

JORGE LUIZ MOURA DOS SANTOS



**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE
UMA FORNALHA DE CRAQUEAMENTO DE 1,2
DICLOROETANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

CAMPINA GRANDE

2009

JORGE LUIZ MOURA DOS SANTOS

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE
UMA FORNALHA DE CRAQUEAMENTO DE 1,2
DICLOROETANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: *Simulação*

Orientador: Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Gonzaga Vasconcelos

CAMPINA GRANDE

2009

Santos, Jorge Luiz Moura dos

Modelagem e simulação para a eficiência em uma fornalha de 1,2 Dicloroetano.
Campina Grande, 2009. 120p.

Dissertação – Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Combustão 2. Fornalha 3. Eficiência 4. 1,2 Dicloroetano. I. Universidade Federal de Campina Grande. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química II-t

Esta página deve ser reservada à ata de defesa e termo de aprovação que serão fornecidos pela secretaria após a defesa da dissertação e efetuadas as correções solicitadas.

Dedicatória

Aos meus pais, irmãos, esposa e filhas

Agradecimentos

A Deus, meu pai celestial, fiel, todo poderoso e que me acompanha em todos os momentos da minha vida e a cada passo da minha caminhada.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional para que eu pudesse me tornar o que hoje sou.

A minha esposa, pela compreensão e incentivo para a realização deste projeto da minha vida.

Aos professores José Jailson e Luis Gonzaga pela recepção, orientação conduzida com seriedade e convicção e pela confiança em mim depositada.

A Braskem, em nome dos Gerentes e amigos Ivan Passos e Marcelo Cerqueira pelo uso das informações e oportunidade de crescimento.

Aos colegas e amigos Renato Figueiredo e José Milton pelo valioso apoio técnico ao desenvolvimento deste trabalho. Sem eles, este trabalho não seria possível.

Aos amigos, pelo incentivo e apoio de toda uma vida.

A todos os não citados que torceram pelo meu sucesso.

Sumário

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Gráficos.....	xii
Lista de Símbolos do programa.....	xiii
Resumo.....	xix
Abstract.....	xx
Capítulo 1	1
Introdução	
1.1. Introdução.....	1
1.2. Descrição do Processo.....	4
1.3. Justificativas.....	7
1.4. Proposta da Dissertação.....	8
1.5. Estrutura da Dissertação.....	9
Capítulo 2	10
Revisão Bibliográfica	
2.1. Combustão.....	10
2.1.1. Eficiência da Combustão.....	10
2.1.2. Excesso de ar.....	17
2.1.3. Combustão e Combustíveis.....	19
2.1.4. Poder Calorífico.....	20
2.2 Transferência de calor pelas paredes da fornalha.....	22
2.3 Diagrama de Sankey.....	25
2.4 Gás natural: Composição atual e do gás de Manati.....	26
2.5 Tipos de fornalhas.....	28
2.6 Elementos Constituintes de uma fornalha.....	29
2.6.1 Chaminé.....	29

2.6.2 Tiragem.....	29
2.6.3 Zona de convecção.....	30
2.6.4 Zona de radiação.....	30
2.6.5 Serpentinhas.....	30
2.6.6 Isolamento térmico.....	31
2.6.7 Damper.....	31
2.6.8 Câmara de combustão.....	31
2.6.9 O equipamento em estudo.....	32
2.6.10 Dados de projeto.....	32
2.7 Conclusão.....	33
Capítulo 3	34
Modelagem	
3.1. Hipóteses simplificadoras.....	34
3.2. Balanço de massa e Energia.....	35
3.2.1. Balanço de massa.....	36
3.2.2. Balanço de energia.....	40
3.3 Cálculo da carga térmica do gás natural.....	41
3.4 Cálculo da carga térmica do ar de combustão.....	43
3.5 Cálculo da carga térmica absorvida pela carga (EDC).....	44
3.6 Cálculo da carga térmica absorvida pela água.....	45
3.7 Cálculo da carga térmica dos gases de combustão.....	45
3.8 Cálculo da carga térmica perdida pelo combustível não queimado.....	46
3.9 Cálculo da carga térmica perdida pelas paredes da fornalha.....	46
3.9.1 Cálculo da parcela de calor devido à convecção.....	47
3.9.2 Cálculo da parcela de calor devido à radiação.....	49
3.10 Diagrama de blocos do programa.....	49
3.11 Modelo proposto X Dados de Projeto.....	51
3.12 Coleta de dados.....	53
3.13 Conclusão.....	55

Capítulo 4	57
Análise dos resultados	
4.1.Composição do gás natural.....	57
4.2.Análise das perdas térmicas da fornalha.....	59
4.3.Avaliação das parcelas de energia do sistema.....	60
4.4.Cálculo da eficiência pelos métodos direto e indireto.....	62
4.5.Avaliação da eficiência com a variação do excesso de ar.....	64
4.6.Avaliação do gás de Manati.....	65
Capítulo 5	66
Conclusão	
5.1.Conclusões.....	66
5.2.Sugestões para trabalhos futuros.....	68
Referências Bibliográficas.....	70
Apêndice A	72
Listagem do Programa	
A.1. Programa para cálculo da fornalha B.....	72
A.2. Saída do programa para o cálculo de valores de projeto da fornalha B.....	85
Apêndice B	93
Coleta de dados e resultados	
B.1. Quadro de coleta de dados.....	94
B.2. Quadro de resultados.....	98

Lista de Figuras

Figura 1.1	Diagrama esquemático da variação das perdas com o excesso de ar	3
Figura 1.2	Fluxograma simplificado da área de craqueamento de Dicloroetano	5
Figura 1.3	Fluxograma simplificado disposição de serpentinas	6
Figura 1.4	Fluxograma simplificado disposição dos Queimadores	6
Figura 1.5	Desenho Esquemático do Queimador	7
Figura 2.1	Desenho esquemático do fluxo de calor pelas paredes da fornalha	22
Figura 2.2	Exemplo de um Diagrama de Sankey	26
Figura 2.3	Fluxograma simplificado de Poços de Gás Associado	26
Figura 2.4	Fluxograma simplificado de Poços de Gás não associado	27
Figura 2.5	Chaminé da fornalha	29
Figura 2.6	Serpentinas da zona de radiação	30
Figura 3.1	Desenho esquemático do balanço de massa e energia	36
Figura 3.2	Fluxograma simplificado para avaliação da carga térmica perdida pelas paredes da fornalha.	46
Figura 3.3	Diagrama de blocos para o cálculo de eficiência da fornalha	50
Figura 3.4	Diagrama esquemático da coleta de dados.	54
Figura 3.5	Desenho esquemático gerado pela inspeção termográfica da fornalha	55
Figura 3.6	Diagrama de Sankey para as condições de Projeto da fornalha	56

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Valores usuais do coeficiente de excesso de ar	18
Tabela 2.2	Poder Calorífico inferior e Superior de alguns gases	21
Tabela 2.3	Composição típica do Gás natural	27
Tabela 2.4	Composição típica do Gás natural da bacia do recôncavo e de Manati	28
Tabela 2.5	Especificação do Gás natural segundo norma ANP N° 104	28
Tabela 2.6	Dados de Projeto da Fornalha	32
Tabela 3.1	Constantes A, B, C e D para o cálculo da entalpia.	43
Tabela 3.2	Dados e propriedades do ar na região das fornalhas	48
Tabela 3.3	Comparação entre os dados de projeto com o Modelo.	51
Tabela 4.1	Tabela comparativa Manati x Projeto	65
Tabela 5.1	Tabela das médias das variáveis sem indicação no SDCD.	68

Lista de Gráficos

Gráfico 1.1	Distribuição dos custos variáveis de produção da planta de MVC de Camaçari	8
Gráfico 3.1	Gráfico da Velocidade do vento na região das fornalhas	35
Gráfico 3.2	Avaliação das cargas térmicas com os dados de projeto	51
Gráfico 3.3	Avaliação do excesso de ar, oxigênio e eficiência da fornalha com os dados de projeto.	52
Gráfico 3.4	Avaliação do percentual de carga térmica em cada corrente com os dados de projeto	52
Gráfico 3.5	Avaliação da carga térmica utilizada para o fluido EDC com os dados de projeto.	53
Gráfico 4.1	Análise diária da composição do gás combustível	57
Gráfico 4.2	Gráfico comparativo da média da composição atual e de projeto do metano e propano	58
Gráfico 4.3	Gráfico comparativo da média da composição atual e de projeto do dióxido de carbono e do nitrogênio	58
Gráfico 4.4	Gráficos do comportamento da temperatura da chaminé e comparativo da média atual e de projeto	59
Gráfico 4.5	Gráficos das perdas térmicas da fornalha	60
Gráfico 4.6	Gráfico das parcelas de entrada de energia na fornalha	60
Gráfico 4.7	Gráfico das parcelas de calor absorvido pelas cargas de EDC e de água.	61
Gráfico 4.8	Gráfico das etapas de craqueamento do EDC	61
Gráfico 4.9	Gráfico comparativo da eficiência calculada pelos métodos direto e indireto	62
Gráfico 4.10	Gráfico comparativo das médias dos valores de eficiência	63
Gráfico 4.11	Gráfico comparativo da carga térmica absorvida pelo EDC em função da temperatura de entrada.	63
Gráfico 4.12	Gráfico da eficiência atual, calculada e garantida pelo projeto	64
Gráfico 4.13	Gráfico da eficiência em função do excesso de ar	65

Lista de Símbolos do Programa

CH ₄	<i>Concentração de metano no gás natural</i>
C ₂ H ₆	<i>Concentração de etano no gás natural</i>
C ₃ H ₈	<i>Concentração de propano no gás natural</i>
C ₄ H ₁₀	<i>Concentração de butano no gás natural</i>
CO ₂	<i>Concentração de dióxido de carbono no gás natural</i>
N ₂	<i>Concentração de nitrogênio no gás natural</i>
P	<i>Pureza do gás em relação aos elementos comburentes</i>
PCI _{met}	<i>Poder calorífico inferior do metano</i>
PCI _{et}	<i>Poder calorífico inferior do etano</i>
PCI _{prop}	<i>Poder calorífico inferior do propano</i>
PCI _{but}	<i>Poder calorífico inferior do butano</i>
PCIGN	<i>Poder calorífico inferior do gás natural</i>
VGN	<i>Vazão de gás natural</i>
TGN	<i>Temperatura do gás natural</i>
PGN	<i>Pressão do gás natural</i>
PM _{met}	<i>Peso molecular do metano</i>
PM _{et}	<i>Peso molecular do etano</i>
PM _{prop}	<i>Peso molecular do propano</i>
PM _{but}	<i>Peso molecular do butano</i>
PMCO ₂	<i>Peso molecular do dióxido de carbono</i>
PMN ₂	<i>Peso molecular do nitrogênio</i>
PMGN	<i>Peso molecular do gás natural</i>
P _{pjA}	<i>Pressão de projeto da placa de orifício para medição de gás natural</i>
T _{pjA}	<i>Temperatura de projeto da placa de orifício para medição de gás natural</i>
PM _{pjA}	<i>Peso molecular de projeto da placa de orifício para medição de gás natural</i>
FatA	<i>Fator de correção da vazão de gás natural</i>
VGNC	<i>Vazão de gás natural corrigida</i>
VGNCI	<i>Vazão de gás natural corrigida para a unidade de Kgmol/h</i>
VCH ₄	<i>Volume de metano no gás natural em Kgmol/h</i>

VC2H6	<i>Volume de etano no gás natural em Kgmol/h</i>
VC3H8	<i>Volume de propano no gás natural em Kgmol/h</i>
VC4H10	<i>Volume de butano no gás natural em Kgmol/h</i>
QGN	<i>Energia disponibilizada pelo gás natural</i>
O2chamine	<i>Composição de Oxigênio na chaminé da fornalha</i>
COchamine	<i>Composição de Monóxido de carbono na chaminé da fornalha</i>
CO2chamine	<i>Composição de Dióxido de carbono na chaminé da fornalha</i>
N2chamine	<i>Composição de Nitrogênio na chaminé da fornalha</i>
O2cha100	<i>Número de moles de oxigênio na chaminé para uma base de 100 Kgmol/h</i>
COcha100	<i>Número de moles de monóxido de carbono na chaminé para uma base de 100 Kgmol/h</i>
CO2cha100	<i>Número de moles de Dióxido de carbono na chaminé para uma base de 100 Kgmol/h</i>
N2cha100	<i>Número de moles de nitrogênio na chaminé para uma base de 100 Kgmol/h</i>
NTchamine	<i>Número total de moles na chaminé</i>
XO2cha	<i>Fração molar de Oxigênio na chaminé</i>
XCOcha	<i>Fração molar de Monóxido de carbono na chaminé</i>
XCO2cha	<i>Fração molar de Dióxido de carbono na chaminé</i>
XN2cha	<i>Fração molar de Nitrogênio na chaminé</i>
Carbonin	<i>Número de carbonos na chaminé</i>
Gasexausto	<i>Vazão real dos gases exaustos pela chaminé</i>
O2chareal	<i>Número de moles real de oxigênio na chaminé</i>
COchareal	<i>Número de moles real de Monóxido de carbono na chaminé</i>
CO2chareal	<i>Número de moles real de Dióxido de carbono na chaminé</i>
N2chareal	<i>Número de moles real de Nitrogênio na chaminé</i>
N2reacao	<i>Numero de moles de Oxigênio que entra com o ar da reação</i>
O2real	<i>Número de moles de oxigênio para a reação</i>
Arreal	<i>Quantidade de ar que entra para a reação</i>
VO2met	<i>Número de moles de oxigênio para a combustão de metano</i>
VO2et	<i>Número de moles de oxigênio para a combustão de etano</i>
VO2prop	<i>Número de moles de oxigênio para a combustão de propano</i>
VO2but	<i>Número de moles de oxigênio para a combustão de butano</i>

VO2est	<i>Número de moles de oxigênio para a combustão do gás natural</i>
VN2met	<i>Número de moles de nitrogênio para a combustão de metano</i>
VN2et	<i>Número de moles de nitrogênio para a combustão de etano</i>
VN2prop	<i>Número de moles de nitrogênio para a combustão de propano</i>
VN2but	<i>Número de moles de nitrogênio para a combustão de butano</i>
VN2est	<i>Número de moles de nitrogênio para a combustão do gás natural</i>
Arest	<i>Número de moles estequiométrico para a combustão do gás natural</i>
Varestton	<i>Massa de ar em toneladas para a combustão do gás natural</i>
Excessoar	<i>Excesso de ar na combustão</i>
ExcessoO2	<i>Excesso de Oxigênio na combustão</i>
AN2	<i>Constante A do Nitrogênio para o cálculo da entalpia</i>
BN2	<i>Constante B do Nitrogênio para o cálculo da entalpia</i>
CN2	<i>Constante C do Nitrogênio para o cálculo da entalpia</i>
DN2	<i>Constante D do Nitrogênio para o cálculo da entalpia</i>
AO2	<i>Constante A do Oxigênio para o cálculo da entalpia</i>
BO2	<i>Constante B do Oxigênio para o cálculo da entalpia</i>
CO2	<i>Constante C do Oxigênio para o cálculo da entalpia</i>
DO2	<i>Constante D do Oxigênio para o cálculo da entalpia</i>
TGNK	<i>Temperatura do gás natural em kelvin</i>
DeltaHN2	<i>Entalpia do Nitrogênio</i>
DeltaHO2	<i>Entalpia do Oxigênio</i>
Qar	<i>Energia que entra com o ar para a reação</i>
FEDCA	<i>Vazão de alimentação de dicloroetano para a fornalha em t/h</i>
TinEDC	<i>Temperatura de entrada do dicloroetano</i>
Xmedio	<i>Conversão média da reação de craqueamento</i>
QAqEDC	<i>Calor necessário para aquecer o dicloroetano até 245°C</i>
QVapEDC	<i>Calor necessário para vaporizar o dicloroetano</i>
ToutEDC	<i>Temperatura de saída da mistura gasosa da fornalha</i>
nEDCin	<i>Número de moles do dicloroetano que entra para a fornalha</i>
nEDCout	<i>Número de moles do dicloroetano que sai da fornalha</i>
nHClout	<i>Número de moles do Ácido Clorídrico que sai da fornalha</i>
nMVCout	<i>Número de moles do MVC que sai da fornalha</i>

mEDCout	<i>Massa do dicloroetano que sai da fornalha</i>
mHClout	<i>Massa do Ácido Clorídrico que sai da fornalha</i>
mMVCout	<i>Massa do MVC que sai da fornalha</i>
QEDCout	<i>Calor necessário para aquecer o Dicloroetano até a temperatura de saída da mistura gasosa</i>
QHClout	<i>Calor necessário para aquecer o HCl até a temperatura de saída da mistura gasosa</i>
QMVCout	<i>Calor necessário para aquecer o MVC até a temperatura de saída da mistura gasosa</i>
QAqmix	<i>Calor necessário para aquecer mistura gasosa até a temperatura de saída</i>
QReac	<i>Calor necessário para que a reação de craqueamento ocorra</i>
QEDC	<i>Calor total absorvida pela carga</i>
FAAgua	<i>Vazão de água para a seção de recuperação de calor</i>
TinAAC	<i>Temperatura de entrada da água</i>
ToutAAC1	<i>Temperatura da saída de água (Ramal 1)</i>
ToutAAC2	<i>Temperatura da saída de água (Ramal 2)</i>
ToutAAC	<i>Temperatura de média de saída de água</i>
CpWin	<i>Capacidade calorífica da água na temperatura de entrada</i>
CpWout	<i>Capacidade calorífica da água na temperatura de saída</i>
Cpmedio	<i>Capacidade calorífica média da água</i>
QAAC	<i>Calor absorvida pela água de caldeira</i>
TdutoA	<i>Temperatura dos gases de combustão</i>
TdutoAK	<i>Temperatura dos gases de combustão em Kelvin</i>
VH2Omet	<i>Número de moles de água formados pela combustão do metano</i>
VH2Oet	<i>Número de moles de água formados pela combustão do etano</i>
VH2Oprop	<i>Número de moles de água formados pela combustão do propano</i>
VH2Obut	<i>Número de moles de água formados pela combustão do butano</i>
VH2Ogases	<i>Número de moles de água formados pela combustão do gás natural</i>
ACO	<i>Constante A do Monóxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
BCO	<i>Constante B do Monóxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
CCO	<i>Constante C do Monóxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
DCO	<i>Constante D do Monóxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>

ACO2	<i>Constante A do Dióxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
BCO2	<i>Constante B do Dióxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
CCO2	<i>Constante C do Dióxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
DCO2	<i>Constante D do Dióxido de carbono para o cálculo da entalpia</i>
AH2O	<i>Constante A da água para o cálculo da entalpia</i>
BH2O	<i>Constante B da água para o cálculo da entalpia</i>
CH2O	<i>Constante C da água para o cálculo da entalpia</i>
DH2O	<i>Constante D da água para o cálculo da entalpia</i>
DeltaHN2G	<i>Entalpia do Nitrogênio</i>
DeltaHO2G	<i>Entalpia do Oxigênio</i>
DeltaCOG	<i>Entalpia do Monóxido de carbono</i>
DeltaCO2G	<i>Entalpia do Dióxido de carbono</i>
DeltaH2OG	<i>Entalpia da água</i>
Qgases	<i>Calor total dos gases de combustão</i>
QCO	<i>Calor devido ao combustível não queimado</i>
Mgases	<i>Massa dos gases exaustos</i>
ntotalu	<i>Número total de moles dos gases exaustos</i>
XO2u	<i>Fração molar do oxigênio em base úmida</i>
XCOu	<i>Fração molar do Monóxido de carbono em base úmida</i>
XCO2u	<i>Fração molar do Dióxido de carbono em base úmida</i>
XN2u	<i>Fração molar do Nitrogênio em base úmida</i>
XH2Ou	<i>Fração molar da água</i>
Cpgases	<i>Capacidade calorífica dos gases exaustos</i>
Tad	<i>Temperatura adiabática de chama da fornalha</i>
Tsup	<i>Temperatura da superfície externa da fornalha</i>
TsupK	<i>Temperatura da superfície externa da fornalha em kelvin</i>
A	<i>Área total da fornalha, exceto da chaminé</i>
TinfK	<i>Temperatura das vizinhanças da fornalha</i>
Pr	<i>Número de Prandtl</i>
g	<i>Aceleração da gravidade</i>
beta	<i>Coefficiente de expansão térmica do ar</i>
V	<i>Viscosidade cinemática do ar</i>

L	<i>Comprimento característico da chapa da fornalha</i>
Gr	<i>Número de Grashof</i>
Ra	<i>Número de Rayleigh</i>
Nu	<i>Número de Nusselt</i>
Kar	<i>Coefficiente de condutibilidade térmica do ar</i>
hconv	<i>Coefficiente de transferência de calor por convecção</i>
Qconv	<i>Calor transmitido por convecção da parede da fornalha para o ambiente</i>
E	<i>Emissividade</i>
Sigma	<i>Constante de Stefan-Boltzmann</i>
hrad	<i>Coefficiente de transferência de calor por radiação</i>
Qrad	<i>Calor transmitido por radiação da parede da fornalha para o ambiente</i>
QparedeW	<i>Calor perdido pelas estruturas da fornalha em Watt</i>
Qparede	<i>Calor perdido pelas estruturas da fornalha em Kcal/h</i>
Qintot	<i>Calor total que entra na fornalha</i>
Qouttot	<i>Calor total que sai na fornalha</i>
BE	<i>Balanço de energia da fornalha</i>
PercQGN	<i>Percentagem de energia devido ao gás natural</i>
PercQar	<i>Percentagem de energia devido ao ar atmosférico</i>
PercQEDC	<i>Percentagem de energia absorvida pelo EDC</i>
PercQAAC	<i>Percentagem de energia absorvida pela água de caldeira</i>
PercQparede	<i>Percentagem de energia perdida pelas estruturas da fornalha</i>
PercQgases	<i>Percentagem de energia perdida pelos gases de exaustão</i>
PercQCO	<i>Percentagem de energia perdida pelo combustível não queimado</i>
PercNE	<i>Percentagem de energia não encontrada</i>
EFIdir	<i>Eficiência direta da fornalha</i>
EFInd	<i>Eficiência indireta da fornalha</i>
Vetor1	<i>Vetor resultado 1</i>
Vetor2	<i>Vetor resultado 2</i>
Vetor3	<i>Vetor resultado 3</i>
Vetor4	<i>Vetor resultado 4</i>

Resumo

O processo de combustão tem grande importância para o desenvolvimento industrial. Nos últimos anos o setor industrial Brasileiro vem sofrendo seguidos aumentos no preço do gás natural e a legislação ambiental é cada vez mais restritiva, principalmente no que tange a emissões atmosféricas. O setor industrial, principalmente as empresas que tem como concorrência direta os produtos importados, concorre cada vez mais com mercados competitivos sendo necessária a redução de custos variáveis de produção. Tanto do ponto de vista econômico como ambiental é fundamental o profundo conhecimento e controle das reações de combustão que ocorrem nas fornalhas de craqueamento para a adoção de medidas de maior eficiência energética que resultem um aproveitamento mais racional de energia e uma menor disposição de poluentes como, por exemplo, CO e NO_x.

Este trabalho apresenta uma análise metodológica estruturada para avaliar a eficiência da combustão em uma fornalha de craqueamento de 1,2 Dicloroetano pelos métodos direto e indireto, assim como as perdas térmicas na fornalha e a carga efetivamente útil para o sistema.

A eficiência de uma fornalha é obtida pela determinação da percentagem da energia fornecida para a fornalha e as percentagens de perdas térmicas devido aos vários fenômenos na operação da fornalha.

