florestas, disponível em http://www.ibflorestas.org.br/area-de-atuacao/compensacao-de-co2.html, acessado em 08/11/2015.

40- IHS, *World Analysis – Ethylene*, disponível em 1, acessado em 10/08/2014.

41- INCROPERA F. e DEWITT D., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4ª Edição, John Wiley & Sons, Inc., pag. 3-22, 1996.

42- INSPEÇÃO termográfica de componentes ou equipamentos de processo. São Paulo: Dublin. Disponível em: http://www.eletrodublin.com.br/inspecao-termografica-de-componentes-ou-equipamentos-de-processo.html, acesso em: 20/09/2015.

43- IPCC, disponível em http://www.ambientebrasil.com.br, acessado em 21/07/2015.

44- IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, disponível em http://www.ipcc.ch, acessado em 20/07/2015.

45- IPCC; *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*; 2005.

46- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, disponível em http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CETAE/cursos/7curso_de_combustao_industrial.htm, acessado em 08/11/2015.

47- KERN D., *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill *Internacional Book*, pag. 6-65, *New York*, 1950.

48- KOPINKE F., BACH G., New results about the mechanisms of TLE fouling in steam crackers. J Anal A Pyrol, cap. 9, 27, 325, 1993.

49- KTI, *Fired Heaters*, disponível em http://kticorp.com/FiredHeaters.htm, acessado em 08/11/2015.

50- KUMAR P, KUNZRU D., *Kinetics of coke deposition in naphtha*.

51- KUMAR P, *Modelling of naphtha pyrolysis*, Ind eng Chem Proc Des.

52- LAGE, E., PROCESSI, L., DE SOUZA, L., DAS DORES, P., GALLOPI, P. Gás não convencional: experiência americana e perspectivas para o Mercado brasileiro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n° 37, pag. 37-88, 2013.

53- LAUGIER, J. P. *Steam Cracking*, IFP School – Center for refining, petrochemicals & gas, March 2009.

54- LEITE L. F., Olefinas Leves: Tecnologia, Mercado e Aspectos Econômicos, Interciência, Rio de Janeiro, pag. 4; 21-59 (2013).

55- LEWANDOWSKI, S., *Global Ethylene: Regional pushes and pulls in the ethylene chain, World Petrochemical Conference, Houston*, Tx, USA, March 27, 2014.

56- LUMMUS, *Ethylene Furnace Training Course*, *Terminology*, Bloomfield, New Jersey, 2010.

57- MARCHIORI M., Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para Substituição de Isolamento Térmico em Fornos de Destilação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

58- MINITAB, disponível em http://www.minitab.com/pt-br/products/minitab/, acessado em 15/10/15.

59- MULLINGER P., *Industrial and Process Furnaces*, 1ª Edição, Elsevier, pag. 413-453, 2008.

60- MUSTAFA A.M., *Heat Balances of Furnaces Using Insulating Refractories*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1939.

61- NADOLNY K, PLICHTA J., *Comparative method of thermovision temperature measurement in single-pass internal cylindrical grinding*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2006.

62- OIL & GAS JOURNAL, *WoodMac: Global ethylene demand, production on the rise*, disponível em http://www.ogj.com/articles/2014/03/woodmac-global-ethylene-demand-production-on-the-rise.html, acessado em 16/08/2014.

63- PERRY, Robert; *Perry´s Chemical Engineers´ Handbook*, section 5, 1.999.

64- REFRATÍL, Refratários e Isolantes, disponível em http://www.refratil.com.br/produto/fibra-ceramica, acessado em 20/06/2015.

65- SANDRAMELLI S.M., *Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: A state-of-the-art review I: Thermal cracking review*, Elsevier, Iran, 2014.

66- SERRA S., Neutralização de CO_2, porque neutralizar, Plante Árvore, 2010. Disponível em http://www.plantearvore.com.br/home.html, acessado em 08/11/2015.

67- SRI *Consulting; Process Economics Report 237 – CO_2 Emissions Reduction*; Novembro, 2000.

68- TECHNIP *ethylene simulation software*, SPYRO, *Product overview*, www.technip.com/sites/default/files/technip/page/attachments/SPYRO_descr.pdf , acessado 01/06/2015.

69- THOME J. R. *Wolverine Tube Heat Transfer Data Book*, Wolverine Tube, São Francisco, 2015.