As perdas térmicas avaliadas neste trabalho foram as perdas dos gases de combustão, da parede da fornalha e as perdas devido ao combustível não queimado.

Neste trabalho também foi avaliado o comportamento da eficiência da fornalha com a variação do nível de excesso de ar para a combustão.

Palavras-Chave: Combustão, Fornalha, Eficiência.

Abstract

The Combustion process has great importance to the industrial development. In recent years the Brazilian Industrial sector comes suffering increases in the prices from the natural gas and the environment legislation is each more restrictive time. The sector industrial mainly the companies who have as direct competition the imported products concur each time more with competitive market being necessary the reduction of changeable costs of production.

As much of the economic point of view as environment is basic the deep knowledge and control of the combustion reaction that occur in the cracking furnace for the adoption of measures of bigger energy efficient that a more rational exploitation of the energy and a lesser disposal of pollutants results as for example CO and NO_x.

This work presents a structuralized methodological analyzes to evaluated the combustion's efficiency in a cracking furnace of 1,2 Ethane Dichloride for the direct and indirect method as well as the thermal losses in the furnaces and the effectively useful load for the system.

The efficiency of a furnace is gotten by the determination of the percentage of the energy supplied to the furnace and the percentages of thermal losses due some phenomena in the operation of the furnace.

The evaluated thermal losses in this work had been the losses of the gases of combustion, the wall of the furnace and the losses due to the fuel that did not burn.

In this work also the behavior of the efficiency of the furnace with the variation of the level of air excess was evaluated for the combustion.

Keywords: Combustion, Furnace, Efficiency.

Capítulo 1

Introdução

1

1.1. Introdução

O Cloreto de Vinila $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ ou MVC, é um dos “comodities” mais usados na indústria mundial em virtude da ampla faixa de aplicação do seu polímero, o PVC (Policloreto de Vinila).A capacidade mundial atual de produção do PVC é de aproximadamente 33 milhões de toneladas por ano.O crescimento no consumo do PVC está ligada a demanda do segmento de construção civil e ao crescimento do PIB.A utilização do PVC cresceu rapidamente logo após a segunda guerra mundial devido a necessidade de recuperação da infra-estrutura urbana.No Brasil, o consumo do PVC é considerado ainda abaixo da média quando comparado aos países como Estados Unidos e Japão.Estudiosos prevêm a elevação do consumo mundial de PVC entre 3-4% ao ano nos próximos anos.

A síntese do Cloreto de Vinila ocorreu inicialmente através da reação de Dicloroetano com álcool. A reação entre HCl e acetileno foi estudada em 1912 sendo que a patente foi obtida considerando o uso de cloreto de mercúrio como catalisador.Este processo foi logo substituído pelo processo de Cloro/Etileno e posterior pirólise do Dicloroetano.A partir de 1930, o Cloreto de Vinila passou a ser produzido comercialmente. Inicialmente, através da reação entre HCl e acetileno, e posteriormente (1950), a partir de Etileno e Cloro.No entanto, como este processo produz HCl na etapa de pirólise do Dicloroetano, houve maior desenvolvimento de plantas que tinham a tecnologia de base acetileno em conjunto com Cloração direta.

O Desenvolvimento da tecnologia de Oxidação no final dos anos 50 foi o grande precursor do crescimento da indústria de Cloreto de Vinila. Este processo consiste da reação entre

eteno, HCl e Oxigênio para obter o 1,2 Dicloroetano, e posterior pirólise do Dicloroetano para obter o HCl e MVC. O processo de obtenção do Dicloroetano a partir do Etileno e Cloro mostrou-se mais vantajoso porque como a pirólise do Dicloroetano também produz HCl não é necessária a produção adicional de HCl em função do seu reciclo para o processo de Oxicloração.

Atualmente, apenas uma pequena fração da produção mundial de Cloreto de Vinila se baseia nos processos de cloração direta e Oxicloração. Atualmente cerca de 85% do total de EDC produzido no mundo é destinado a produção do MVC e 15% são destinados a produção de solventes clorados.

A reação da formação de MVC a partir do Dicloroetano ocorre através de craqueamento térmico.

Para prover a energia necessária para a reação de craqueamento é necessária a combustão.

O processo de combustão tem sido fundamental para o desenvolvimento industrial. Reações de combustão são reações químicas que envolvem a oxidação completa de um combustível, ou de outra forma, é a conversão de uma substância chamada combustível em compostos químicos conhecidos como produtos da combustão, pela combinação com um oxidante. A combustão é uma reação química exotérmica. Materiais ou compostos são considerados combustíveis industriais quando sua oxidação pode ser feita com liberação de energia suficiente para o aproveitamento industrial.

A maioria dos processos industriais utiliza o ar ambiente como fonte de fornecimento de oxigênio para a combustão. O conhecimento das necessidades de ar para combustão, assim como da composição e volume dos produtos de combustão é fundamental para o projeto e controle de fornalhas.

Os requisitos de energia da grande maioria dos processos industriais são obtidos originalmente de combustíveis convencionais através de uma complexa cadeia de reações denominada combustão. Para a maioria das aplicações da combustão, esta situação pode ser reduzida a uma consideração sobre os materiais de partida, combustível e Oxigênio, e os produtos finais. Esta simplificação facilita o cálculo do ar ou oxigênio necessário para um combustível, o desprendimento potencial de calor e temperatura e a composição ideal dos produtos gasosos de combustão produzida.

Todo combustível requer, de acordo com a sua composição, uma quantidade específica e calculável de oxigênio (e de ar) para atingir teoricamente uma reação completa. Para reações nas quais o ar utilizado é menor do que a quantidade estequiométrica haverá uma reação incompleta ,

perda de calor potencial e emissão de monóxido de carbono para a atmosfera. Para reações nas quais a quantidade de oxigênio é maior do que a estequiométrica, ocorrerão perdas excessivas de gás combustível visto que o calor despreendido da reação seria utilizado para aquecer esta massa adicional de ar. Na prática, um pouco mais do que o estequiométrico é requerido para garantir que a combustão seja completa.

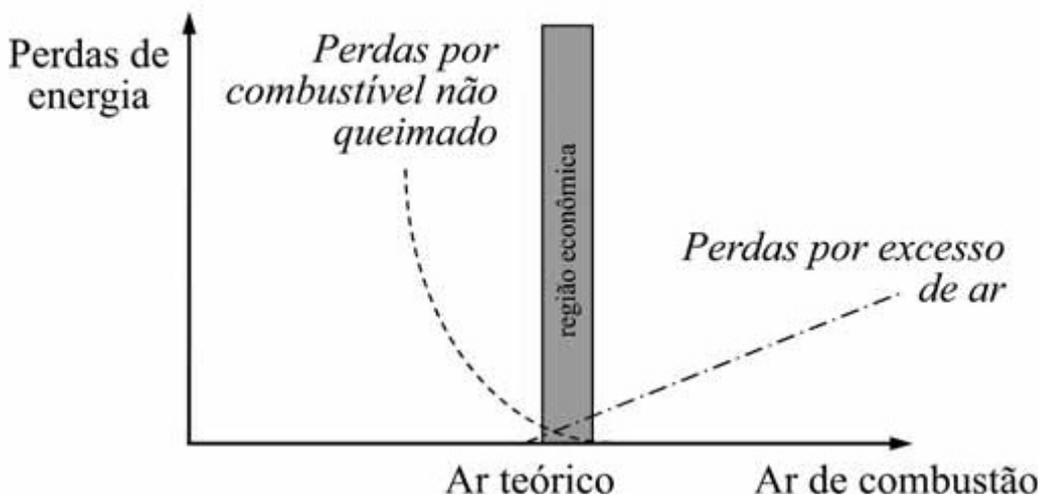


Figura 1.1: Diagrama esquemático da variação das perdas com o excesso de ar. Fonte: Livro “Eficiência Energética no uso de vapor”

Se a composição do combustível e a composição dos produtos de sua combustão são conhecidas, o rendimento da combustão pode ser calculado. A quantidade teórica de ar (Ou oxigênio) para a combustão completa e a composição estequiométrica dos produtos combustíveis são calculadas e comparadas com a composição real obtida pela análise dos gases de combustão, tendo, portanto o rendimento do processo. A análise dos gases de combustão pode levar, por exemplo, à descoberta de deficiência no processo de combustão, ao diagnóstico de vazamento no forno (Combustível escapando da região de combustão sem estar completamente queimado) ou infiltrações de ar na fornalha.

Uma outra forma de analisar a eficiência do sistema de combustão é através do aproveitamento de calor.

Onde:

$$\eta = 100\% - \text{Perdas}(\%) \quad (1.1)$$

e

$$Perdas(\%) = \frac{Energia_{Sai}}{Energia_{entra}} \quad (1.2)$$

Ou , segundo Pinheiro et al

$$\eta = (Q_{disp} - Q_2 - Q_3) / Q_{disp} \quad (1.3)$$

Onde:

Q_{disp} é a energia disponível para a combustão;

Q_2 é a perda de calor pelo excesso de ar, sem produzir queima incompleta;

Q_3 é a perda de calor pela combustão incompleta;

Sendo que a eficiência máxima seria obtido pela minimização de Q_2+Q_3 . Estas perdas seriam função das composições e temperatura de produtos da combustão, isto é , do excesso de ar das fornalhas.

Deste modo é necessário realizar balanços de massa e energia na fornalha.

Uma combustão ineficiente significa uma operação com custos mais elevados para produção, degradação dos equipamentos térmicos e aumento das emissões de poluentes e gases do efeito estufa, sendo imperativo, portanto, a eliminação de desperdícios e a introdução de técnicas que melhorem a eficiência destes sistemas.

1.2. Descrição do Processo: Craqueamento de EDC em MVC (Monocloreto de Vinila)

O processo de produção monômero do cloreto de Vinila da Braskem PVC inicia-se na área de Oxicloração e/ou Cloração Direta, onde se tem uma reação para produção do EDC (Dicloroetano). Após a sua produção, o Dicloroetano é encaminhado para a área de purificação. Após purificado, o EDC alimenta um vaso pulmão e depois é enviado as fornalhas de craqueamento de EDC para a produção de MVC conforme desenho esquemático abaixo:

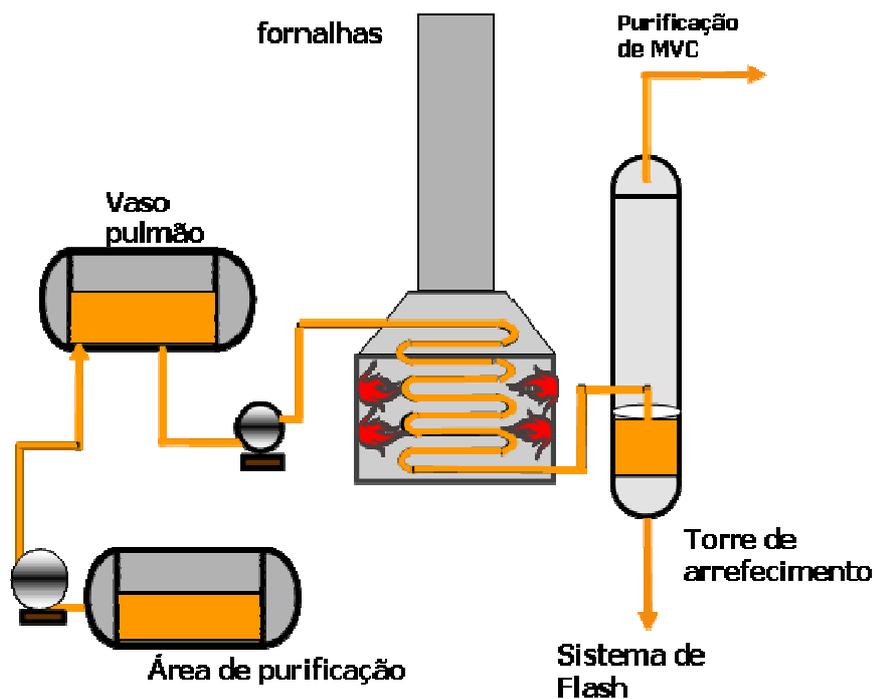
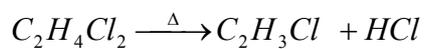


Figura 1.2: Fluxograma simplificado da área de craqueamento de Dicloroetano.

A reação principal nesta área é a seguinte:



As fornalhas de craqueamento de Dicloroetano são constituídas por uma série de tubos, a altas pressões, posicionados horizontalmente, conforme desenho esquemático abaixo:

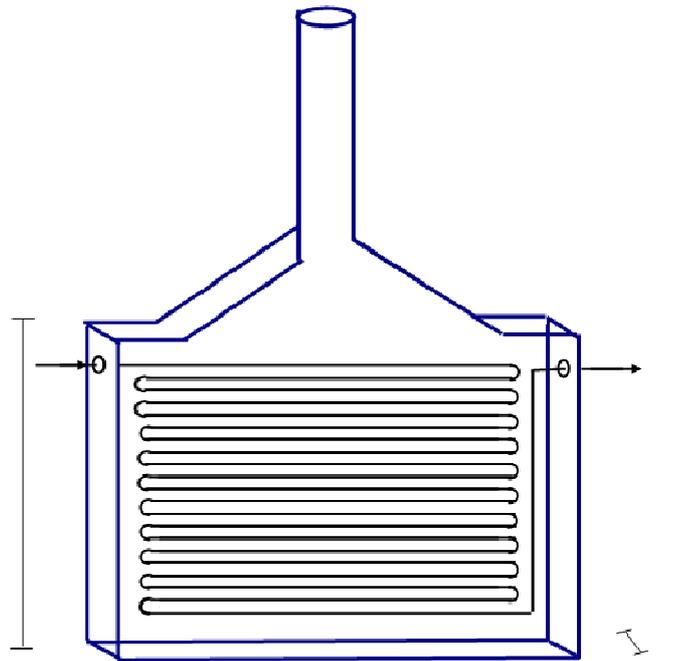


Figura 1.3: Fluxograma simplificado disposição de serpentinas.

Para o processo de craqueamento térmico que ocorre nas fornalhas é necessário grande quantidade de calor, que é fornecido pela combustão do gás natural fornecido pela Bahiagás e que alimentam os queimadores nas fornalhas.

Cada fornalha possui 80 maçaricos, sendo 40 de cada lado conforme desenho abaixo:

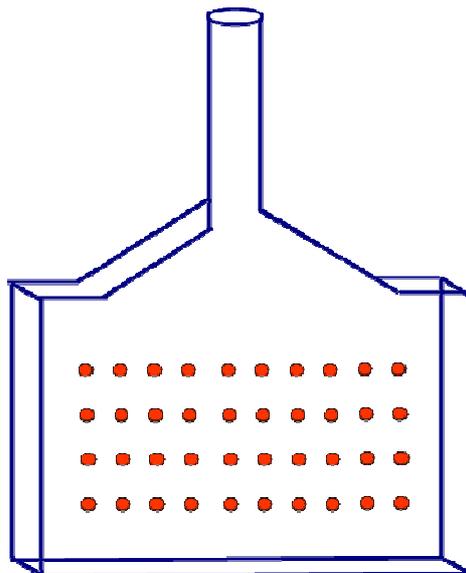


Figura 1.4: Fluxograma simplificado disposição dos Queimadores.

A potência dos queimadores é de acordo com a sua localização, sendo que os queimadores da fileira inferior têm o dobro da potência dos queimadores da fileira superior, localizados próximos a zona de convecção.

Para a que a combustão e conseqüentemente liberação de calor ocorram, gás natural alimenta os queimadores, arrastando o ar atmosférico.

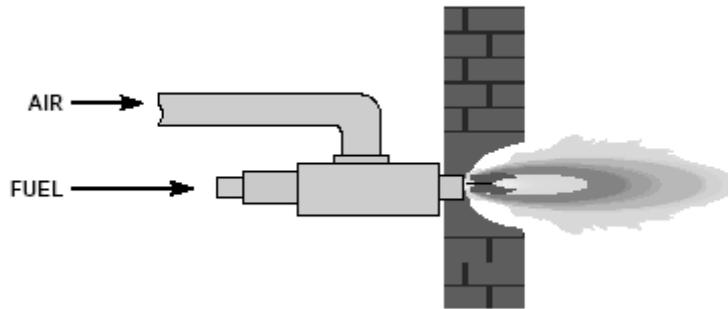


Figura 1.5: Desenho Esquemático do Queimador. Fonte: Baukal, C.-Industrial Combustion Pollution and Control

O gás natural é formado principalmente pelo Metano (CH_4) e etano (C_2H_6) e os gases provenientes da reação do gás natural com o oxigênio são analisados na chaminé dos fornos por um analisador em linha e análises periódicas realizadas pelo laboratório.

1.3. Justificativas

Durante as últimas décadas, a otimização do desempenho de fornalhas tem sido um tema de bastante interesse. Inicialmente, estes estudos tinham como principal objetivo tornar estes equipamentos mais eficientes do ponto de vista energético. Atualmente, as principais razões são de natureza ambiental, a crise no setor de combustíveis fósseis e a competitividade acirrada com as empresas estrangeiras, exigindo cada vez mais que as empresas nacionais reduzam seus custos variáveis de produção.

Na Braskem-PVC, o gás natural representa cerca de 50% dos custos variáveis de produção, excluindo-se as matérias primas, sendo necessárias medidas para a compreensão e redução do uso deste insumo energético.

CV Ex MP MVC

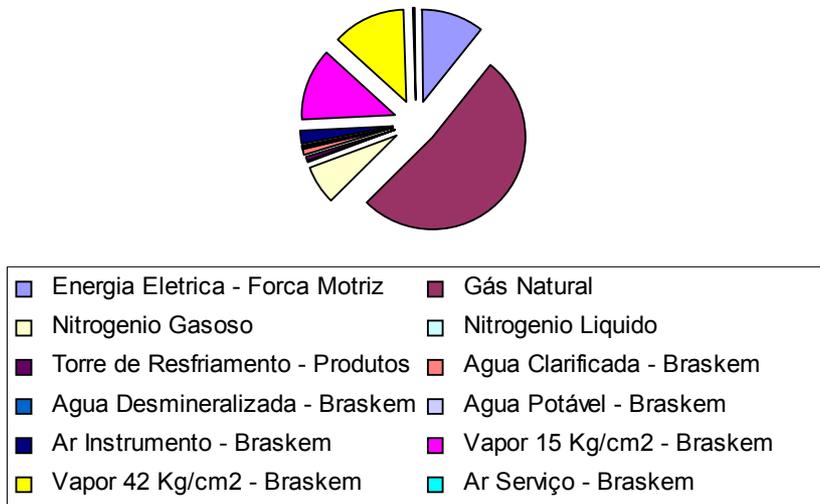


Gráfico 1.1: Distribuição dos custos variáveis de produção da planta de MVC de Camaçari.

1.4. Proposta de Dissertação

A otimização das condições operacionais de uma fornalha é obtida a partir da análise do rendimento térmico.

O comportamento da eficiência da combustão de equipamentos térmicos pode ser estudado através de ferramenta de simulação numérica.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que possibilite prever o comportamento da eficiência do forno em termos de combustão e excessos dos gases provenientes da queima. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta os seguintes objetivos:

- ❖ Levantamento de dados históricos para o cálculo da eficiência da combustão;
- ❖ Reproduzir o comportamento estacionário da fornalha em estudo, utilizando o Matlab;
- ❖ Comparação com os dados de projeto da tecnologia licenciadora e avaliação das perdas de calor pelas paredes dos fornos e pela chaminé;
- ❖ Verificar o comportamento da eficiência da fornalha durante uma campanha, onde todas as variáveis sofrem alterações, como por exemplo: Excesso de oxigênio e ar,

vazão e temperatura de água para a seção de convecção, temperatura dos gases exaustos, temperatura, pressão e composição do gás natural e carga dos fornos;

- ❖ Apresentar recomendações para elevar o rendimento térmico das fornalhas;
- ❖ Simular o comportamento da fornalha utilizando o gás do campo de Manati (com maior concentração de nitrogênio), verificando o acréscimo de consumo;
- ❖ Disponibilizar para o grupo operacional, uma ferramenta que possibilite acompanhamento da eficiência das fornalhas e auxilie na tomada de ações para elevar a eficiência dos equipamentos;

1.5. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos, incluindo este que é introdutório.

O capítulo 2 destina-se a apresentar a revisão bibliográfica dos aspectos relevantes para a construção desta dissertação como: Combustão, combustíveis, tipos e partes integrantes de uma fornalha, métodos para avaliação da eficiência térmica, diagrama de Sankey, etc. É também feito um levantamento sobre os dados de projeto das fornalhas da Braskem PVC.

No capítulo 3 são apresentadas as hipóteses simplificadoras para esta dissertação, os balanços de massa e energia das fornalhas de craqueamento do 1,2 Dicloroetano. Neste capítulo, o modelo proposto é utilizado para comparar os valores de eficiência obtidos com os valores de projeto da fornalha. Neste capítulo também, descrevemos a metodologia para obtenção dos dados utilizados nesta dissertação.

No capítulo 4 são mostrados os resultados de eficiência das fornalhas, a variação desta eficiência com o excesso de ar, os valores de perda de carga térmica pelos gases, pelas estruturas das fornalhas, pelo combustível não queimado, o calor aproveitado para craqueamento do EDC e pela água para produção de vapor.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões, recomendações, bem como propostas de futuras avaliações de interesse em função dos resultados obtidos.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas deste estudo de dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2

Neste capítulo será apresentada a revisão das referências bibliográficas utilizadas como base para esta Dissertação, bem como artigos com temas análogos ao estudado.

2.1. Combustão

2.1.1 Eficiência da Combustão

Nem toda a energia contida no combustível é aproveitada pelo equipamento, sendo a energia não utilizada considerada perda. Nesse contexto, o excesso de ar, embora necessário para que a combustão completa ocorra, introduz gases no processo, como o nitrogênio, que não participam da reação, mas “roubam” calor da chama. Dessa forma, o excesso de ar deve ser mantido a um mínimo para que a reação de combustão ocorra totalmente, mas que os volumes de N_2 não sejam tão altos a ponto de remover calor sem utilizá-lo.

Segundo Paulo Et al, a atual preocupação ecológica levou ao estabelecimento de normas ambientais rigorosas. Para otimizar a eficiência térmica das fornalhas é necessário minimizar o excesso de ar, assegurando ao mesmo tempo o cumprimento das normas ambientais. O excesso de ar na combustão é um fator importantíssimo pois influencia tanto a eficiência térmica quanto o nível de emissão de poluentes como Monóxido de Carbono, SO_x e NO_x .

Existem algumas perdas que podem ser controladas e outras não. De forma geral, para reduzir as perdas de calor e obter uma alta eficiência térmica na operação do forno, deve-se atuar em (SOUZA, 2003):

- ❖ Baixos excessos de ar;
- ❖ Usar queimadores tecnologicamente desenvolvidos;
- ❖ Aproveitar ao máximo o calor sensível dos gases de combustão;
- ❖ Minimizar a unidade do combustível e do ar de combustão;
- ❖ Não tolerar combustível não-queimado;
- ❖ Manter o isolamento térmico do equipamento em bom estado;
- ❖ Manter positiva a pressão interna para evitar infiltrações de ar frio no equipamento.

Segundo Nogueira et al, eficiência térmica é a razão entre um benefício energético com o consumo de energia associado, pode ser dado pela seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{Q_n}{Q_f}, \quad (2.1)$$

Sendo,

η = Eficiência térmica

Q_n = Calor útil,

Q_f = Calor fornecido pelo combustível

Existem dois métodos para avaliação da eficiência em equipamentos térmicos:

- ❖ Método Direto: Envolve o cálculo do rendimento através da relação entre energia absorvida e energia fornecida. Este método requer a medição precisa da vazão de combustível, de seu poder calorífico e do calor absorvido pelo fluido ou fluidos de trabalho.

$$\eta_{\text{direto}} = \left(\frac{Q_{\text{absorvido}}}{Q_{\text{disponível}}} \right) * 100\% \quad (2.2)$$

- ❖ Método Indireto: O rendimento é calculado a partir das perdas de energia referentes aos gases, às trocas por radiação e convecção, às perdas por fuligem ou cinzas e às perdas referentes ao combustível não queimado.

$$\eta_{\text{indireto}} = 100\% - \text{perdas} \quad (2.3)$$

Segundo Nogueira et al, como a maior parcela de perda está associada com o fluxo de gases pela chaminé, que pode ser medida de maneira precisa e por balanço de massa, o valor da eficiência pode ser obtido com razoável precisão pelo método indireto.

Ainda Segundo Nogueira, as perdas pela chaminé podem ser divididas em duas parcelas principais:

- ❖ Uma associada aos gases secos formados na combustão
- ❖ Outra associada ao vapor presente na chaminé.

A perda associada á entalpia dos componentes do gás seco gerado na combustão pode ser representado por:

$$P_{GS} = (m_{CO_2} * Cp_{CO_2} + m_{SO_2} * Cp_{SO_2} + m_{N_2} * Cp_{N_2}) * (T_{CH} - T_R) \quad (2.4)$$

Onde,

m_i é a massa de componente i formado na combustão,

Cp_i é calor específico médio entre as temperaturas T_{CH} e T_R

T_{CH} é a temperatura da chaminé;

T_R é a temperatura de referencia adotada;

Segundo Nogueira, para cálculos práticos, e considerando que grande parte dos gases é constituída de nitrogênio gasoso, podemos considerar:

$$P_{GS} = m_{GS} * C_{P_{ar}} * (T_{CH} - T_{ref}) \quad (2.5)$$

Onde,

m_{GS} é a vazão dos gases de combustão

Cp_{ar} é o calor específico médio entre T_{CH} e T_R

A parcela de calor perdido na chaminé pela água, pode ser calculada por:

$$P_V = m_p * C_{P_V} * (T_{CH} - T_{ref}) + m_v * h_{lv} \quad (2.6)$$

Onde:

m_p é a vazão de vapor,

C_{pV} é o calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{REF}

m_v é a vazão mássica de vapor formada na combustão e presente no combustível;

h_{lv} é a entalpia de vaporização da água na temperatura de referencia;

Ainda segundo Nogueira, na chaminé existem outras perdas, como por exemplo as perdas relativas à presença de monóxido de carbono e fuligem, mas podem ser desprezadas.

Para Nogueira, as perdas pelo costado é geralmente complexa devido à necessidade de várias medições. Geralmente assume-se este valor como 1 a 4 % da energia total fornecida.

De acordo com Nogueira, para se obter o valor exato das perdas relativas ao combustível não convertido seria necessário realizar um ensaio para determinar o poder calorífico do combustível não convertido. Como na maioria das vezes isto não é possível, costuma-se realizar a análise da quantidade de carbono sem queimar nas cinzas, ou seja:

$$P_{CC} = m_c * 33780 \quad (2.7)$$

Onde m_c é a massa de carbono presente nas cinzas;

Segundo Pinheiro et al (Método de cálculo do balanço térmico em caldeiras), a utilização eficiente do combustível é função de três fatores principais:

- ❖ Da combustão completa do combustível na fornalha;
- ❖ Maximização da transferência de calor dos produtos da combustão para as superfícies de absorção de calor;
- ❖ Minimização das perdas de calor para o ambiente.

De acordo com Pinheiro, a energia total disponível do combustível queimado é determinada pela fórmula:

$$Q_d = PCI + Q_{comb} + Q_{aex} + Q_V + Q_{CD}, \quad (2.8)$$

Onde:

Q_d é a energia disponível;

PCI é o poder calorífico inferior;

Q_{comb} o calor sensível do combustível;

Q_{aex} a energia introduzida na fornalha pelo ar de combustão;

Q_v a energia introduzida na fornalha pelo vapor de atomização do combustível;

Q_{CD} é a energia utilizada para decompor os carbonatos presentes no combustível (Só aplicados a Xistos).

O calor sensível do combustível depende da sua temperatura:

$$Q_{comb} = C_{Pcomb} * T_{comb} \quad (2.9)$$

Segundo Pinheiro, a perda de energia pelos gases de chaminé em uma caldeira é o item mais relevante, podendo chegar a 20%.

O cálculo para avaliar as perdas é baseado na lei de HESS e Kirchhoff:

$$Q_{gases} = V_g * Cp_g * (T_{wg} - T_{atm}), \quad (2.10)$$

De acordo com Pinheiro, diminuindo-se a temperatura da chaminé em 15 a 20°C, eleva-se a eficiência da fornalha em 1%.

Ainda segundo Pinheiro, em fornalhas bem projetadas e operadas com combustíveis gasosos, a perda pela combustão incompleta é <0,5% e é determinada pelo teor de CO e mais raramente pelo teor de H₂.

Likins Jr (Monitoring and Control of a Furnace) afirmou que a eficiência de uma fornalha é determinada obtendo-se a percentagem de calor fornecido para a mesma e a percentagem das perdas que ocorrem devido ao vários fenômenos na fornalha. A partir daí, este valor de eficiência pode ser aproveitado pelos operadores, ou utilizado por um controle automático para maximizar seu valor.

Segundo Likins, as perdas presentes quando se tem uma combustão com ar são:

- ❖ Perda devido à umidade presente no ar utilizado para a combustão;
- ❖ Perda devido à água no combustível;
- ❖ Perda devido à água formada pela combustão;
- ❖ Perda quando se tem material sólido incombustível, somado ao combustível não queimado;
- ❖ Perda pela radiação das estruturas da fornalha;
- ❖ Perdas não medidas

Segundo Likins, as perdas devido à umidade presente no ar e devido à água formada na combustão são as maiores. A perda devido à água no combustível pode ser significativa caso o

combustível contenha quantidade de água considerável. As perdas por radiação e as não medidas são geralmente muito pequenas. A partir daí, o cálculo da eficiência pode ser determinado, subtraindo as porcentagens das perdas mais relevantes de 100%.

Johnson et al (Steam Generator On Line Efficiency Monitor) apresentou um trabalho para medir a eficiência em gerador de vapor baseado na perda por massa de combustível. A eficiência seria então o poder calorífico superior do combustível subtraído do total das perdas.

Para Johnson, as perdas poderiam ser determinadas separadamente , somadas e subtraídas de 100%.

De acordo com Johnson, a perda pelo ar úmido pode ser calculada através da seguinte equação:

$$L = \frac{m_{Cdry}}{m_c} * 0,247 * (T - t) \quad (2.11)$$

Onde:

L é a perda pela umidade no combustível;

m_{Cdry} é a massa do combustível úmido;

m_c é a massa do combustível;

T é a temperatura do gás;

t é a temperatura ambiente;

0,247 é o calor específico do ar úmido em $\frac{BTU}{lb * F}$.Foi assumido que o calor específico do gás combustível úmido seria aproximadamente igual ao calor específico do ar úmido.

Johnson também propôs formulas para o cálculo de perda de combustível não queimado pela chaminé:

$$L = \frac{m_{Chaminé}}{m_c} * \left(\frac{m_{Carbono}}{1 - m_{Carbono}} \right) * 14,5 \quad (2.12)$$

Onde L é a perda pelo combustível não queimado na chaminé e 14,5 é o calor de combustão do carbono para dióxido de carbono. Este cálculo requer uma análise da chaminé para determinar o volume de monóxido de carbono na corrente.

Para a perda por radiação, Johnson propôs que a perda seria função da carga:

$$L = K * (c \arg a)^{-0,95} \quad (2.13)$$

Onde L é a perda por radiação, K é uma constante.

As perdas incontáveis, como por exemplo, devido a vazamentos e purgas, são estimadas como percentuais do calor fornecido ao gerador de vapor.

E a eficiência do gerador de vapor, segundo Johnson seria calculada da seguinte forma:

$$EF = 100\% - (\sum \text{Perdas}) * 100 \quad (2.14)$$

Em 1977, Sheffield et al estudou a variação da eficiência de uma fornalha variando em pequenas quantidades o excesso de oxigênio.

Em 1979, Shigemura, em estudo semelhante, verificou que para fornalhas que operam com gás natural, o pico de máxima eficiência estaria em torno de 2% de excesso de oxigênio.

Ross, 1985, apresentou um modelo que maximizava a eficiência através dos gases de combustão da fornalha. Ele se baseou em dois tipos de perdas:

- ❖ Perda pelo combustível não queimado (Q_C), e
- ❖ Perda pelos gases exaustos (Q_A).

Segundo Ross, a perda pelo combustível não queimado ocorre devido a imperfeições na mistura do combustível com o ar e que esta imperfeição ocorre quando o excesso de oxigênio está localizado próximo a zero.

A perda pelo combustível não queimado, quando só existem hidrogênio e monóxido de carbono na chaminé pode se calculado pela fórmula:

$$Q_C = (QH_2 * \%H_2 + QCO * \%CO) * W, \quad (2.15)$$

Onde:

QH_2 é o calor de combustão do hidrogênio

QCO é o calor de combustão do monóxido de carbono

$\%H_2$ é a percentagem de hidrogênio na corrente de chaminé

$\%CO$ é a percentagem de monóxido de carbono na corrente de chaminé

W é o volume total dos gases de combustão.

Ross apresentou também a fórmula para calcular a perda pelos gases exaustos Q_A :

$$Q_A = 4,76 * \%O_2 * (T_S - T_0) * (W * q_A) \quad (2.16)$$

Onde

$\%O_2$ é a percentagem de oxigênio nos gases exaustos;

T_S é a Temperatura de saída dos gases exaustos;

T_0 é a temperatura ambiente

q_A é o calor específico do ar.

Então a eficiência é calculada pela seguinte equação:

$$Ef = 100\% - (Q_A - Q_C) / 100 \quad (2.17)$$

Foley,1987, propôs um meio para otimizar a eficiência de fornalhas automaticamente utilizando um controle para a quantidade de entrada de ar para a combustão.O método automaticamente aumentava ou reduzia a quantidade de ar.Caso a eficiência aumentasse, a quantidade de ar aumentava gradativamente na mesma direção.Caso diminuísse, a variação do excesso seria no sentido reverso.

A eficiência térmica às vezes é confundida com eficiência da combustão. É importante distinguir uma da outra. Enquanto a eficiência da combustão está associada à eficiência da conversão química do combustível em calor, a eficiência térmica de um equipamento está associada a capacidade de aproveitamento de calor liberado pela combustão.O aproveitamento deste calor depende da minimização das perdas decorrentes da combustão incompleta, pelos gases exaustos, pela perda de calor pelas paredes do equipamento e outras perdas menores.

2.1.2 Excesso de ar

Para se realizar a combustão é necessária uma quantidade de ar estequiométrico chamada de ar teórico. No entanto, para assegurar que a combustão se dará completamente, é necessário uma quantidade de ar adicional de modo a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama, e superar as deficiências de mistura do queimador. A este ar adicional, dá se o nome de “excesso de ar”.

Para combustíveis líquidos e gasosos, o excesso de ar é menor que para combustíveis sólidos, pois quando os primeiros são introduzidos na câmara de combustão eles são fracionados, permitindo um maior contato com os comburentes.

Segundo Moran (1999), o excesso de ar de uma combustão é a razão mássica ou molar ar-combustível real e teórica. Ele é dado pela fórmula:

$$\lambda = \frac{AC_r}{AC_t} \quad (2.18)$$

Onde,

AC_r é a relação ar combustível real e AC_t é a relação ar combustível teórica.

A quantidade de moles dos gases de combustão pode ser estimada conhecendo-se o fator λ ou conhecendo-se a quantidade molar do combustível e fazendo um balanço.

Pinheiro (Controle de Combustão-Otimização do Excesso de Ar), apresentou os valores usuais de excesso de ar para vários combustíveis e tipos de fornalhas, conforme quadro abaixo:

Combustível	Tipo de Fornalha ou Queimador	α
Carvão Pulverizado	Aquatubular completa	1,15-1,20
	Aquatubular parcial fundo seco	1,15-1,40
Carvão Britado	Fornalha Ciclone	1,10-1,15
Carvão	Grelha fixa	1,30-1,60
	Grelha vibratória	1,30-1,60
	Grelha rotativa	1,15-1,50
	Grelha fixa alimentação por baixo	1,20-1,50
Óleo Combustível	Queimadores de óleo tipo registro	1,05-1,15
	Queimadores multicomcombustível	1,05-1,20
Resíduo Acido	Queimadores chama plana a vapor	1,10-1,15
Gás Natural	Queimadores tipo registro	1,05-1,10
Gás Coqueria	Queimadores multicomcombustível	1,07-1,12
Gás Alto-forno	Queimadores de bocal intertubos	1,15-1,18
Madeira	Grelha	1,20-1,25
Bagaço	Todas as fornalhas	1,25-1,35
Licor Negro	Fornalhas recuperação Kraft e Soda	1,05-1,07

Tabela 2.1: Valores usuais do coeficiente de excesso de ar. Fonte: Controle de Combustão-Otimização do Excesso de Ar

A determinação prática do excesso de ar é usualmente realizada por meio de medidas de composição dos gases de combustão em base seca, isto é sem serem afetadas pelo teor de umidade eventual do combustível queimado.

Segundo Nogueira et al, caso seja conhecido os valores de CO₂ e O₂ na chaminé, o excesso de ar poderá ser calculado através da correlação abaixo:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{x}{\%CO_2}\right) - x - k - 3,76 * A}{4,76 * A} \quad (2.19)$$

Ou

$$\lambda = \frac{\%O_2 * (x - k - 3,76 * A)}{A * (1 - 4,76 * (\%O_2))}, \quad (2.20)$$

Onde,

λ é o coeficiente de excesso de ar,

A é o coeficiente estequiométrico = $x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} + k$,

%CO₂ teor de dióxido de carbono nos produtos de combustão;

%O₂ é o teor de oxigênio nos produtos de combustão;

x,y,z e k, teores molares do carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre do combustível

2.1.3 Combustão e Combustíveis

Combustão é uma das tecnologias mais antigas da humanidade e tem sido usada por mais de um milhão de anos.

A combustão é uma reação exotérmica rápida entre duas substâncias, um combustível e um comburente. O combustível é aquela substância que queima que se oxida, e contém em sua composição principalmente carbono e hidrogênio, e eventualmente, outros componentes, como por exemplo, enxofre e dióxido de carbono. O comburente é o componente da reação que fornece o oxigênio. Geralmente é utilizado o ar atmosférico como comburente, pois este não tem custo de fornecimento.

A energia liberada na reação, denominada entalpia de reação ou de combustão é o parâmetro de maior interesse neste processo.

Os combustíveis podem ser classificados de acordo com o seu estado físico em:

- ❖ Combustíveis sólidos: madeira, bagaço de cana, carvão mineral, carvão vegetal, coque, etc.
- ❖ Combustíveis líquidos: Líquidos derivados do petróleo, xisto, álcool, etc.
- ❖ Combustíveis gasosos: Metano, hidrogênio, etc.

Todo e qualquer processo de combustão deve atender requisitos para que ocorra eficientemente. Estes requisitos são a temperatura, turbulência e tempo, conhecidos como “os três T’s da combustão. A temperatura deve ser igual ou superior a temperatura de ignição do combustível para que a reação ocorra. A turbulência é fundamental para garantir o contato entre o combustível e o comburente. O Combustível deve ser exposto ao calor por um tempo mínimo para que haja volatilização e queima dos gases.

2.1.4 Poder calorífico

O Poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia que é liberada durante a combustão completa da unidade de massa (kg) ou da unidade de volume (Nm^3) do combustível, sendo geralmente expressa em Kcal/kg ou Kcal/ Nm^3 . Quando se considera o calor latente de vaporização da água gerada pela reação de combustão durante a queima de combustível com o ar seco, refere-se ao PCS, poder calorífico superior, e quando não se considera este calor latente, refere-se ao poder calorífico inferior, PCI. Em instalações industriais, geralmente a temperatura de saída dos gases é maior que a temperatura de condensação do vapor de água, portanto, o calor latente não é possível de ser recuperado. Devido a esta consideração, o PCI é de maior aplicação para os cálculos de rendimento e viabilidade econômica.

Vários autores dedicaram-se a estabelecer relações entre composição do combustível e o seu poder calorífico.

Mendeliev apresentou em 1897, uma fórmula geral para determinação do PCI (KJ/kg), base úmida, a partir da composição química elementar de qualquer combustível.

$$PCI^T = 339C^T + 1.030H^T - 109(O^T - S^T) - 24W^T \quad (2.21)$$

Borman e Ragland (1998) apresentaram para qualquer tipo de combustível que a diferença entre PCS e PCI de um combustível é obtida subtraindo o calor de vaporização da água nos produtos, ou seja:

$$PCI = PCS - \frac{m_{H_2O}}{m_{Combustível}} * h_{vap} \quad (2.22)$$

Sendo h_{vap} o calor latente de vaporização da água a 25°C.

Culp (1991) apresentou uma formula para o cálculo do PCS em função do PCI e da fração em massa do hidrogênio e da umidade do combustível (base úmida), para qualquer combustível, em base mássica:

$$PCS - PCI = 2400(W + 9H^T) \quad (\text{Kj/Kg}) \quad (2.23)$$

Para uma mistura de gases combustíveis, o PCS e o PCI é a soma do produto da fração mássica ou volumétrica de um componente individual pelo respectivo PCS ou PCI do componente. Ou seja, se a composição do combustível é conhecida, pode-se calcular o PCS ou PCI do combustível de acordo com as fórmulas abaixo:

$$PCS = \sum_i^n PCS_i X_i \quad (2.24)$$

$$PCI = \sum_i^n PCI_i X_i \quad (2.25)$$

Onde,

PCS_i é o Poder calorífico superior de cada componente na mistura gasosa;

PCI_i é o Poder calorífico inferior de cada componente na mistura gasosa;

X_i é a fração mássica ou volumétrica de cada componente na mistura gasosa;

Gás	PCS (MJ/Nm3)	PCI (MJ/Nm3)
Metano (CH4)	37,06	33,38
Etano (C2H6)	64,94	59,39
Propano (C3H8)	92,4	85,06
Butano (C4H10)	119,82	110,62
Pentano (C5H12)	158,2	146
Etileno (C2H4)	58,72	55,03
Propileno (C3H6)	92,1	86,01
Butileno (C4H8)	121,12	113,2
Penteno (C5H10)	150,8	141
Benzeno (C6H6)	146,1	140
Acetileno (C2H2)	54,06	52,24
Monóxido de carbono (CO)	11,77	11,77
Hidrogênio (H2)	11,9	10,06
P = 1 atm e T = 20 °C		

Tabela 2.2: Poder Calorífico inferior e Superior de alguns gases. Fonte: Borman e Ragland, 1998 e Grigoriev e Zorin.

Ravich (1977) propôs as seguintes equações para o cálculo do PCS e PCI de combustíveis gasosos em Kcal/Nm³, sendo o valor dos gases em porcentagem:

$$PCS = 30,2CO + 30,5H_2 + 61H_2S + 95CH_4 + 166C_2H_6 + 237C_3H_8 + 307C_4H_{10} + 377C_5H_{12} + 150C_2H_4 + 220C_3H_6 + 290C_4H_8 + 360C_5H_{10} + 350C_6H_6 \quad (2.26)$$

$$PCI = 30,2CO + 25,8H_2 + 56H_2S + 85,5CH_4 + 152C_2H_6 + 218C_3H_8 + 283C_4H_{10} + 349C_5H_{12} + 141C_2H_4 + 205C_3H_6 + 271C_4H_8 + 337C_5H_{10} + 335C_6H_6 \quad (2.27)$$

Em laboratório, para se determinar o PCS utiliza-se o calorímetro de Junkes para combustíveis líquidos e gasosos. Toma-se uma amostra de massa conhecida de um determinado combustível e mede-se com precisão a quantidade de calor produzida com a queima total do combustível. A quantidade de calor liberada assim determinada é o PCS, (em Inglês, HHV, High Heat Value).

2.2 Transferência de calor pelas paredes (Placas planas)

A figura abaixo representa a parede da fornalha.

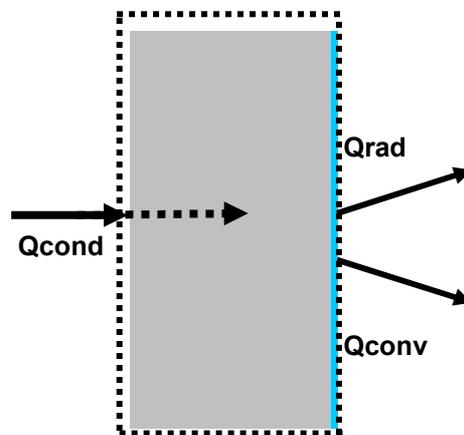


Figura 2.1: Desenho esquemático do fluxo de calor pelas paredes da fornalha.

Considerando o volume de controle representado na figura, tem-se a seguinte equação de balanço de energia:

$$Q_{Cond} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (2.28)$$

Onde,

Q_{Cond} é o calor transferido para a parede por condução, podendo ser calculado pela lei de Fourier:

$$Q_{Cond} = \frac{KA\Delta T}{L}, \quad (2.29)$$

K é o coeficiente de condutibilidade térmica do material,

A é a área de troca térmica

ΔT é o gradiente de temperatura entre as duas faces da placa.

Q_{Conv} é o calor transferido da placa para o ambiente através do mecanismo de convecção, pode ser calculado pela lei de Newton de resfriamento:

$$Q_{Conv} = hA(T_s - T_\infty), \quad (2.30)$$

h é o coeficiente de transferência convectiva de calor,

A é a área de troca térmica

T_s é a temperatura da superfície da placa

T_∞ é a temperatura do ambiente

Q_{rad} é o calor transferido por radiação, podendo ser calculado pela fórmula abaixo

$$Q_{rad} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.31)$$

h é o coeficiente de transferência radiativa de calor,

A é a área de troca térmica

T_s é a temperatura da superfície da placa

T_∞ é a temperatura do ambiente,

Segundo Incropera, todo esforço para cálculos de transferência de calor por convecção se resume, essencialmente, ao cálculo do coeficiente de transferência conectiva, sendo que:

$$h_{conv} = \frac{Nu * K}{L} \quad (2.32)$$

Para Incropera, as situações nas quais não existe velocidade forçada, mesmo existindo correntes de convecção da massa, são descritas pelo mecanismo de convecção livre ou natural. Estas situações ocorrem quando forças de volume atuam sobre um fluido no qual existem gradientes de densidade. Este gradiente de densidade ocorre devido a um gradiente de temperatura entre a superfície e o meio e a força de volume devido a gravidade.

Em escoamentos externos em geral, tem-se as seguintes condições para determinar que tipo de convecção será predominante:

$$\frac{Gr}{Re^2} \sim 1, \text{ Deverão ser considerados os efeitos combinados de Convecção natural e forçada;}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \ll 1, \text{ Os Efeitos da convecção livre deverão ser desprezados;}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1, \text{ Os efeitos da convecção forçada deverão ser desprezados.}$$

Ou seja, um escoamento de convecção livre é aquele causado exclusivamente pelas forças de empuxo e não existe velocidade de convecção forçada. Neste caso $Nu = f(Gr, Pr)$.

Para convecção natural, em escoamentos externos, Churchill e Chu, recomendaram uma correlação que pode ser aplicada sobre todo o domínio de Rayleigh, e tem a forma:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (2.33)$$

Segundo Incropera, é possível conseguir resultados ligeiramente mais exatos para o Nusselt, no escoamento laminar, mediante a seguinte expressão:

$$Nu = 0,68 + \frac{0,670 * Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \quad (2.34)$$

Sendo que Ra é o numero de Rayleigh e pode ser calculado da seguinte forma:

$$Ra = Gr * Pr, \quad (2.35)$$

Gr, o número de Grashof,

Pr, o número de Prandtl.