70- TRINKS W., Industrial Furnaces, 6ª Edição, John Wiley & Sons, pag. 190-195, 2004.

71- UA Department of Energy (US DOE), *Waste Heat reduction & Recovery for Improving Furnace efficiency, Productivity & Emissions Performance*, 2004.

72- UNEP, *Furnaces and Refractories, Energy Efficiency Guide for Industry in Asia,* 2006.

73- ZEMP R., Equipamentos Térmicos sem combustão, Curso de Engenharia dos Processos Petroquímicos, Braskem/FEQ/UNICAMP, 2008.

74- ZIMMERMANN, H., WALZ, R. *Ethylene in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH, Weinheim*, 2008.

ANEXOS

Anexo I – Exemplo de Cálculo Perda de Calor para o forno 1

O levantamento dos dados de campo para o forno 1 é visualizado na Tabela I:

Tabela I Temperaturas superfície radiação Forno 1.

Forno 1						
Plataformas	**Nº de medições**	**Leste °C**	**Oeste °C**	**Norte °C**	**Sul °C**	**Topo °C**
1	1	60	60	87	74	
	2	68	70	90	85	
	3	74	65			
	4	70	64			
2	1	69	76	92,5	60	
	2	66	66	91,5	70	
	3	76	71			
	4	71	80			
3	1	62	62	133	74	
	2	60	60	118	64	
	3	70	62			
	4	73	66			
4	1	66	70	98	68	
	2	67	65	93	80	
	3	75	71			
	4	81	69			
5	1	67	63	97	70	74
	2	71	72	86	65	74
	3	79	71			
	4	83	76			
média ^{0}C		**70**	**68**	**99**	**71**	**74**
média ^{0}F		159	154	209	160	165

Com as temperaturas medidas na superfície do forno e considerando TMnAz = 95 °F, foram calculados o *Hcaz* e o *Hraz* de cada ponto:

Cálculo do *Hcaz*

Lado Leste

1ª Plataforma

$$Hcaz_{11} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}71\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{12} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}78\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{13} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}83\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{14} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hcaz_{21} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}78\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{22} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{23} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}84\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{24} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hcaz_{31} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}73\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{32} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}71\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{33} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{34} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}82\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hcaz_{41} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{42} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}77\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{43} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}83\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{44} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}87\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hcaz_{51} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}77\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{52} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{53} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}86\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{54} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}88\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Lado Oeste

1ª Plataforma

$$Hcaz_{11} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}71\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{12} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{13} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{14} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}75\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hcaz_{21} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}84\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{22} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{23} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{24} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}87\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hcaz_{31} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}73\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{32} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}71\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{33} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}73\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{34} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hcaz_{41} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{42} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{43} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{44} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}79\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hcaz_{51} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}74\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{52} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}81\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{53} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{54} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}84\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Lado Norte

1ª Plataforma

$$Hcaz_{11} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}91\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{12} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}93\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hcaz_{21} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}94\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{22} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}93\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hcaz_{31} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 1{,}12\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{32} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 1{,}06\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hcaz_{41} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}97\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{42} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}94\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hcaz_{51} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}96\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{52} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}90\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Lado Sul

1ª Plataforma

$$Hcaz_{11} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}83\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{12} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}90\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hcaz_{21} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}71\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{22} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hcaz_{31} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}83\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{32} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}75\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hcaz_{41} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}78\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{42} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}87\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hcaz_{51} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}80\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{52} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}76\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Topo da radiação

$$Hcaz_{51} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}83\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hcaz_{52} = 0{,}2(TMnAfz - TMnAz)^{1/3} = 0{,}82\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Cálculo do *Hraz*

Lado Leste

1ª Plataforma

$$Hraz_{11} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}96\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{12} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}00\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{13} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}03\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{14} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hraz_{21} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}00\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{22} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}99\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{23} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}04\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{24} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37\ \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01\ \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hraz_{31} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}97 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{32} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}96 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{33} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{34} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}02 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hraz_{41} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}99 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{42} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}99 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{43} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}03 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{44} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}06 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hraz_{51} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}99 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{52} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{53} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}05 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{54} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}07 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Lado Oeste

1ª Plataforma

$$Hraz_{11} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}96 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{12} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{13} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}98 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{14} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}98 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hraz_{21} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}04 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{22} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}99 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{23} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{24} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}06 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hraz_{31} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}97 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{32} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}96 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{33} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}97 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{34} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}99 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hraz_{41} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{42} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}98 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{43} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{44} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}00 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hraz_{51} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}97 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{52} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}02 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{53} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{54} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}04 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Lado Norte