De acordo com Incropera, o número de Grashof tem o mesmo papel na convecção livre que o número de Reynolds tem na convecção forçada, sendo:

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sup} - T_{inf}) * L^3}{\nu^2} \quad (2.36)$$

β , o coeficiente de expansão térmica;

ν , a viscosidade cinemática;

L , o comprimento característico.

Segundo Incropera, pode-se modelar o modo radioativo de maneira análoga ao modelo convectivo de forma que:

$$Q_{rad} = A * h_{rad} * (T_{sup} - T_{inf}) \text{ e} \quad (2.37)$$

$$h_{rad} = \sigma * \varepsilon * \frac{(T_{sup}^4 - T_{inf}^4)}{(T_{sup} - T_{inf})}, \quad (2.38)$$

Sendo,

h_{rad} é o coeficiente de transferência por radiação,

σ é a constante de Stefan-Boltzmann;

ε é a emissividade do meio.

2.3 Diagrama de Sankey

Diagramas de Sankey são formas gráficas de representar os fluxos energéticos desde a sua entrada até os usos finais, caracterizando as diversas transformações intermediárias e as perdas associadas. Os fluxos são representados por faixas, cuja largura corresponde à sua magnitude em unidades energéticas.

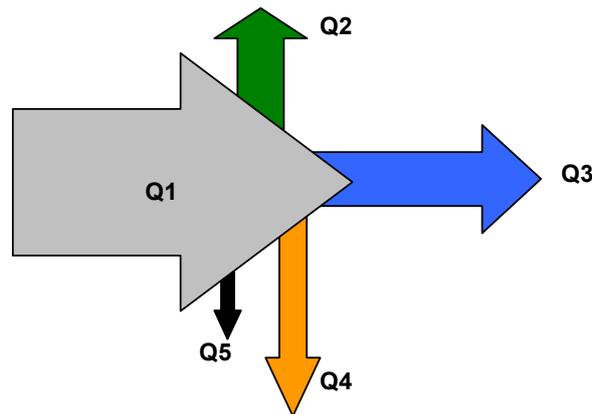


Figura 2.2: Exemplo de um Diagrama de Sankey.

2.4 Gás natural: Composição do gás atual e do gás de Manati

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, que em condições normais de temperatura e pressão se encontra no estado gasoso.

Quanto à origem, o gás natural pode ser classificado como:

- ❖ Gás associado: Quando a predominância é de petróleo na exploração da jazida, sendo separado durante o processo de produção, passando a ser um Co-produto;



Figura 2.3: Fluxograma simplificado de Poços de Gás Associado. Fonte: Adaptado do livro "Gás Natural" da Bahiagás

- ❖ Gás não associado: Quando o gás natural é obtido em grande quantidade diretamente do reservatório, sendo pequena a quantidade de petróleo produzido. Neste caso, o petróleo é considerado um co-produto.



Figura 2.4: Fluxograma simplificado de Poços de Gás não associado. Fonte: Adaptado do livro “Gás Natural” da Bahiagás

A composição do gás natural pode variar de campo para campo, de acordo com o material orgânico que lhe deu origem, os processos naturais a que foram submetidos e o processamento em unidades industriais, dentre outros fatores.

A composição predominante do gás natural é metano, e em quantidades menores, etano, propano e outros hidrocarbonetos de maior peso molecular.

Outros compostos podem ser encontrados nos gás natural, entre eles: Nitrogênio, Dióxido de Carbono, água e impurezas como, por exemplo, compostos de enxofre.

Pode ser denominado de gás úmido, o gás que contém frações líquidas de hidrocarbonetos e gás seco aquele que tem as frações líquidas retidas após processamento nas UPGN (Unidade de Processamento de gás natural)..

Elementos	Associado ¹	Não Associado ²	Processado ³
Metano	78,74	87,12	88,56
Etano	5,66	6,35	9,17
Propano	3,97	2,91	0,42
I-Butano	1,44	0,52	-
N-Butano	3,06	0,87	-
I-Pentano	1,09	0,25	-
N-Pentano	1,84	0,23	-
Hexano	1,8	0,18	-
Heptano e superiores	1,7	0,2	-
Nitrogenio	0,28	1,13	1,2
Dióxido de carbono	0,43	0,24	0,65
PCI (Kcal/m3)	11666	9249	8621
PCS (Kcal/m3)	12816	10223	9549

Tabela 2.3: Composição típica do Gás natural. Fonte: WWW.CONPET.GOV.BR

¹Gás de bacia de Campos, RJ – ²Gás da bacia de Santos,SP – ³Saída da UPGN-Candeias,Ba

O gás natural utilizado atualmente na PVC-Ba é o gás proveniente da bacia do recôncavo. Está prevista a substituição deste gás natural para o gás da bacia de Manati em 2009 devido à pressão declinante do gás da bacia do recôncavo.

Elementos	Recôncavo	Manati
Metano	88,85	88,56
Etano	8,99	3,78
Propano e maiores	0,51	1,5
H2S	Traços	-
CO2	0,86	0,35
N2	0,79	5,8
PCI (MJ/NM3	39,25	S/l

Tabela 2.4: Composição típica do Gás natural da bacia do recôncavo e de Manati Fonte: Livro Gás natural da Bahiagás.

As especificações do gás para consumo são ditadas pelo regulamento técnico ANP - Agência Nacional de Petróleo N° 03/2002, anexo a portaria N° 104, de 08 de Julho de 2002, emitida pela Agência Nacional de Petróleo.

Característica	Unidade	Portaria ANP N°104
Poder Calorífico Superior	kJ/ m ³	35.000 a 42.000
	kWh/m ³	9,72 a 11,67
	kcal/m ³	8.360 a 10.032
Índice de Wobbe	kJ/m ³	46.500 a 52.500
Metano Mínimo	% vol.	86
Etano Máximo	% vol.	10
Propano Máximo	% vol.	3
Butano e mais pesados Máximos	% vol.	1,5
Oxigênio Máximo	% vol.	0,5
Inertes (N2 + CO2) Máximos	% vol.	5
Nitrogênio	% vol.	2
Enxofre Total Máximo	mg/m3	70
Gás Sulfídrico (H2S) Máximo	mg/m3	15
Ponto de orvalho de água a 1atm, Máximo.	°C	-39

Tabela 2.5: Especificação do Gás natural segundo norma ANP N° 104

2.5 Tipos de fornalhas

Fornos são equipamentos estáticos, necessários a uma indústria de transformação petroquímica, onde é requerida grande quantidade de calor para a transformação de matéria prima em produtos.

Existem vários tipos de fornos, porém os mais utilizados são os tipo caixa e os circulares.

As fornalhas utilizadas na Braskem-PVC são do tipo caixa com tiragem natural, revestida internamente com material refratário e isolamento térmico, com estrutura externa de aço carbono.

2.6 Elementos constituintes de uma fornalha

2.6.1 Chaminé:

A chaminé, situada acima da seção de convecção, possui duas finalidades fundamentais:

- ❖ Descarregar os gases da combustão para a atmosfera onde possam ser rapidamente diluídos;
- ❖ Provocar a tiragem necessária à operação do forno.



Figura 2.5: Chaminé da Fornalha.

2.6.2 Tiragem

A eficiência de um forno depende do escoamento dos gases residuais para a atmosfera, pois este movimento ascendente garante a troca de calor dos gases quentes com o fluido da área de convecção. A este escoamento damos o nome de tiragem, definida como o fluxo formado pela corrente de ar frio que entra para os maçaricos e a de gás residual quente, mais leve, que sai pela chaminé. A tiragem é medida pela diferença entre a pressão atmosférica local e a pressão do gás residual em um ponto particular dentro do sistema forno-chaminé. A pressão interna varia ao longo do trajeto dos gases no forno. Há uma queda de pressão em cada seção do forno (inclusive na chaminé), cujo somatório deve ser vencido pela tiragem natural. A tiragem natural é criada pela chaminé, de acordo com o princípio de Arquimedes.

Tiragem natural, é a diferença de pressão entre a atmosfera exterior e a coluna de gases aquecidos, medida em qualquer ponto da fornalha e expressa em milímetros ou polegadas de coluna d'água.

Os gases aquecidos têm massa específica menor que o ar atmosférico. Em razão disso, tomando como ponto de referência o chão da fornalha, a pressão exercida pela coluna de gás quente, compreendida entre o chão da fornalha e a boca da chaminé, é menor que a pressão exercida

por uma coluna de ar frio de mesma altura. Conseqüentemente, o ar frio exterior penetrará na fornalha, através dos registros de ar dos maçaricos, expulsando um volume equivalente de gases de combustão; Por sua vez, esse ar frio, em razão da combustão, torna-se aquecido e será deslocado através da fornalha para a chaminé, empurrado por nova massa de ar frio da atmosfera externa.

2.6.3 Zona de Convecção

É a parte do forno em que as superfícies dos tubos estão protegidas do calor de radiação das chamas, e são aquecidas pelo calor de convecção dos gases exaustos.

Os gases de combustão que passam da seção de radiação para a convecção, possuem temperaturas elevadas e são, portanto, aproveitados para o aquecimento.

Os tubos desta seção possuem inúmeros pinos soldados nas suas superfícies externas, com a finalidade de aumentar o contato com os gases. Também são usadas aletas colocadas no sentido longitudinal dos tubos.

2.6.4 Zona de Radiação

A seção de radiação é a parte do forno onde se efetua a combustão, e na qual as superfícies dos tubos estão expostas ao calor radiante das chamas dos maçaricos.

Nesta seção, ocorre a maior parte de transmissão de calor aos tubos, e, por conseguinte, ao fluido de trabalho.

2.6.5 Serpentinhas

As serpentinhas são os tubos por onde flui a matéria prima a ser aquecida para craqueamento.

No caso específico da Braskem-PVC, os fornos são constituídos de serpentinhas economizadoras aletadas na zona de convecção e de serpentinhas com passe de aço inoxidável na zona de radiação.



Figura 2.6: Serpentinhas da Zona de radiação

2.6.6 Isolamento Térmico

O isolamento térmico é feito com revestimento refratário, com as seguintes finalidades:

- ❖ Controle de temperatura dos processos e produtos;
- ❖ Conservação de calor;
- ❖ Proteção da estrutura metálica dos fornos;
- ❖ Proteção pessoal;
- ❖ Transmissão de calor por radiação pelo aquecimento do refratário;

2.6.7 Damper

A relação entre ar e o combustível é importante, principalmente porque afeta à temperatura da chama. Entende-se por temperatura da chama, aquela na qual os gases de combustão são aquecidos. Quanto maior for à quantidade de ar (ou de produtos de combustão) que devem ser aquecidos pela chama, menor será a temperatura resultante na mesma e menor a intensidade de radiação. Disto pode-se concluir que, grandes quantidades de excesso de ar, reduzem a transferência de calor por radiação e devido as mesmas razões, a circulação dos gases de combustão também reduz a temperatura da chama.

O conhecimento do excesso de ar admitido num forno é importante, pois quando a quantidade é demasiada, não só a eficiência do forno, como a sua capacidade máxima ficam reduzidas. Além disso, todo o ar que entra e não é utilizado na combustão, consome certa quantidade de calor para seu aquecimento.

2.6.8 Câmara de combustão

É o espaço físico destinado para ocorrer a combustão. Segundo Yanagira et al, para um câmara de combustão ser bem projetada deve-se ter:

- ❖ Volume apropriado ao tipo e a quantidade do combustível a ser queimado;
- ❖ Altura compatível com a circulação de água nos tubos e tempo de queima do combustível;
- ❖ Disposição dos queimadores para evitar contato direto da chama com os tubos;
- ❖ Forma da câmara para favorecer a queima e garantir o fluxo regular dos gases de combustão;

- ❖ Temperaturas compatíveis com o equipamento e com o próprio combustível que se deseja queimar.

2.6.9 O equipamento em estudo

O equipamento em estudos foi a fornalha B da Braskem-PVC.

O forno de pirólise de dicloroetano é um aquecedor flamo tubular duplo-horizontal na seção de radiação e horizontal na seção de convecção.

Estes fornos são projetados para operarem em tiragem natural.

Cada forno possui 4 fileiras com 10 maçaricos por lado, completando um total de 40 maçaricos em cada face e 80 maçaricos por forno.

Os queimadores do anel inferior de cada face têm maior potência que os maçaricos dos anéis superiores. O Objetivo desta distribuição é aproveitar ao máximo a carga térmica visto que as fileiras da região inferior estão mais distantes da chaminé da fornalha.

2.6.10 Dados de Projeto

Na tabela abaixo temos as faixas de operação da tecnologia original para as variáveis dos fornos F-1401 A e B da Braskem PVC-Ba. Os valores abaixo foram retirados da folha de dados do equipamento.

Projeto do forno		
Variável	Valor	unidade
Excesso de ar	15	%
Peso molecular do gás	16,8	kg/Kgmol
PCI	8500~8800	Kcal/Nm3
Carga térmica AAC	1,14	MM Kcal
Carga térmica aquecimento EDC	2,647	MM Kcal
Carga térmica vaporização do EDC	1,369	MM Kcal
Carga térmica craqueamento e aquecimento da mistura	5,444	MM Kcal
Eficiência	88,8	%

Tabela 2.6: Dados de Projeto da Fornalha. Fonte: Folha de dados da Fornalha

2.7. Conclusão

Através da pesquisa bibliográfica foi possível perceber:

- ❖ A inexistência de uma norma para o cálculo do balanço térmico em fornalhas. Esta lacuna impossibilita que a definição de rendimento térmico seja uniformizada e praticada por todos da mesma forma.
- ❖ Existem hoje dois métodos consagrados para o cálculo da eficiência energética em fornalhas e caldeiras: O método direto e o método indireto. O primeiro leva em consideração a carga térmica útil repassada para o fluido ou fluidos de trabalho. O segundo está associado às várias perdas dos equipamentos térmicos;
- ❖ O coeficiente de excesso de ar é um fator importantíssimo para o acompanhamento de uma fornalha, pois ele influencia tanto na eficiência do equipamento quanto na geração de monóxido de carbono e NO_x para a atmosfera;
- ❖ A maior parcela de perdas térmicas em equipamentos de combustão está associada aos gases efluentes destes equipamentos, podendo chegar a 20% da carga total de entrada.

Capítulo 3

Modelagem

3

A modelagem para a eficiência da combustão na “firebox”, proposta nesta dissertação, foi inicialmente validada utilizando a folha de dados das fornalhas.

3.1 Hipóteses simplificadoras

Foram assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- ❖ Os gases, tanto no interior quando no lado externo da fornalha foram considerados como gases ideais, pois operam com baixas pressões e altas temperaturas;
- ❖ Energia cinética e potencial dos gases de exaustão são desprezadas;
- ❖ Não foi levada em consideração a qualidade do ar de alimentação para a combustão, ou seja, foi assumido que para as três fornalhas, a composição do ar se equivalia;
- ❖ Não foi considerado o fenômeno da dissociação térmica do CO_2 , pois este só ocorre em temperaturas acima de 2000 K.
- ❖ A conversão utilizada como entrada para o programa foi a conversão média dos três fornos, pois só existe um totalizador de MVC que computa a produção dos três fornos em paralelo;
- ❖ A temperatura da parede da fornalha foi considerada isotérmica, ou seja, assumindo que todos os pontos da parede possuem a mesma temperatura;
- ❖ Para efeito da análise da combustão e da eficiência da fornalha, foram abordados apenas os reagentes e os produtos finais da Combustão, desconsiderando os produtos intermediários;

- ❖ A velocidade do vento na região foi considerada desprezível para efeito do cálculo de transferência de calor pelas paredes da fornalha. Os dados apresentados no gráfico 3.1 foram resultados de medições realizadas a cada 15 minutos no dia 11/09/08. Devido aos baixos valores de velocidade na região dos fornos, o mecanismo considerado para a transferência de calor foi a convecção natural.

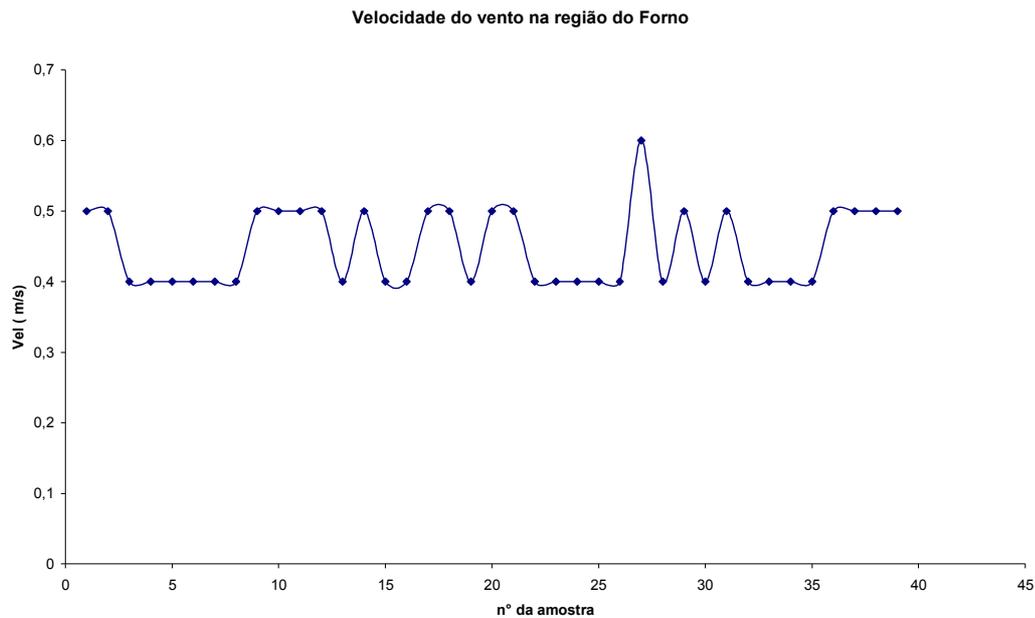


Gráfico 3.1: Gráfico da Velocidade do vento na região das fornalhas.

3.2 Balanços de massa e energia

Num processo de combustão, os balanços de massa e energia são os primeiros passos para avaliação da eficiência de uma fornalha.

A primeira etapa desta dissertação foi desenvolver um programa próprio para cálculo da eficiência da fornalha. Ele foi desenvolvido usando-se a linguagem Matlab. Esta linguagem foi escolhida por aliar a facilidade para introdução e visualização de dados, a interface gráfica e a potência computacional de uma linguagem estruturada de alto nível. As equações e dados necessários ao algoritmo foram aproveitados dos balanços de massa e energia.

Neste capítulo, apresentaremos os balanços de massa e energia da fornalha visando uma análise correta do ponto de vista termodinâmico. Serão apresentadas as equações para todas as entradas e saídas (perdas) de energia da fornalha.

O balanço é feito considerando as trocas pelas fronteiras do forno, envolvendo as correntes de massa de ar, gás combustível, gases de exaustão, produto a ser aquecido e craqueado e água a ser aquecida para a produção de vapor. É também considerada a perda de calor para as estruturas e paredes da fornalha.

3.2.1 Balanço de Massa

A figura abaixo mostra o volume de controle onde serão realizados os balanços de massa e energia: A fornalha.

A fornalha pode ser considerada um sistema aberto, pois existe fluxo de massa (Combustível, ar para combustão e gases exaustos) e energia (Calor) pelas fronteiras do seu volume de controle.

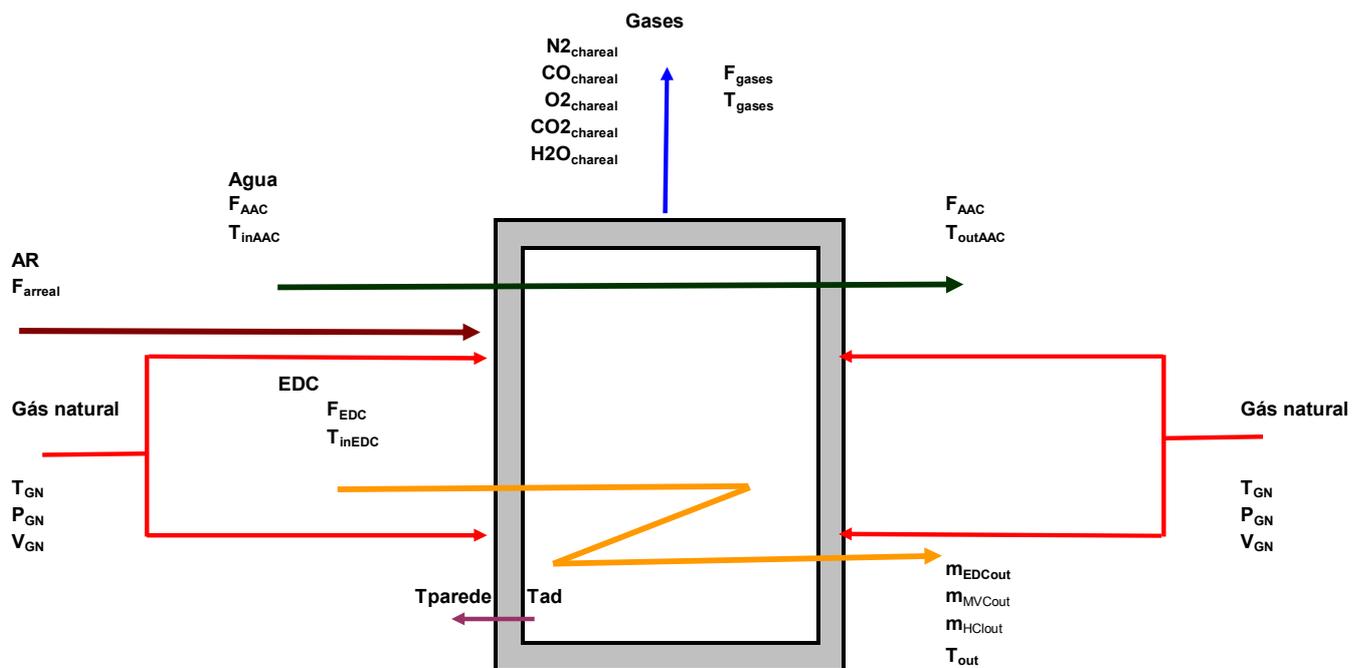
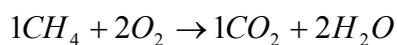


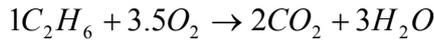
Figura 3.1: Desenho esquemático do balanço de massa e energia.

Para a combustão do gás natural, as principais reações são:

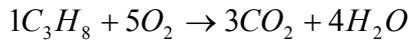
Reação de combustão do Metano:



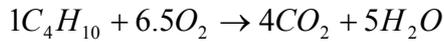
Reação de combustão do Etano:



Reação de combustão do Propano:



Reação de combustão do Butano:



Com a utilização de um analisador em linha na saída da chaminé da fornalha obtem-se as composições do O_2 , CO e CO_2 .

A composição do N_2 é calculada, em base seca, pela seguinte formula:

$$N_2 = 100\% - O_2 - CO - CO_2 \quad (3.1)$$

Utilizando-se uma base de 100 Kmol/h na chaminé tem-se:

$$nO_2 = 100 * \frac{O_2}{100}, \quad (3.2)$$

$$nCO = 100 * \frac{CO}{100}, \quad (3.3)$$

$$nCO_2 = 100 * \frac{CO_2}{100} \quad (3.4)$$

$$nN_2 = 100 * \frac{N_2}{100}, \quad (3.5)$$

Onde n é a vazão molar de cada composto para cada 100 Kmol/h de vazão na chaminé.

$$n_{total} = nO_2 + nCO + nCO_2 + nN_2, \quad (3.6)$$

Para o calculo da fração molar de cada composto, utiliza-se,

$$XO_2 = \frac{nO_2}{n_{total}} \quad (3.7)$$

$$XCO = \frac{nCO}{n_{total}} \quad (3.8)$$

$$XCO_2 = \frac{nCO_2}{n_{total}} \quad (3.9)$$

$$XN_2 = \frac{nN_2}{n_{total}}, \quad (3.10)$$

Para o balanço de massa se faz necessário a realização de um balanço de carbono na chaminé.

Pelas reações de combustão do gás natural, o número de Carbonos é obtido da formula abaixo:

$$NC_{chaminé} = V_{GNC} * \left(\frac{CH_4}{100} + 2 * \frac{C_2H_6}{100} + 3 * \frac{C_3H_8}{100} + 4 * \frac{C_4H_{10}}{100} + \frac{CO_2}{100} \right), \quad (3.11)$$

Onde,

$NC_{chaminé}$ é a quantidade de carbonos na chaminé, considerando a vazão real

CH_4 é a composição de metano no gás natural;

C_2H_6 é a composição de etano no gás natural;

C_3H_8 é a composição de propano no gás natural;

C_4H_{10} é a composição de butano no gás natural;

CO_2 é a composição de dióxido de carbono no gás natural;

Para a obtenção da vazão real dos gases exaustos,

$$F_{Gases} = \frac{NC_{chaminé} * 100}{(nCO + nCO_2)} \quad (3.12)$$

A vazão real dos gases exaustos, em Kmol/h será:

$$O_{2chareal} = F_{gases} * XO_2 \quad (3.13)$$

$$CO_{chareal} = F_{gases} * XCO \quad (3.14)$$

$$CO_{2chareal} = F_{gases} * XCO_2 \quad (3.15)$$

$$N_{2chareal} = F_{gases} * XN_2, \quad (3.16)$$

A vazão de vapor de água na chaminé é dada pela estequiometria da reação, logo:

$$H_2O_{chareal} = V_{GNC} * (2 * \frac{CH_4}{100} + 3 * \frac{C_2H_6}{100} + 4 * \frac{C_3H_8}{100} + 5 * \frac{C_4H_{10}}{100}) \quad (3.17)$$

Para o calculo de N_2 da reação, tem-se:

$$N_{2reação} = N_{2chareal} - V_{GNC} * N_2 \quad (3.18)$$

Sendo N_2 , a composição de nitrogênio presente no gás natural.

Com $N_{2reação}$, é possível calcular o oxigênio que entra na reação:

$$O_{2real} = N_{2reação} * \frac{21}{79}, \quad (3.19)$$

Logo é calculada a vazão de ar para a reação:

$$F_{arreal} = N_{2reação} + O_{2real} \quad (3.20)$$

Os valores estequiométricos de oxigênio serão:

$$O_{2est} = V_{GNC} * (2 * \frac{CH_4}{100} + 3,5 * \frac{C_2H_6}{100} + 5 * \frac{C_3H_8}{100} + 6,5 * \frac{C_4H_{10}}{100}), \quad (3.21)$$

E então o excesso de oxigênio pode ser verificado:

$$ExcessoO_2(\%) = \frac{(O_{2real} - O_{2est})}{O_{2est}} * 100 \quad (3.22)$$

De maneira análoga, para o cálculo do excesso de ar:

$$N_{2est} = O_{2est} * \frac{79}{21} \quad (3.23)$$

$$F_{arest} = N_{2est} + O_{2est} \quad (3.24)$$

$$ExcessoAr(\%) = \frac{(F_{arreal} - F_{arest})}{F_{arreal}} * 100 \quad (3.25)$$

3.2.2 Balanço de energia

Conforme descrito no capítulo 2, existem dois métodos para o cálculo da eficiência de um forno:

O método direto, que pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\eta_{\text{direto}} = \left(\frac{Q_{\text{absorvido}}}{Q_{\text{disponível}}} \right) * 100\% \quad (3.26)$$

Ou pelo método indireto,

$$\eta_{\text{indireto}} = 100\% - \text{perdas} \quad (3.27)$$

Pelo primeiro principio da termodinâmica que é a lei da conservação de energia, aplicado a sistemas com fluxo de energia e massa ao volume de controle, tem-se :

$$Q_{VC} + \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e}{2} + Z_e \right) + W_e = \frac{dE_{VC}}{dt} + \sum m_s \left(h_s + \frac{V_s}{2} + Z_s \right) + W_s \quad (3.28)$$

Durante a operação normal da fornalha em estudo, algumas hipóteses devem ser consideradas:

- ❖ No regime permanente, não existem variações de energia no volume de controle, logo;

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = 0 \quad (3.29)$$

- ❖ A velocidade dos gases de combustão, do combustível e comburente na entrada e saída do volume de controle é desprezível, ou seja, admite-se não haver variações de energia cinética e potencial, logo:

$$Q_{VC} + \sum m_e h_e = \sum m_s h_s \quad (3.30)$$

A equação acima pode ser modificada para a seguinte forma:

$$Q_{Gn} + Q_{ar} = Q_{EDC} + Q_{AAC} + \text{perdas} , \quad (3.31)$$

Em equipamentos térmicos, a parcela de perda pode ser reescrita como:

$$perdas = Q_{gases} + Q_{CO} + Q_{parede} \quad (3.32)$$

Desta maneira a equação do balanço de energia para a fornalha fica da seguinte forma:

$$Q_{Gn} + Q_{ar} = Q_{EDC} + Q_{AAC} + Q_{gases} + Q_{CO} + Q_{parede} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{devida a combustão} \\ \text{do Gás natural} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{devida a entalpia} \\ \text{do ar} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{passada para} \\ \text{o fluido EDC} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{passada para} \\ \text{o fluido Água} \end{array} \right] \\ & + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{perdida pelos} \\ \text{gases de combustão} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{perdida combustível} \\ \text{não queimado} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{perdida pelas estruturas} \\ \text{da fornalha} \end{array} \right] \end{aligned}$$

Onde:

Q_{GN} é a carga térmica cedida ao sistema pela combustão do gás natural;

Q_{ar} é carga térmica proveniente do ar, necessário para a combustão;

Q_{EDC} se refere à carga térmica absorvida pela corrente de EDC que passa nas serpentinas da fornalha;

Q_{AAC} é a parcela de energia que é absorvida pela água de caldeira destina a produção de vapor;

Q_{gases} é a energia perdida pelos gases que saem na chaminé da fornalha;

Q_{CO} é a energia perdida pela combustão incompleta do gás natural;

Q_{parede} é a energia perdida pelas estruturas da fornalha;

3.3 Cálculo da carga térmica do gás natural

A carga térmica proveniente do gás natural (Q_{GN}) pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q_{gn} = V_{GN} * P * \sum_i^n x_i * PCI_i \quad (3.34)$$

Onde V_{GN} é a vazão de gás natural, P é a pureza do gás natural, x_i é a fração volumétrica dos compostos na mistura gasosa e PCI_i é o poder calorífico de cada composto individualmente.

Para a vazão de gás natural, foi necessária a correção de temperatura, pressão e peso molecular para as condições atuais, que diferem das condições para as quais a placa de orifício, responsável pela medição do gás natural, foi projetada.

Os fatores para a correção da vazão de gás são os seguintes:

$$FT = \sqrt{\frac{T_{projeto} + 273.15}{T_{GN} + 273.15}}, \text{ fator para correção de temperatura.} \quad (3.35)$$

$$FP = \sqrt{\frac{P_{GN} + 1.033}{P_{Projeto} + 1.033}}, \text{ fator para correção da pressão.} \quad (3.36)$$

$$FPM = \sqrt{\frac{PM_{GN}}{PM_{Projeto}}}, \text{ Fator para correção do peso molecular.} \quad (3.37)$$

$$V_{GNC} = V_{GN} * FT * FP * FPM,$$

Logo:

$$V_{GNC} = V_{GN} * \sqrt{\frac{P_{GN} + 1.033}{T_{GN} + 273.15}} * PM_{GN} * \left(\frac{T_{projeto} + 273.15}{P_{Projeto} + 1.033}\right) * \frac{1}{PM_{Projeto}} \quad (3.38)$$

Que é a fórmula utilizada pelo fornecedor (Yokogawa) do sistema Digital de Controle Distribuído da Braskem - PVC.

Onde,

V_{GNC} é a vazão corrigida do gás

V_{GN} é a vazão do gás,

P_{GN} é a pressão do gás natural,

T_{GN} é a temperatura do gás,

PM_{GN} é o peso molecular do gás,

$T_{projeto}$ é a temperatura do gás nas condições de projeto=25°C

P_{projeto} é a pressão do gás nas condições de projeto = 7,61 Kgf/cm²

PM_{projeto} é o peso molecular do gás nas condições de projeto = 16,8 g/gmol,

Para o cálculo do peso molecular do gás foi utilizada a seguinte formula:

$$PM_{GN} = \sum x_i PM_i, \quad (3.39)$$

onde x_i é a fração volumétrica dos compostos e PM_i é o peso molecular de cada composto na mistura gasosa.

3.4 Cálculo da carga térmica do ar de combustão

O termo Q_{ar} se refere à carga térmica proveniente do ar necessário para a combustão e foi calculado da seguinte forma:

$$Q_{ar} = \sum_i^n n_i * H_i \quad (3.40)$$

Onde n_i é número de moles dos componentes oxigênio e Nitrogênio e H_i é a entalpia de cada composto individualmente.

Para o cálculo das entalpias do oxigênio e nitrogênio foi utilizada a seguinte correlação:

$$\Delta H = T * (A + T * (\frac{B}{2} + T * (\frac{C}{3} + \frac{D}{4} * T))) - T^* * (A + T^* * (\frac{B}{2} + T^* * (\frac{C}{3} + \frac{D}{4} * T^*))) \quad (3.41)$$

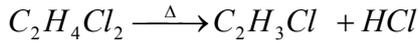
	A	B	C	D
CH₄	4,598	1,245E-02	2,860E-06	-2,703E-09
C₃H₆	1,292	4,254E-02	-1,657E-05	2,081E-09
C₃H₈	-1,009	7,315E-02	-3,789E-05	7,678E-05
C₄H₁₀	2,266	7,913E-02	-2,647E-05	-6,740E-10
CO₂	4,728	1,754E-02	-1,338E-05	4,097E-09
CO	7,373	-3,070E-03	6,662E-06	-3,037E-09
O₂	6,713	-8,790E-07	-4,170E-06	-2,544E-09
N₂	7,440	-3,240E-03	-6,400E-06	-2,790E-09
H₂O	7,701	4,595E-04	-2,521E-06	-8,510E-10

Tabela 3.1: Constantes A, B, C e D para o cálculo da entalpia. Fonte: Praunitz e Sherwood , 3º Edição

T^* é a temperatura de referência, utilizada nesta dissertação como 273,15K.

3.5 Cálculo da carga térmica absorvida pela carga (EDC)

O termo Q_{EDC} se refere à carga térmica absorvida pelo dicloroetano para produção do monômero do cloreto de vinila (MVC) e ácido clorídrico através da reação endotérmica:



Pode ser dividido da seguinte forma:

$$Q_{EDC} = Q_{AqEDC} + Q_{VapEDC} + Q_{Reac} + Q_{AQMix} \quad (3.42)$$

A parcela Q_{AqEDC} é o calor sensível necessário para aquecer o EDC desde a temperatura de alimentação (T_{inEDC}) até a temperatura de vaporização de EDC, 245°C. Logo,

$$Q_{AqEDC} = F_{EDC} * C_{pEDC} * (245 - T_{inEDC}), \quad (3.43)$$

Onde,

F_{EDC} é a vazão de EDC para a fornalha,

C_{pEDC} é a capacidade calorífica do EDC

A parcela Q_{vapEDC} é o calor latente de vaporização do EDC a 245°C,

$$Q_{vapEDC} = F_{EDC} * \Delta H_{vap} \quad (3.44)$$

Sendo ΔH_{vap} o calor de vaporização do EDC.

O termo Q_{reac} é o calor absorvido pela carga para que ocorra o craqueamento propriamente dito. Esta parcela é calculada da seguinte forma:

$$Q_{reac} = F_{EDC} * X * \Delta H_{reac} \quad (3.45)$$

Onde X é a conversão e ΔH é a entalpia da reação.

Por fim, o termo Q_{Aqmix} é a carga térmica utilizada para aquecer a mistura gasosa, EDC, MVC e HCl de 245°C até a temperatura de saída da fornalha.

$$Q_{Aqmix} = Q_{EDCout} + Q_{MVCout} + Q_{HClout} \quad (3.46)$$

$$Q_{EDCout} = m_{EDCout} * C_{pEDC} * (T_{out} - 245) \quad (3.47)$$

$$Q_{MVCout} = m_{MVCout} * C_{pMVC} * (T_{out} - 245) \quad (3.48)$$

$$Q_{HClout} = m_{HClout} * Cp_{MVC} * (T_{out} - 245) \quad (3.49)$$

3.6 Cálculo da carga térmica absorvida pela água

A carga térmica absorvida pela água de caldeira na zona de convecção da fornalha pode ser calculada como:

$$Q_{AACi} = F_{AAC} * Cp_{AAC} * (T_{outAAC} - T_{inAAC}) \quad (3.50)$$

Onde F_{AAC} é a vazão de água nas serpentinas de recuperação de calor, T_{outAAC} é a temperatura de saída de água nas serpentinas. Como existe uma bifurcação de alimentação de água, com uma indicação de temperatura de água para cada ramal, foi considerado a média das temperaturas, de forma que:

$$T_{outAAC} = \frac{(T_{outAAC1} + T_{outAAC2})}{2} \quad (3.51)$$

T_{inAAC} é a temperatura de entrada de água;

Cp_{AAC} é a capacidade calorífica da água.

Os valores da capacidade calorífica da água foram gerados no Aspen Plus, chegando-se a seguinte correlação:

$$Cp_{AAC}(T) = 0,00000002 * (T_{inAAC})^3 - 0,000006 * (T_{inAAC})^2 + 0,001 * T_{inAAC} + 0,9523 \quad (3.52)$$

3.7 Cálculo da carga térmica dos gases de combustão

Para o cálculo da parcela de energia perdida nos gases de combustão foi utilizada a seguinte equação:

$$Q_{Gases} = n_{N2cha\ min\ e} * \Delta H_{N2} + n_{O2cha\ min\ e} * \Delta H_{O2} + n_{COcha\ min\ e} * \Delta H_{CO} + n_{CO2cha\ min\ e} * \Delta H_{CO2} + n_{H2Ocha\ min\ e} * \Delta H_{H2O} \quad (3.53)$$

Onde n_i são os valores de moles de cada composto na corrente da chaminé. Estes valores foram obtidos do balanço de massa descrito na seção 4.1.

Os valores das entalpias foram obtidos da equação abaixo:

$$\Delta H = T^* \left(A + T^* \left(\frac{B}{2} + T^* \left(\frac{C}{3} + \frac{D}{4} * T \right) \right) \right) - T^* \left(A + T^* \left(\frac{B}{2} + T^* \left(\frac{C}{3} + \frac{D}{4} \right) \right) \right) \quad (3.54)$$

T é a temperatura dos gases exaustos, e para as constantes A, B, C e D, ver tabela 4.1.

3.8 Cálculo da carga térmica perdida pelo combustível não queimado

O termo Q_{CO} é a energia não desprendida pelo gás natural devido à combustão incompleta.

A equação para o seu cálculo será:

$$Q_{CO} = n_{CO} * \Delta H_{CombCO} \quad (3.55)$$

Onde n_{CO} é o número de moles de CO na corrente da chaminé e ΔH_{CombCO} é a energia desprendida pela queima de um mol de CO.

3.9 Cálculo da carga térmica perdida pelas paredes da fornalha

Para o cálculo da parcela de energia perdida pelas estruturas do forno foi utilizado o modelo de placas planas.

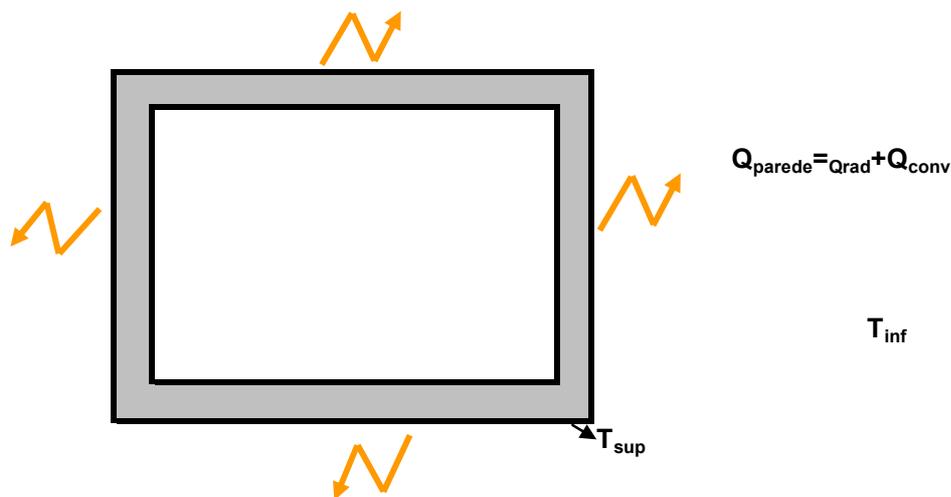


Figura 3.2: Fluxograma simplificado para avaliação da carga térmica perdida pelas paredes da fornalha.

O calor perdido pelas estruturas da fornalha ocorre por convecção e radiação, logo:

$$Q_{Parede} = Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (3.56)$$

3.9.1 Cálculo da parcela de calor devido à convecção

$$Q_{conv} = A * h_{conv} * (T_{sup} - T_{inf}) \quad (3.57)$$

De acordo com Incropera e Dewitt, o coeficiente convectivo pode ser calculado através da equação:

$$h_{conv} = \frac{Nu * K}{L}, \quad (3.58)$$

Onde,

Nu é o número de Nusselt,

K é o coeficiente de transferência de calor do ar

L é o comprimento característico da placa

De acordo com a seção 2.2,

$\frac{Gr}{Re^2} \sim 1$, Deverão ser considerados os efeitos combinados de Convecção natural e forçada;

$\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$, Os Efeitos da convecção livre deverão ser desprezados;

$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$, Os efeitos da convecção forçada deverão ser desprezados.

Utilizando os valores da tabela 3.2 para as propriedades na região próxima as fornalhas, foram calculados os números de Reynolds e de Grashof para avaliar o mecanismo de convecção predominante.

Grandeza	Unidade	Valor
Gravidade (m/s ²)	g	9,81
Temperatura superfície (K)	T _s	355,15
Temperatura do ar (K)	T _∞	305,15
Coefficiente de expansão térmica (K ⁻¹)	β	0,00327708
Comprimento característico (m)	L	8
Velocidade do ar (m/s)	V	0,5
Viscosidade (m ² /s)	μ	0,00001589

Tabela 3.2: Dados e propriedades do ar na região das fornalhas

$$Re = \frac{V * L}{\nu} = \frac{0,5 * 8}{0,00001589} = 2,52 * 10^5$$

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sup} - T_{inf}) * L^3}{\nu^2} = \frac{9,81 * 0,003277 * (355,15 - 305,15) * 8^3}{0,00001589^2} = 3,26 * 10^{12}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{3,26 * 10^{12}}{(2,52 * 10^5)^2} = 51,43 \gg 1$$

Logo os efeitos da convecção forçada podem ser desprezados e $Nu = f(Gr, Pr)$.

Para placas verticais, o número de Nusselt pode ser calculado com a seguinte correlação:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (3.59)$$

Sendo que Ra é o número de Rayleigh e pode ser calculado da seguinte forma:

$$Ra = Gr * Pr, \quad (3.60)$$

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sup} - T_{inf}) * L^3}{\nu^2} \quad (3.61)$$

Sendo,
Gr, o número de Grashof,

B, o coeficiente de expansão térmica
 V, a viscosidade cinemática
 Pr, o número de Prandtl
 L, o comprimento característico

3.9.2 Cálculo da parcela de calor devido à radiação

$$Q_{rad} = A * h_{rad} * (T_{sup} - T_{inf}) \quad (3.62)$$

$$h_{rad} = \sigma * \varepsilon * \frac{(T_{sup}^4 - T_{inf}^4)}{(T_{sup} - T_{inf})}, \quad (3.63)$$

Sendo,

h_{rad} é o coeficiente de transferência por radiação,

σ é a constante de Stefan-Boltzmann

ε é a emissividade do meio

3.10 Diagrama de blocos do programa

Desta forma, o diagrama de blocos do programa para avaliação da eficiência da fornalha é mostrado na figura abaixo:

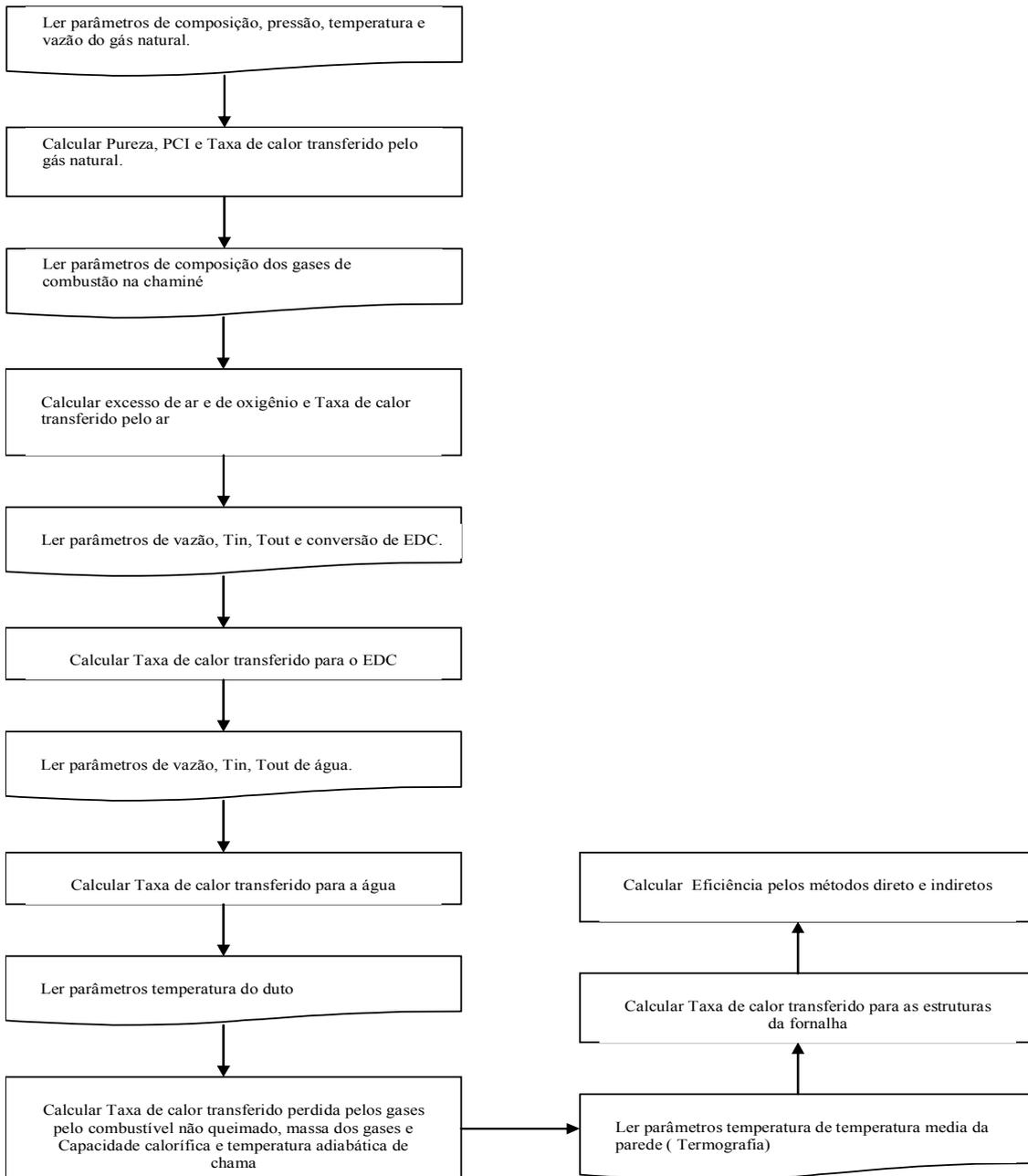


Figura 3.3: Diagrama de blocos para o cálculo de eficiência da fornalha.