1ª Plataforma

$$Hraz_{11} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}10 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{12} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}11 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hraz_{21} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}12 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{22} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}12 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hraz_{31} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}36 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{32} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}27 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hraz_{41} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}16 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{42} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}13 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hraz_{51} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}15 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{52} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}09 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Lado Sul

1ª Plataforma

$$Hraz_{11} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}03 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{12} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}08 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

2ª Plataforma

$$Hraz_{21} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}96 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{22} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

3ª Plataforma

$$Hraz_{31} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}03 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{32} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}98 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

4ª Plataforma

$$Hraz_{41} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}00 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{42} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}06 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

5ª Plataforma

$$Hraz_{51} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}01 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{52} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 0{,}98 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Topo da radiação

$$Hraz_{51} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}03 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

$$Hraz_{52} = 0{,}847 + 2{,}367 \times 10^{-3}TDi + 2{,}94 \times 10^{-6}TDi^2 + 1{,}37 \times 10^{-9}TDi^3 = 1{,}03 \frac{Btu}{ft^2\ h\ °F}$$

Cálculo da perda de calor total pela superfície do forno (QrLSrc Total)

Com os coeficientes de transferência de calor por convecção (*Hcaz*) e radiação (*Hraz*) foi calculado o calor perdido pela superfície da radiação de cada região (Leste, Oeste, Norte, Sul, Topo e Fundo) conforme mostrado abaixo:

Leste

$$QrLSrc_{Leste} = Cl \sum(Hcaz + Hraz)\ Afz\ (TMnAfz - TMnAz) = 1.008.137 \text{ Btu/h}$$

Oeste

$$QrLSrc_{Oeste} = Cl \sum(Hcaz + Hraz)\ Afz\ (TMnAfz - TMnAz) = 926.344 \text{ Btu/h}$$

Norte

$$QrLSrc_{Norte} = Cl \sum(Hcaz + Hraz)\ Afz\ (TMnAfz - TMnAz) = 258.958 \text{ Btu/h}$$

Sul

$$QrLSrc_{Oeste} = Cl \sum(Hcaz + Hraz)\ Afz\ (TMnAfz - TMnAz) = 127.362 \text{ Btu/h}$$

Topo

$$QrLSrc_{Topo} = Cl \sum(Hcaz + Hraz)\ Afz\ (TMnAfz - TMnAz) = 118.666 \text{ Btu/h}$$

Perda de calor Total

$$QrLSrc_{Total} = \sum QrLSrc_i = 2.558.133\ Btu/h$$

Onde

QrLSrc: Calor perdido pela superfície da radiação (Btu/h);

Cl: Conversão de unidade (1,0 para Btu/h ou 0,293 W h/Btu);

Hcaz: Coeficiente de transferência da convecção por área (Btu/ft^2/h/ºF);

Hraz: Coeficiente de transferência de calor por radiação por área (Btu/ft^2/h/ºF). Esta correlação foi desenvolvida para temperaturas ambientes de 25°C e uma emissividade de 0,80. Se as condições de temperatura ou emissividade forem diferentes destas, a incerteza deste cálculo pode chegar a 20%;

Afz: É uma secção z (ft^2) da área superficial externa da parede do forno. Se na área z analisada estiver algum componente não plano, o mesmo não deverá ser avaliado.

TMnAfz: Temperatura média (°F) da superfície da área z;

TMnAz: Temperatura média ambiente (°F) próximo ao local "z". Esta temperatura deve ser medida entre 2 a 5 ft da superfície do forno que será analisada;

TDi: (*TAfz* – *TAz*);

Anexo II – Custo detalhado para recomposição do refratário por m^2

Atividades para recomposição do refratário	Custo Mão de Obra (R$/m2)	Custo Material (R$/m2)	Custo Total (R$/m2)
Remoção da manta de fibra cerâmica	22	-	22
Aplicação da manta de fibra cerâmica	74	100	174
Remoção de módulos de fibra cerâmica	52	-	52
Aplicação de módulos de fibra cerâmica	211	1.490	1.701
Aplicação de coating de fibra cerâmica	16	35	51
Custo Total (R$/m2)	**2.000**		