3.11 Modelo proposto X Dados de Projeto

A tabela abaixo mostra os valores de projeto e as saídas do programa.

Modelo X Dados de projeto				
Variável	Projeto	Modelo	Desvio(%)	unidade
	Valor	Valor		
Excesso de ar	15	14,7	2	%
Peso molecular do gás	16,8	16,53	1,6	Kg/Kgmol
PCI	8500	8533	-0,4	Kcal/Nm3
Carga térmica AAC	1,14	1,1246	1,4	MM Kcal
Carga térmica aquecimento EDC	2,647	2,6462	0,03	MM Kcal
Carga térmica vaporização do EDC	1,369	1,372469	-0,3	MM Kcal
Carga térmica craqueamento e aquecimento da mistura	5,444	5,3189	2,3	MM Kcal
Perda de calor pela parede	2	1,9868	0,7	%
Eficiência	88,8	89	-0,2	%

Tabela 3.3: Comparação entre os dados de projeto com o Modelo.

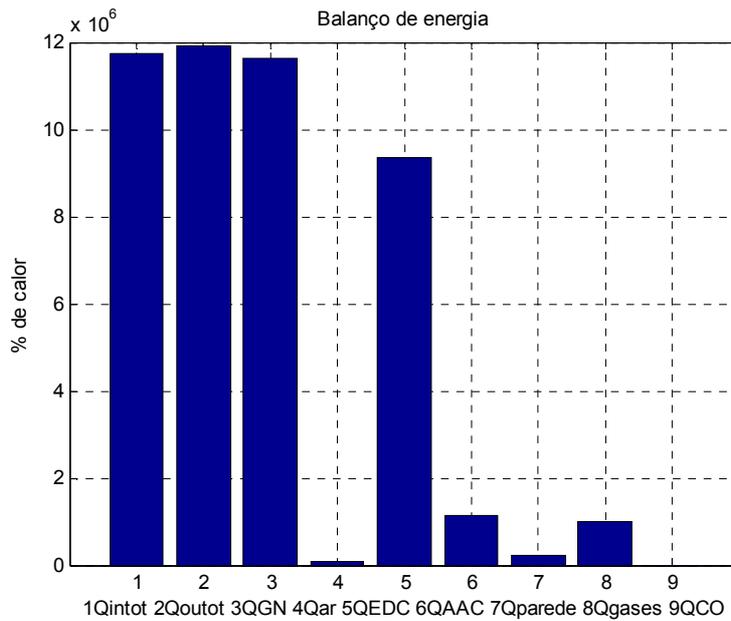


Gráfico 3.2: Avaliação das cargas térmicas com os dados de projeto.

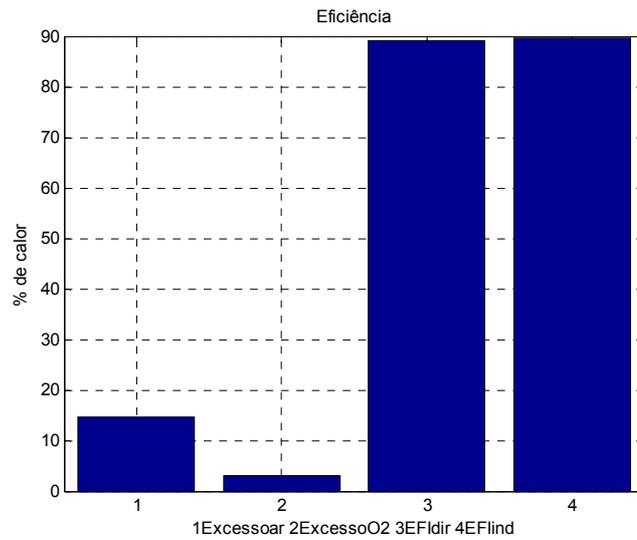


Gráfico 3.3: Avaliação do excesso de ar , oxigênio e eficiência da fornalha com os dados de projeto.

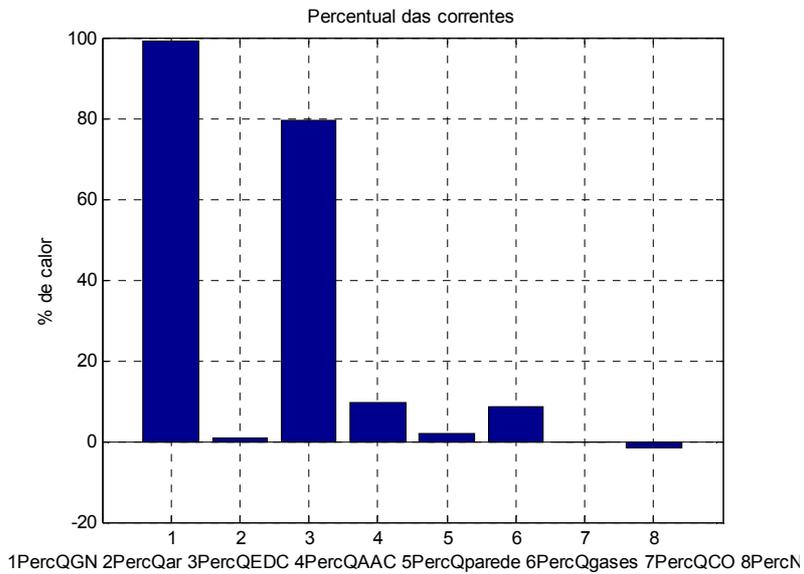


Gráfico 3.4: Avaliação do percentual de carga térmica em cada corrente com os dados de projeto.

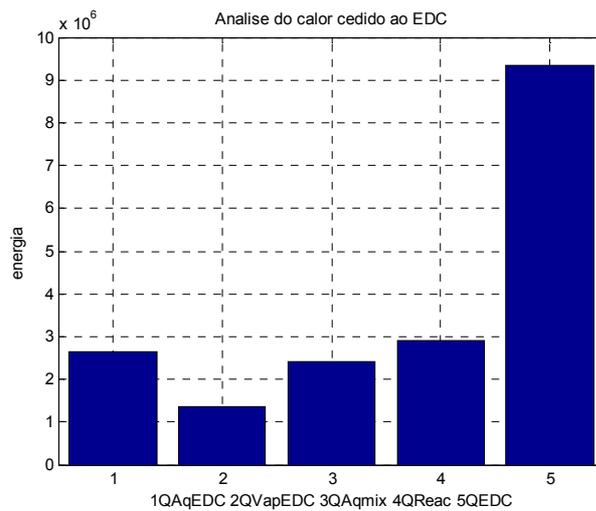


Gráfico 3.5: Avaliação da carga térmica utilizada para o fluido EDC com os dados de projeto.

3.12. Coleta de dados

Seguindo a metodologia da dissertação, foram realizadas medições de alguns parâmetros com a finalidade de obter informações para o cálculo da eficiência térmica operacional da fornalha. Foram coletados dados das seguintes variáveis:

- ❖ Vazão de alimentação de dicloroetano;
- ❖ Temperatura de entrada do dicloroetano;
- ❖ Conversão média das fornalhas;
- ❖ Pressão e temperatura do gás natural;
- ❖ Vazão do gás natural;
- ❖ Composição do gás natural;
- ❖ Vazão de água para as serpentinas de recuperação de calor;
- ❖ Temperaturas de entrada e saída de água da serpentina de recuperação de calor;
- ❖ Composição e temperatura dos gases exaustos na chaminé;
- ❖ Temperatura externa das paredes das fornalhas.

Os dados de vazão, temperatura (Exceto temperatura da parede da fornalha) e pressão foram obtidos através de instrumentos com indicação no campo ou no sistema de controle da fornalha de acordo com o desenho esquemático abaixo:

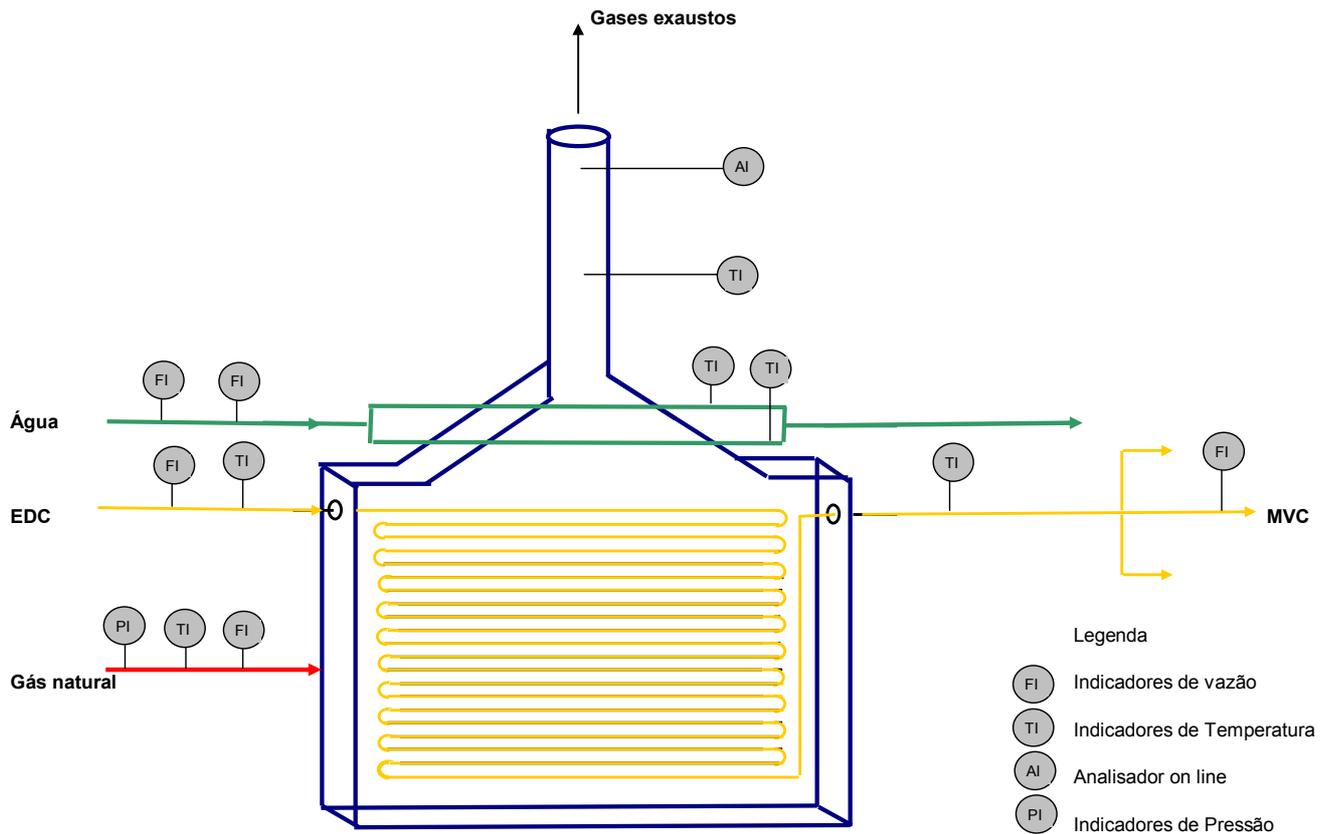


Figura 3.4: Diagrama esquemático da coleta de dados.

Para o cálculo da perda de calor pelas paredes das fornalhas, foi preciso fazer a medição da temperatura das paredes através de uma inspeção termográfica.

Para isto utilizou-se um pirômetro óptico digital com mira a laser. Admitiu-se uma emissividade de 0,7.

Desta termografia, obtiveram-se como resultados, faixas de temperatura versus % de área, e uma temperatura média das paredes da fornalha, utilizada nesta dissertação.

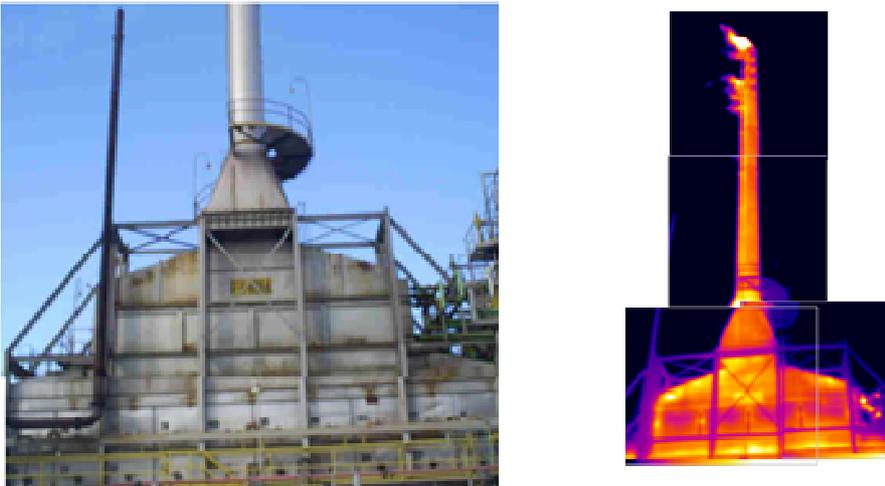


Figura 3.5: Desenho esquemático gerado pela inspeção termográfica da fornalha.

A análise da composição é realizada diariamente pela Bahiagás e disponibilizada para a Braskem através do site WWW.bahiagas.com.br.

Além desta fonte, a Braskem realiza periodicamente análise do gás natural que alimenta as fornalhas.

Nesta dissertação foram utilizados os dados fornecidos pela Bahiagás.

A composição dos gases de combustão é realizada através de um analisador on line modelo Servomex 2700TM.

As indicações disponíveis são de CO₂, CO e O₂, e os valores medidos são em base seca.

Além destes valores, são realizadas análises laboratoriais dos gases exaustos semanalmente.

Nesta dissertação foram utilizados os valores indicados no analisador on line.

A medição de temperatura é feita por um sensor, imerso na corrente gasosa na chaminé da fornalha.

Os dados foram coletados do período de 01/07/08 até 28/09/08 e se encontram no apêndice B desta dissertação.

3.13 Conclusão

- ❖ Com base nos resultados acima, conclui-se que o programa em Matlab pode ser utilizado para calcular a eficiência de combustão nas fornalhas de craqueamento da Braskem-PVC, pois o erro obtido entre a eficiência de projeto e a eficiência calculada pelo programa foi de apenas 0,2%.

- ❖ O excesso de ar nas condições de projeto foi de aproximadamente 15%;
- ❖ A perda de calor pelas paredes da fornalha foi de 1,99% da carga térmica total de entrada. Comparando com 2% estimado pela folha de dados da fornalha;
- ❖ O Diagrama de Sankey da fornalha para as condições de projeto está representado abaixo:

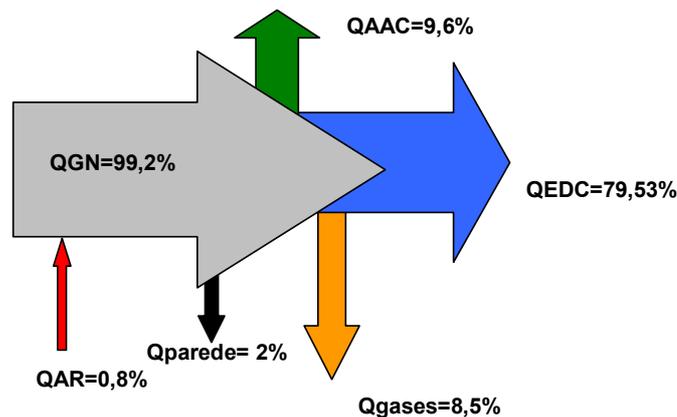


Figura 3.6: Diagrama de Sankey para as condições de Projeto da fornalha.

A eficiência térmica de um forno constitui o parâmetro de maior interesse por estar associada à redução de custos variáveis de produção.

Para o balanço de massa e energia e conseqüentemente o cálculo da eficiência da fornalha foi preciso à obtenção de um grande número de dados. Este indicador, desde que calculado sem simplificações exageradas e com dados fidedignos, permite um diagnóstico e acompanhamento operacional dos fornos em relação ao seu desempenho energético.

Para a obtenção de dados representativos é necessária a disposição de instrumentação confiável e de um grande número de pontos da mesma variável para eliminar influências de operações temporárias do forno.

Um ponto de fundamental importância também é a eliminação de possíveis fontes de infiltração de ar no forno, pois o controle de ar neste caso fica prejudicado.

A instrumentação da Braskem PVC-Ba atualmente, com alguns ajustes, possibilita a automatização do cálculo de eficiência térmica dos fornos, tornando este cálculo um importante instrumento no controle de processo.

Capítulo 4

Análise dos resultados

4

Aqui, o comportamento do modelo, frente aos dados coletados, será apresentado e analisado.

4.1. Composição do gás natural

Os resultados obtidos das análises do gás natural, realizadas pela Bahiagás no período entre 01/07/2008 e 28/09/2008, estão apresentados nos gráficos abaixo.

De um modo geral, a composição do CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , CO_2 e N_2 não apresentaram grandes variações

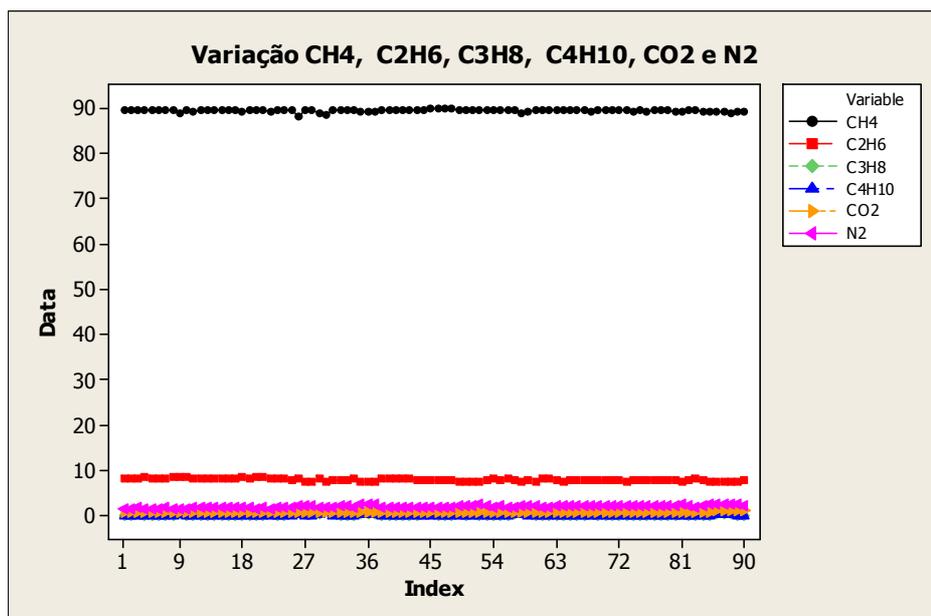


Gráfico 4.1: Análise diária da composição do gás combustível.

No entanto, quando comparado com valores de projeto, as composições volumétricas atuais mostram-se bastante diferentes.

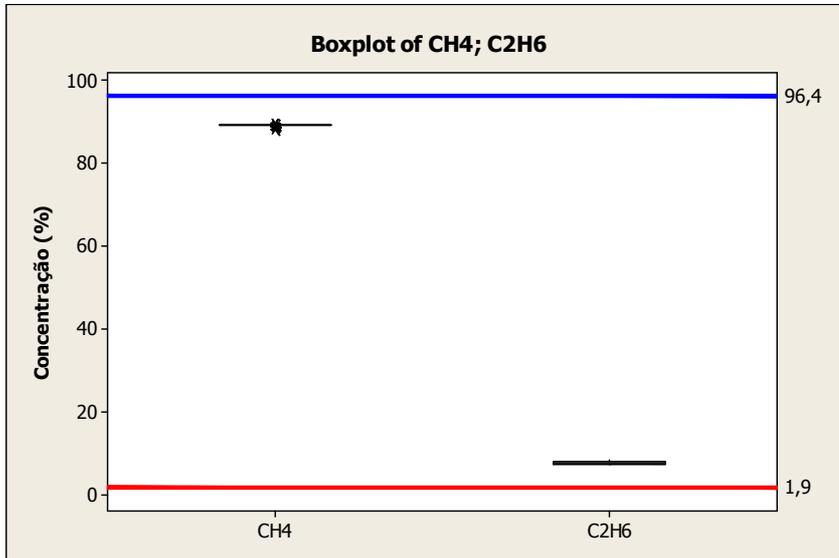


Gráfico 4.2: Gráfico comparativo da média da composição atual e de projeto do metano e propano.

Para o CH₄ a média da concentração foi de 89,46% e para o C₂H₆ foi de 7,76%. Os valores de projeto são de 96,4 e 1,9% respectivamente.

O mesmo aconteceu para N₂ e CO₂ conforme gráfico abaixo.

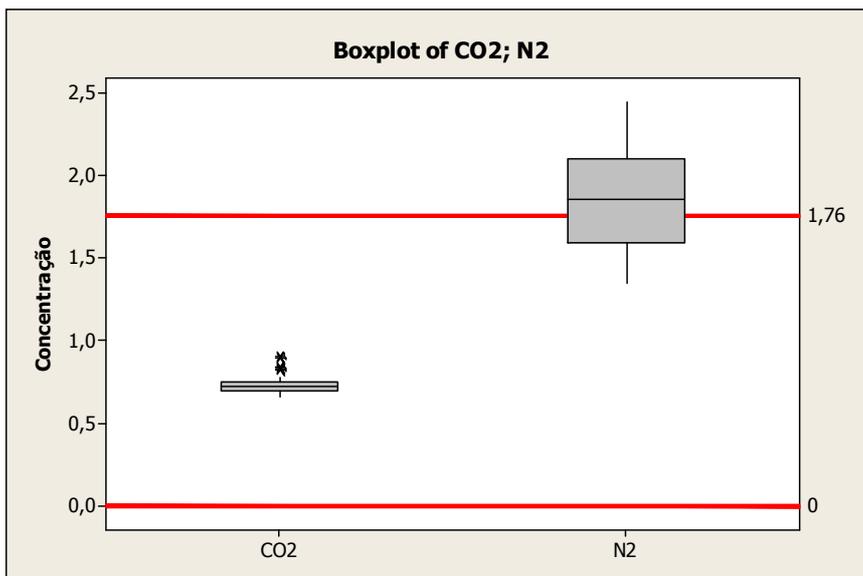


Gráfico 4.3: Gráfico comparativo da média da composição atual e de projeto do dióxido de carbono e do nitrogênio.

Percebe-se uma elevação destes compostos em relação aos valores de projeto. Enquanto o valor original para o nitrogênio era de 1,76%, os valores atuais apresentaram uma média de 1,86%.

Já o CO₂ apresentou média de 0,72%, sendo que a fornalha foi projetada para um gás combustível isento deste composto.

Os demais compostos não apresentaram alterações significativas em relação aos valores para os quais a fornalha foi projetada.

4.2. Análise das perdas térmicas da fornalha

As perdas térmicas foram determinadas com a fornalha operando em regime permanente.

As perdas levadas em consideração pelo modelo foram:

- ❖ Perdas pelo combustível não queimado;
- ❖ Perdas pelas estruturas da fornalha;
- ❖ Perdas pelos gases exaustos na chaminé.

A temperatura dos gases na chaminé apresentou valores acima do valor especificado pelo projeto conforme gráficos abaixo.

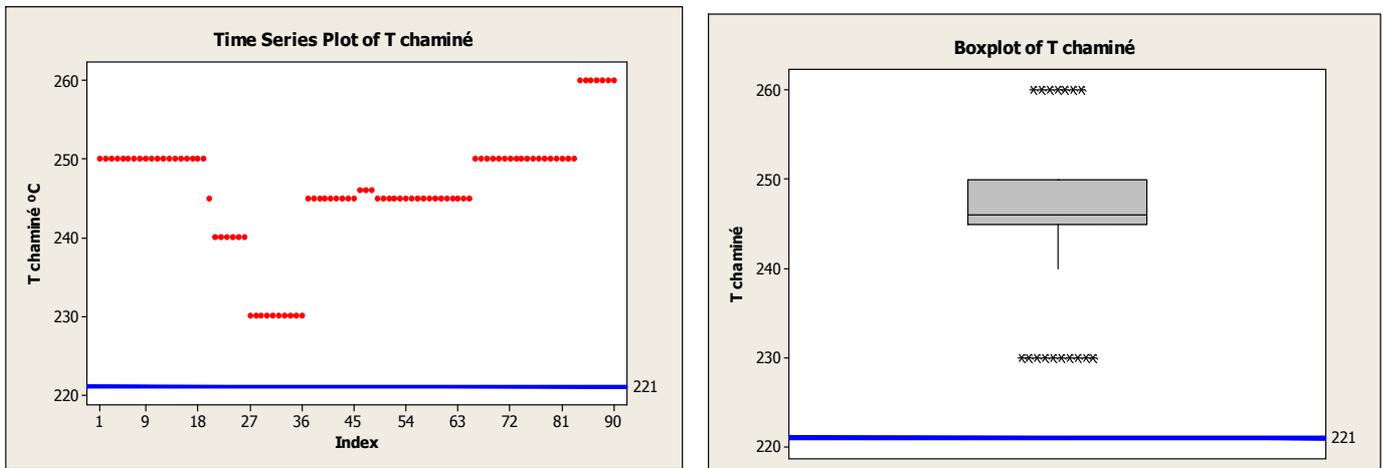


Gráfico 4.4: Gráficos do comportamento da temperatura da chaminé e comparativo da média atual e de projeto.

Enquanto o valor especificado para a temperatura da chaminé é de 221 °C, a média encontrada foi de 246°C.

A perda térmica mais relevante na fornalha foi a perda ocasionada pelos gases exaustos na chaminé, representando em média 9,55%. Estas perdas foram calculadas utilizando a temperatura média dos gases exaustos mostrada acima.

A perda pelas estruturas da fornalha apresentou valor médio de 2,86%, enquanto que a perda pelo combustível não queimado apresentou valor desprezível de 0,0018%.

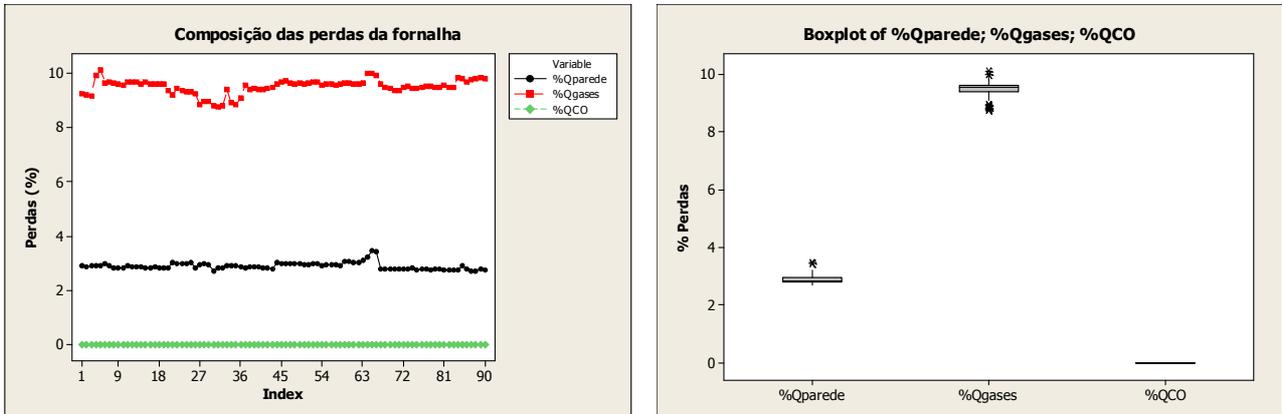


Gráfico 4.5: Gráficos das perdas térmicas da fornalha.

4.3. Avaliação das parcelas de energia do sistema

Foram avaliadas as parcelas de entrada e saída de energia do sistema.

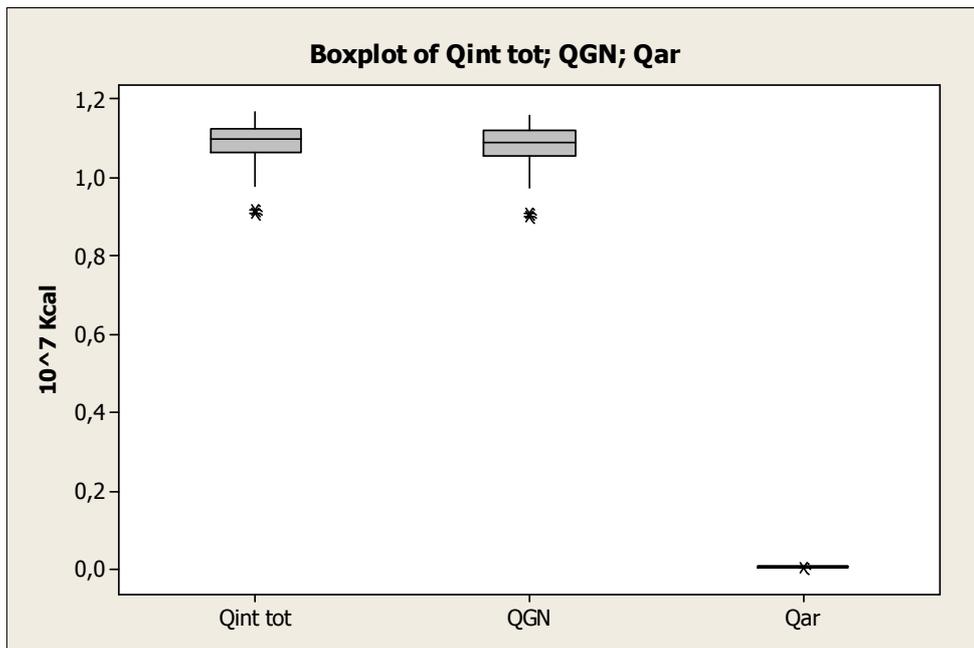


Gráfico 4.6: Gráfico das parcelas de entrada de energia na fornalha.

A parcela de calor proveniente do queima do gás natural representou quase que a totalidade da carga térmica de entrada para o volume de controle, totalizando 99,18%.

A carga térmica proveniente do ar representou 0,72% em média.

A carga térmica absorvida pela carga (EDC) apresentou valor médio de 72,56%.

A carga térmica absorvida pela água na zona de convecção apresentou valor de 6,42%.

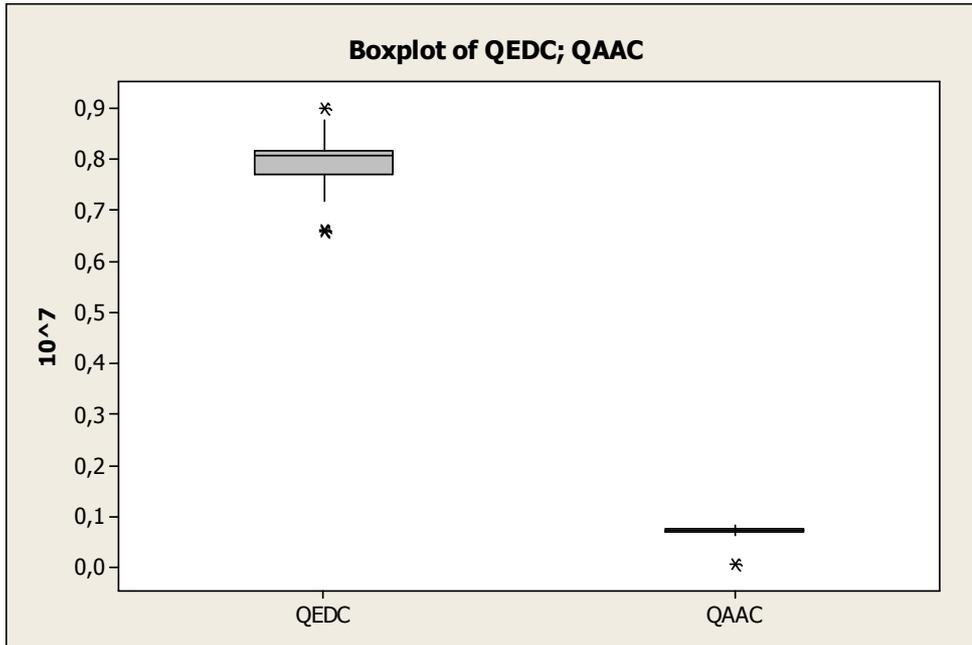


Gráfico 4.7: Gráfico das parcelas de calor absorvido pelas cargas de EDC e de água.

Para a carga térmica absorvida pelo EDC, o perfil está mostrado abaixo.

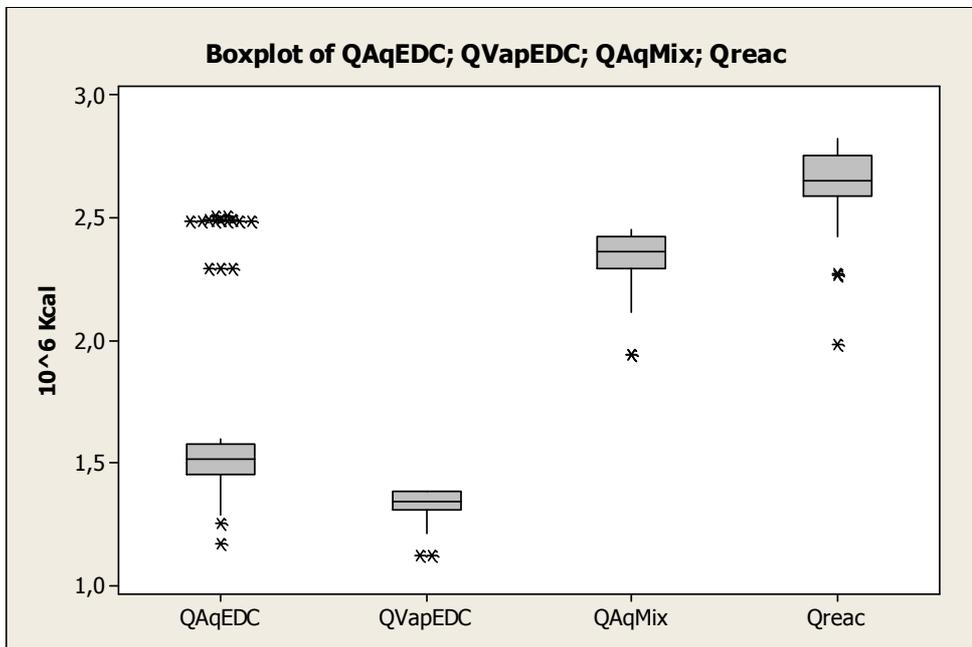


Gráfico 4.8: Gráfico das etapas de craqueamento do EDC.

A etapa que tem a maior necessidade de carga térmica é a carga necessária para o craqueamento.

4.4. Cálculo da eficiência pelos métodos direto e indireto

Para o cálculo da eficiência pelos métodos direto e indireto, levou-se em consideração o período de funcionamento em regime permanente.

Foi encontrada uma diferença entre os métodos direto e indireto conforme gráfico abaixo

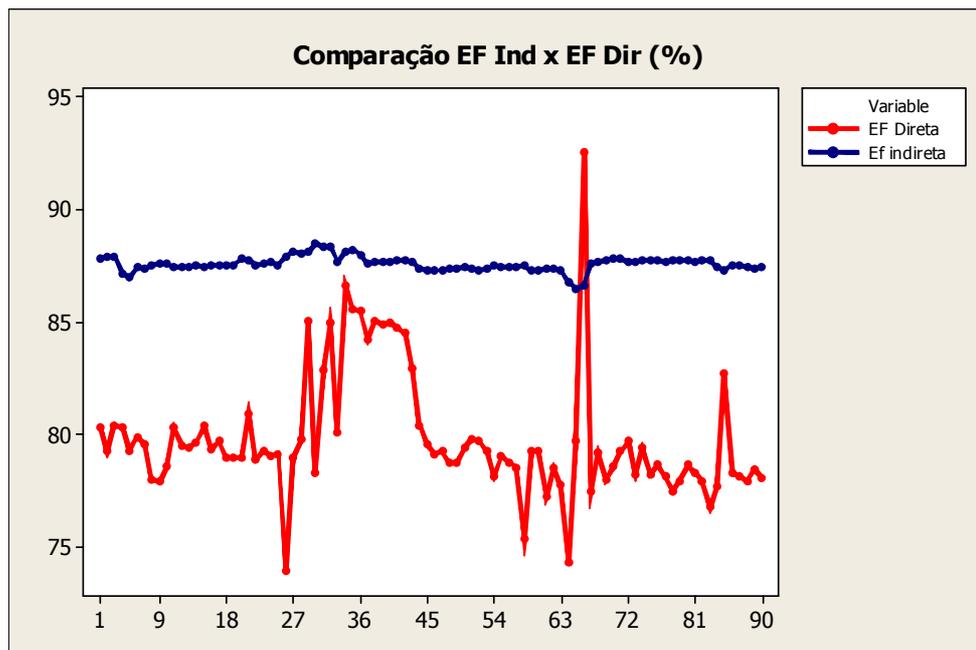


Gráfico 4.9: Gráfico comparativo da eficiência calculada pelos métodos direto e indireto.

Enquanto a eficiência indireta apresentou valores com média de 87,6%, a eficiência indireta apresentou valores com média de 79,26%.

Esta diferença pode ser explicada pela não contabilização de outras perdas no método da eficiência indireta, vazamentos de gás natural ou erros nos instrumentos de vazão de gás natural e água e da temperatura da chaminé.

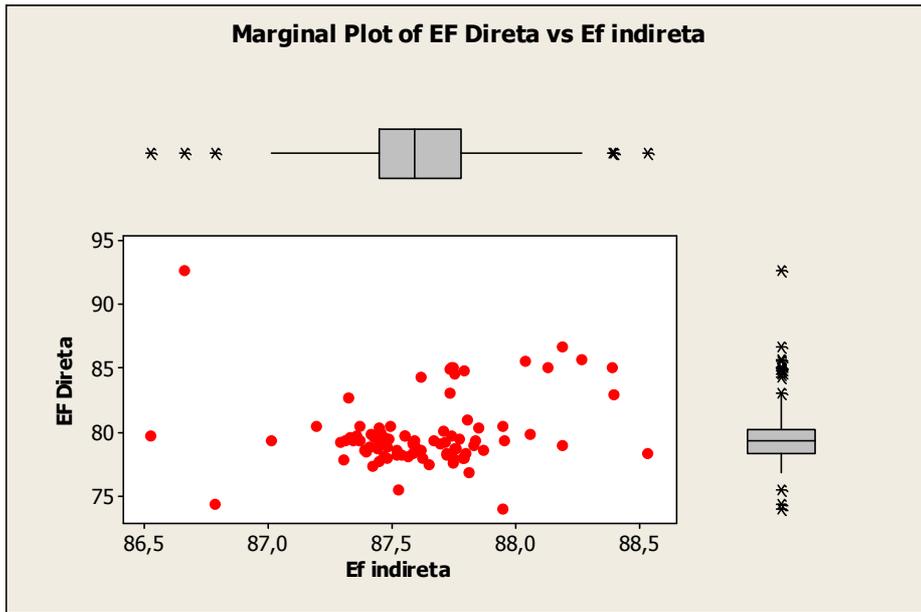


Gráfico 4.10: Gráfico comparativo das médias dos valores de eficiência.

Percebeu-se uma aproximação entre os valores pelos métodos direto e indireto quando o sistema de pré - aquecimento de carga EDC esteve fora de operação. Este fato pode ser explicado pelo aumento na carga térmica absorvida pelo EDC para o seu aquecimento.

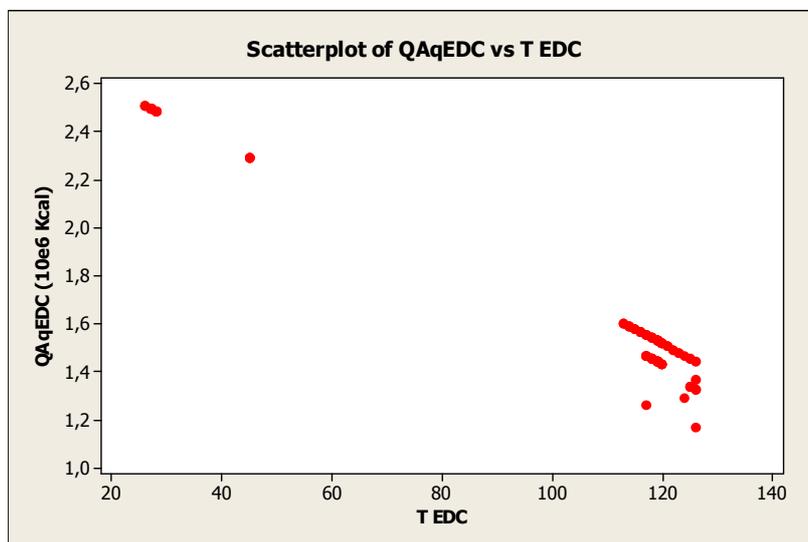


Gráfico 4.11: Gráfico comparativo da carga térmica absorvida pelo EDC em função da temperatura de entrada.

Pelo método indireto, percebe-se que a média dos valores calculados está acima do valor garantido pelo fabricante, mas está abaixo da eficiência calculada para as condições de projeto.

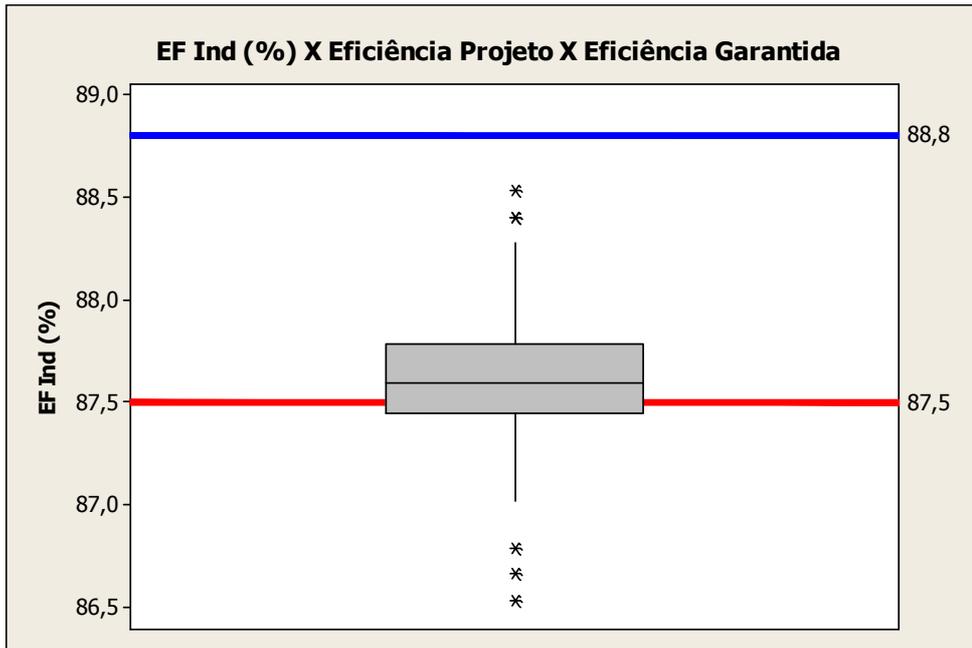


Gráfico 4.12: Gráfico da eficiência atual, calculada e garantida pelo projeto.

4.5. Avaliação da eficiência com a variação do excesso de ar

Foi avaliado também o comportamento da eficiência indireta com a variação do excesso de ar. Com a elevação do excesso de ar houve uma redução da eficiência térmica da fornalha, sendo que os valores mais elevados de eficiência se concentraram numa região entre 3 e 4% de excesso de ar.

Este fato pode ser explicado pelo fato de que, com altas faixas de excesso de ar, existe uma perda de calor utilizada para aquecer esta massa adicional de ar, enquanto que, para baixíssimas faixas de excesso de ar, ocorre uma emissão de monóxido de carbono, ou seja, combustível não queimado.

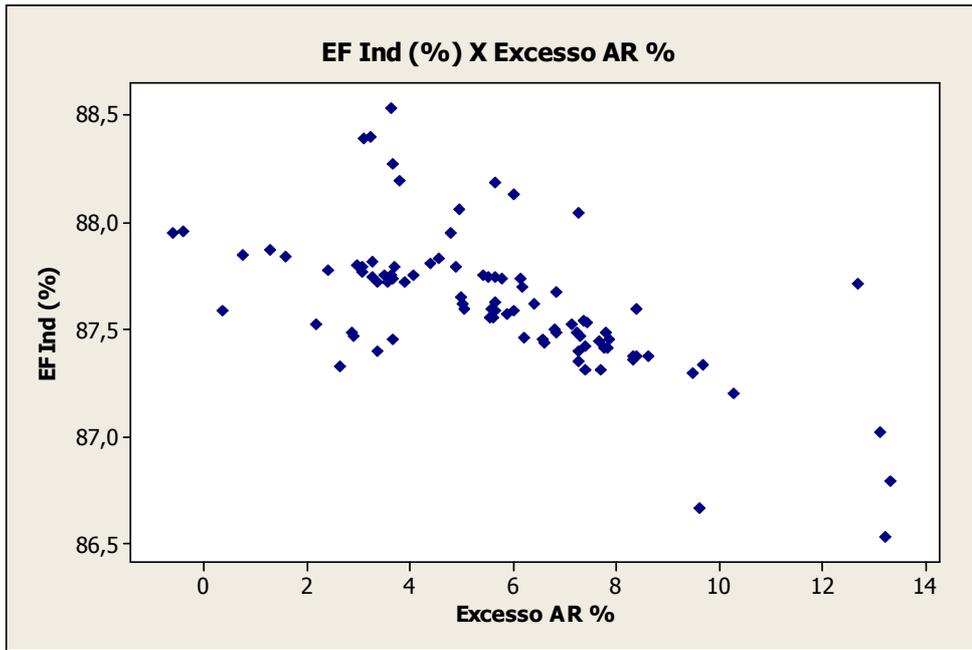


Gráfico 4.13: Gráfico da eficiência em função do excesso de ar.

4.6. Avaliação do gás de Manati

Foi feita uma simulação utilizando a composição do gás de Manati (Tabela 2.4) para os dados de composição de projeto da fornalha, utilizando o modelo proposto. Os valores comparativos estão sumarizados na tabela abaixo.

	%CH ₄	%C ₃ H ₆	%C ₃ H ₈	%C ₄ H ₁₀	%CO ₂	%N ₂	Qint tot (10 ⁷)Kcal	QGN (10 ⁷)Kcal	Qgases(10 ⁷) Kcal	%Qgases	PCI (Kcal/Nm ³)
Manati	88,6	3,8	1,5	0,0	0,4	5,8	1,157	1,147	0,103	8,9	8480,0
Projeto	96,4	1,9	0,0	0,0	0,0	1,8	1,174	1,164	0,099	8,5	8533,0
Delta (%)	-8,1	103,2	7400,0	-	-	229,5	-1,4	-1,5	3,9	5,4	-0,6

Tabela 4.1: Tabela comparativa Manati x Projeto.

Caso o gás utilizado tivesse a composição do gás de Manati, seria necessária uma maior vazão de combustível para prover o equipamento de carga térmica suficiente para atingir a conversão de 55%.

Foi verificada também uma elevação na perda de carga térmica pelos gases exaustos (3,9%) e uma redução do PCI (0,6%).

Capítulo 5

Conclusão

5

Este trabalho foi realizado na Braskem-PVC em convênio com a Universidade Federal de Campina Grande.

Foi avaliada a fornalha B utilizando os métodos de cálculo direto e indireto para avaliação da eficiência da fornalha.

A primeira parte deste trabalho foi à construção de um programa computacional capaz de avaliar a fornalha em termos de eficiência. Esta primeira parte foi validada utilizando os valores originais de projeto do equipamento. Chegou-se a conclusão que o programa representa satisfatoriamente o sistema, pois os valores obtidos de eficiência diferiam da folha de dados em 0,2%. O mesmo aconteceu para as demais variáveis conforme mostrados na tabela 5.2.

A segunda parte do trabalho foi a utilização do programa, previamente validado na primeira parte, para avaliar a fornalha com os valores operacionais atuais.

Nesta etapa, foram coletados dados do período entre 01/07/08 a 28/09/08.

Foram avaliadas a eficiência pelos métodos direto e indireto, as perdas de calor, e o excesso de ar e oxigênio.

5.1. Conclusões

Pelas análises de desempenho da fornalha, chegou-se as seguintes conclusões:

- ❖ A faixa de excesso de ar que conferiu a maior eficiência é entre 3 e 4%;

- ❖ A diferença entre o rendimento calculado pelo método direto e indireto, 79,26% e 87,6% respectivamente, foi de 9,5%. O Método indireto é menos dependente de variáveis determinadas com imprecisão alta, por isto o valor 87,6% é mais confiável. No cálculo do rendimento pelo método direto, é provável que a estimativa da conversão não seja adequada visto que a totalização do MVC não é feita para cada forno separadamente;
- ❖ A parcela de calor desprendida pelos gases exaustos constitui a maior parcela de perda de energia térmica nas fornalhas de craqueamento da Braskem-PVC. Para efeito de eficiência, a perda térmica devido ao combustível não queimado pode ser desprezada;
- ❖ A elevada temperatura das paredes externas do forno em determinadas regiões mostram a necessidade de reformas no isolamento para a redução de perda de energia e evitar o comprometimento das estruturas do forno. A perda de calor média pelas estruturas da fornalha foi de 2,86%%, enquanto a perda de projeto é de 2%. Vale ressaltar que a temperatura média da parede utilizada nesta dissertação foi de 95°C e que pela inspeção termográfica realizada em Junho/08 existiam pontos com temperatura de 130°C.
- ❖ A parcela de recuperação de calor pela água na zona de convecção está muito abaixo do valor de projeto. Mesmo quando a temperatura e vazão de entrada da água estão acima das estabelecidas pela folha de dados, a recuperação de calor não é satisfatória. Isto sugere que, as serpentinas desta zona estão necessitando de limpeza para uma maior efetividade na recuperação de calor, aumentando a eficiência da fornalha.
- ❖ A simulação realizada com o gás natural da bacia de Manati mostrou que é esperada uma elevação de aproximadamente 1,4% no consumo de gás natural para prover a mesma carga térmica para o equipamento. Isto se deve a redução no poder calorífico

do gás de Manati, 0,62% e uma elevação de 4,0% na carga térmica perdida pelos gases exaustos, causados pelo alto teor de nitrogênio no gás.

- ❖ É necessária a instalação de indicadores de pressão (Transmissores de pressão ou manômetros) na fornalha para avaliar a depressão da mesma. Depressões muito altas podem contribuir para a entrada de ar na fornalha pelas frestas de entrada de ar secundário e/ou pelas janelas de inspeção mal vedadas. Este ar não participa efetivamente da combustão ou então reage em locais inadequados. Isto explicaria a presença de Monóxido de Carbono na chaminé mesmo em dias nos quais foi evidenciado alto excesso de oxigênio;
- ❖ O programa para o cálculo da eficiência pode ser implementado no SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) utilizado na Braskem-PVC. Para isto as variáveis que já não possuem indicação no SDCD podem ser consideradas constantes visto que não houve grandes variações nos seus valores médios. As variáveis que não possuem indicação no painel estão sumarizadas na tabela abaixo com os valores das médias, desvio padrão e faixa para intervalo de confiança de 95%.

Variável	Unidade	Média	Desvio Padrão	Faixa para 95% de CI
CH4	%	89,43	0,24	(89,222; 89,636)
C2H6	%	7,81	0,303	(7,603; 8,016)
C3H8	%	0,11	0,17	(-0,101; 0,312)
C4H10	%	0,06	0,09	(-0,143; 0,270)
CO2	%	0,73	0,05	(0,521; 0,934)
N2	%	1,86	0,29	(1,658; 2,071)
T GN	°C	21,6	0,9	(21,416; 21,829)
P GN	kgf/cm2	8,5	0	(8,293; 8,707)
T In H2O	°C	104,1	1,1	(103,882; 104,295)

Tabela 5.1: Tabela das médias das variáveis sem indicação no SDCD.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

No intuito de melhorar o acompanhamento e eficiência térmica das fornalhas, as seguintes sugestões são apresentadas:

- ❖ Utilizar o modelo para realizar otimização nas fornalhas de craqueamento da Braskem-PVC;

- ❖ Realizar estudo verificando a influência de promotores e inibidores de conversão no rendimento das fornalhas;
- ❖ Modelar o perfil de temperatura tanto no interior quanto nas paredes da fornalha visando alcançar um valor mais representativo para a perda de calor pelas estruturas da fornalha;
- ❖ Acoplar um modelo para determinação da conversão da reação de craqueamento do 1,2 EDC.

Referências Bibliográficas

INCROPERA, F. P., De Witt, D. P., 1998, “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, LTC 4ª Edição, Rio de Janeiro

PERRY R.E.; CHILTON, C.H., eds., 1973, “**Chemical Engineers' Handbook**”, McGraw-Hill Book Company

SOUZA, E.J.J., 2003, “**Combustão Industrial - Combustíveis e Emissões**”, 7ª ed, Curso de Utilizações do Gás Natural II, UFRGS, Porto Alegre.

FERREIRA, H. S., LOPES, M. F. S.. **Simulação de uma fornalha industrial para o craqueamento térmico do 1,2-Dicloroetano**. Anais Assoc. Brás. Quím., 46(2), 125-131, 1997.

AMORIM, M. F.. **Modelagem de fornos de pirólise - Previsão do tempo de campanha**. Tese da Universidade Federal da Bahia, 2001.

TEIXEIRA, F.N – **Suprimento energético para termelétricas**;

PINHEIRO, P.C.C., CERQUEIRA, S.A. – **Método de Cálculo do balanço térmico de caldeiras**.

PINHEIRO, P.C.C., Valle, M.R. – **Controle de Combustão: Otimização do excesso de ar**. UFMG, Belo Horizonte, 1995

PINHEIRO, P.C. C – **O gás natural e sua utilização em equipamentos térmicos**, SEMINÁRIO DE GERENCIAMENTO ENERGÉTICO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA, Guarulhos, São Paulo, 1996

YANAGIRA, I.J - **Máquinas Térmicas: Fornalhas**. USP, São Paulo;

HUMBERTO, J.J. -**Combustão e combustíveis**, UFSC, 2004

NOGUEIRA, L.A., NOGUEIRA, H, F. ROCHA, C. – **Eficiência energética no uso de vapor – Eletrobrás** – Rio de Janeiro, 2005

BRESOLIN, S, C.- Verificação experimental do processo de combustão em um aquecedor instantâneo

MOREIRA, B.C.L. - Avaliação de aspectos ambientais da geração de energia através de termelétricas a gás natural. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

GORNI, A.; PEREIRA, M; FIALHO, R; PFEITSTICKER, G; SIVA, L; FREIRE, P – Análise do desempenho de fornos para a laminação e tratamento térmico através de balanço térmico, Trabalho apresentado ao XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6 a 8 de agosto de 2002, São Paulo SP.

RIBEIRO, R.A.A. - Influencia da qualidade do carvão e das condições operacionais no processo de combustão de uma usina termelétrica. 2002. Dissertação (Mestrado) – EFSC-Santa Catarina

SANTOS, G. – Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado a industria de cerâmica vermelha , 2001, dissertação de mestrado – EFSC- Santa Catarina

BRANCO, F. – Análise termo econômica de uma usina termelétrica a gás natural operando em um ciclo aberto e em ciclo combinado, 2005, dissertação de mestrado – Universidade estadual Paulista

KAWAGUTI, W. – Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo “Paulistinha” utilizados na industria de cerâmica vermelha, 2004, dissertação de mestrado-EFSC-Santa Catarina

Likins Jr, M.R. – Monitoring and Control of a Furnace-, 1989, United Sates Patent.

Jonhson, R.K.; Kaia, A.; Keyes, M.A.; Moss, W.H. – Steam Generator On Line Efficiency Monitor – 1987, United States patents

Sheffield,R.E.; Chew, R.L.; Cutler,C.R. – Method for Optimizing The Position of a Furnace Damper Without Flue Gas Analyzers – 1977, Unitet States patent

Shigemura,M.S. – Method and Apparatus for Control of Efficiency of Combustion in a Furnace– 1979, Unitet States patent

Foley,P.J. – Means and Methods fo Optimizing Efficiency of Furnaces, Boilers ,Combustions Ovens and Stoves and the Like– 1987, Unitet States patent

Ross,C.W. – Optimizing Combustion Air Flow– 1985, Unitet States patent

Magalhães,E.A. – Desenvolvimento e Análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando Biomassa Polidispersa , 2007 – Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa,


```

%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da
%Braskem-PVC-Ba
%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos
%Módulo 1:Cálculo da carga térmica proveniente do gás natural(QGN)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
display('Rotina 1:Cálculo da carga térmica proveniente do gás natural(QGN)')
display('Iniciar digitando a Composição do Gás natural')
CH4=input('Digite a Composição do metano em %: ');
C2H6=input('Digite a Composição do etano em %: ');
C3H8=input('Digite a Composição do propano em %: ');
C4H10=input('Digite a Composição do butano em %: ');
CO2=input('Digite a Composição do dióxido de carbono em %: ');
N2=input('Digite a Composição do nitrogênio em %: ');
%Cálculo da pureza do Gás natural
P=(100-N2-CO2)/100
%Cálculo do PCI da Mistura Gasosa
PCImet=8557; %Kcal/NM3 Dados obtidos do Smith Van Ness pg 44 3 Th edition
PCIet=15228.2;
PCIprop=21799.4;
PCIbut=28337.6;
PCIIGN=(CH4*PCImet+C2H6*PCIet+C3H8*PCIprop+C4H10*PCIbut)/100
VGN=input('Digite a vazão de gás natural pelo FR-1405 em Nm3/h: ');
TGN=input('Digite a temperatura de gás natural pelo TG1413 em Celsius: ');
PGN=input('Digite a pressão de gás natural pelo PG1425 em Kgf/cm2: ');
PMmet= 16.04;
PMet= 30.7;
PMprop=44.09;
PMbut= 58.12;
PMCO2=44.01;
PMN2= 28.02;
PMMGN=(CH4*PMmet+C2H6*PMet+C3H8*PMprop+C4H10*PMbut+CO2*PMCO2+N2*PMN2)/
100

```

%Correção de pressão e temperatura para o Gás natural do forno A

%Dados de projeto da placa de orifício:

PpjA=7.61;%Kgf/cm2g

TpjA=25;%Celsius

PMpjA=16.8;%

FatA=(TpjA+273.15)/(PpjA+1.033)/PMpjA;

VGNC=VGN*(((PGN+1.033)/(TGN+273.15))*PMGN*FatA)^(0.5);%Nm3/h

VGNCI=VGNC/22.41; %Kmol/h 1 Kmol=22.41 Nm3

VCH4=VGNCI*CH4/100;

VC2H6=VGNCI*C2H6/100;

VC3H8=VGNCI*C3H8/100;

VC4H10=VGNCI*C4H10/100;

QGN=VGNC*PCIGN*P % Esta é a carga térmica desprendida pelo gás natural

%XX

%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da

%Braskem-PVC-Ba

%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos

%Módulo 2: Balanço total de massa na Fornalha

%(Qar)

%XX

display('Rotina 2: Balanço de massa na fornalha')

display('Reação de combustão do Metano : 1 CH4 + 2 O2 -> 1 CO2 + 2 H2O')

display('Reação de combustão do Etano : 1 C2H6 + 3.5 O2 -> 2 CO2 + 3 H2O')

display('Reação de combustão do Propano : 1 C3H8 + 5 O2 -> 3 CO2 + 4 H2O')

display('Reação de combustão do Butano : 1 C3H8 + 6.5 O2 -> 4 CO2 + 5 H2O')

O2chamine=input('Digite a Composição de oxigênio na chaminé pelo AI-1401A em %: ');

COchamine=input('Digite a Composição de monóxido de carbono na chaminé pelo AI-1402A em %: ');

CO2chamine=input('Digite a Composição de dióxido de carbono na chaminé em %: ');

$$N2chamine=(100-O2chamine-COchamine-CO2chamine);$$

$$\%base=100Kmol$$

%calculo da fração molar

$$O2cha100=100*O2chamine/100;$$

$$COcha100=100*COchamine/100;$$

$$CO2cha100=100*CO2chamine/100;$$

$$N2cha100=100*N2chamine/100;$$

$$NTchamine=O2cha100+COcha100+CO2cha100+N2cha100;$$

$$XO2cha=O2cha100/NTchamine;$$

$$XCOcha=COcha100/NTchamine;$$

$$XCO2cha=CO2cha100/NTchamine;$$

$$XN2cha=N2cha100/NTchamine;$$

%Balanço do Carbono para as reações

$$Carbonin=(VGNCI*CH4/100)+(VGNCI*2*C2H6/100)+(VGNCI*3*C3H8/100)+(VGNCI*4*C4H10/100)+(VGNCI*1*CO2/100);$$

%Calculo da vazão real dos gases exaustos:

$$\%COcha100+CO2cha100 \text{ ----- } 100 \text{ Kgmol de gases exaustos}$$

$$\% \text{ Carbonin -----Vazão real Kgmol}$$

$$Gasexausto=Carbonin*100/(COcha100+CO2cha100); \%=Vazão real dos gases exaustos$$

%Vazão real dos gases exaustos

$$O2chareal=Gasexausto*XO2cha;$$

$$COchareal=Gasexausto*XCOcha;$$

$$CO2chareal=Gasexausto*XCO2cha;$$

$$N2chareal=Gasexausto*XN2cha;$$

$N2reacao=N2chareal-VGNCI*N2/100;$ % N2 que entra na reação com oxigenio - N2 que entra no gás natural

%Calculo do Oxigênio real para a reação

```

O2real=N2reacao*21/79;
Areal=N2reacao+O2real;
VO2met=VGNCI*CH4*2/100;
VO2et=VGNCI*C2H6*3.5/100;
VO2prop=VGNCI*C3H8*5/100;
VO2but=VGNCI*C4H10*6.5/100;
VO2est=(VO2met+VO2et+VO2prop+VO2but);%Kmol/h
VN2met=VO2met*3.76;
VN2et=VO2et*3.76;
VN2prop=VO2prop*3.76;
VN2but=VO2but*3.76;
VN2est=VN2met+VN2et+VN2prop+VN2but;
Arest=VO2est+VN2est; %Kgmol/h
Varestton=Arest*28.84*1000/1000000; %Vazão do ar estequiometrico em ton/h
Excessoar=((Areal-Arest)/Arest)*100
ExcessoO2=Excessoar*0.21

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da
%Braskem-PVC-Ba
%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos
%Módulo 3:Cálculo da carga térmica proveniente do ar que entra na fornalha
%(Qar)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

display('Rotina 3:Cálculo da carga térmica proveniente do ar que entra na fornalha(Qar)')
%Cálculo da entalpia do ar para a fornalha
%constantes para o Cálculo do Delta H Obtidos do Prausnitz Sherwood
%terceira edição - The properties of gases and liquids
%Constantes Nitrogênio
AN2=7.44;
BN2=-0.324*10^(-2);

```

```

CN2=-6.4*10^(-6);
DN2=-2.79*10^(-9);
%Constantes Oxigênio
AO2=6.713;
BO2=-0.879*10^(-6);
CO2=-4.170*10^(-6);
DO2=-2.544*10^(-9);
TGNK=TGN+273.15;
DeltaHN2=TGNK*(AN2+TGNK*(BN2/2+TGNK*(CN2/3+DN2*TGNK/4)))-
(273.15*(AN2+273.15*(BN2/2+273.15*(CN2/3+DN2/4))));
DeltaHO2=TGNK*(AO2+TGNK*(BO2/2+TGNK*(CO2/3+DO2*TGNK/4)))-
(273.15*(AO2+273.15*(BO2/2+273.15*(CO2/3+DO2/4))));

```

```

Qar=N2reacao*DeltaHN2+O2real*DeltaHO2 %Kcal/h

```

```

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da

```

```

%Braskem-PVC-Ba

```

```

%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos

```

```

%Módulo 4:Cálculo da carga térmica Cedida ao Produto (QEDC)

```

```

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

display('Rotina 4:Cálculo da carga térmica cedida ao produto(QEDC)')

```

```

%Calculo da energia para aquecer o EDC

```

```

FEDCA=input('Digite a vazão do Dicloroetano pelo FC-1403 em t/h: ');

```

```

TinEDC=input('Digite a temperatura do Dicloroetano pelo TI-1460 em Celsius: ');

```

```

Xmedio=input('Digite a conversão média do EDC em %: ');

```

```

QAqEDC=FEDCA*0.39*(245-TinEDC)*1000

```

```

QVapEDC=FEDCA*44.5*1000 %Calor latente do EDC = 44.5 Kcal/Kg Data sheet do forno

```

```

ToutEDC=input('Digite a temperatura do Dicloroetano,MVC e HCl pelo TC-1404 em Celsius: ');

```

```

%reação 1 C2H4Cl2-->1 HCl+1 C2H3Cl:

```

```

nEDCin=FEDCA*1000/99 ; %em Kgmol

```

```

nEDCout=nEDCin*(100-Xmedio)/100;
nHClout=nEDCin*Xmedio/100;
nMVCout=nEDCin*Xmedio/100;
mEDCout=nEDCout*99;
mHClout=nHClout*36.5;
mMVCout=nMVCout*62.5;
QEDCout=mEDCout*0.3*(ToutEDC-245);
QHClout=mHClout*0.202*(ToutEDC-245);
QMVCout=mMVCout*0.387*(ToutEDC-245);
QAqmix=QEDCout+QHClout+QMVCout
QReac=(FEDCA*1000-mEDCout)*170.8 %Calor da reação 1 C2H4Cl2-->1 HCl+1
C2H3Cl:170.8Kcal/Kg
QEDC=QAqEDC+QVapEDC+QAqmix+QReac

```

```

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da
%Braskem-PVC-Ba
%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos
%Módulo 5:Cálculo da carga térmica Cedida ao economizador (QAAC)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

display('Rotina 5:Cálculo da carga térmica Cedida ao economizador (QAAC)')
FAAgua=input('Digite a Vazão de agua para a fornalha A pelo FI-1450 em t/h: ');
TinAAC=input('Digite a temperatura de entrada de água na pelo TG-1702 em Celsius: ');
ToutAAC1=input('Digite a temperatura de saída de água na pelo TI-1001_66 em Celsius: ');
ToutAAC2=input('Digite a temperatura de saída de água na pelo TI-1001_67 em Celsius: ');
ToutAAC=(ToutAAC1+ToutAAC2)/2;
CpWin=0.00000002*TinAAC^3-0.000006*TinAAC^2+0.001*TinAAC+0.9523;
CpWout=0.00000002*ToutAAC^3-0.000006*ToutAAC^2+0.001*ToutAAC+0.9523;
Cpmedio=(CpWin+CpWout)/2
QAAC=FAAgua*1000*Cpmedio*(ToutAAC-TinAAC)

```

```
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
```

```
%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da
```

```
%Braskem-PVC-Ba
```

```
%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos
```

```
%Módulo 6:Cálculo da carga térmica Perdida pelos gases exaustos (Qgases)
```

```
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
```

```
display('Rotina 6:Cálculo da carga térmica perdida pelos gases exaustos(Qgases)')
```

```
TdutoA=input('Digite a temperatura do duto pelo TG-1490 em Celsius: ');
```

```
TdutoAK=TdutoA+273.15;
```

```
%balanço molar para formação de H2O;
```

```
VH2Omet=VGNCI*CH4*2/100;
```

```
VH2Oet=VGNCI*C2H6*3/100;
```

```
VH2Oprop=VGNCI*C3H8*4/100;
```

```
VH2Obut=VGNCI*C4H10*5/100;
```

```
VH2Ogases=VH2Omet+VH2Oet+VH2Oprop+VH2Obut; %Kgmol/h
```

```
%Constantes Monóxido de carbono CO
```

```
ACO=7.373;
```

```
BCO=-0.307*10(-2);
```

```
CCO=6.662*10(-6);
```

```
DCO=-3.037*10(-9);
```

```
%Constantes Dióxido de carbono CO2
```

```
ACO2=4.728;
```

```
BCO2=1.754*10(-2);
```

```
CCO2=-1.338*10(-5);
```

```
DCO2=-4.097*10(-9);
```

```
%Constantes Água H2O
```

```
AH2O=4.728;
```

$$\text{BH}_2\text{O}=1.754*10^{(-2)};$$

$$\text{CH}_2\text{O}=-1.338*10^{(-5)};$$

$$\text{DH}_2\text{O}=-4.097*10^{(-9)};$$

%Cálculo da entalpia dos gases de combustão

$$\text{DeltaHN}_2\text{G}=\text{TdutoAK}*(\text{AN}_2+\text{TdutoAK}*(\text{BN}_2/2+\text{TdutoAK}*(\text{CN}_2/3+\text{DN}_2*\text{TdutoAK}/4)))-$$

$$(273.15*(\text{AN}_2+273.15*(\text{BN}_2/2+273.15*(\text{CN}_2/3+\text{DN}_2/4))));$$

$$\text{DeltaHO}_2\text{G}=\text{TdutoAK}*(\text{AO}_2+\text{TdutoAK}*(\text{BO}_2/2+\text{TdutoAK}*(\text{CO}_2/3+\text{DO}_2*\text{TdutoAK}/4)))-$$

$$(273.15*(\text{AO}_2+273.15*(\text{BO}_2/2+273.15*(\text{CO}_2/3+\text{DO}_2/4))));$$

$$\text{DeltaCOG}=\text{TdutoAK}*(\text{ACO}+\text{TdutoAK}*(\text{BCO}/2+\text{TdutoAK}*(\text{CCO}/3+\text{DCO}*\text{TdutoAK}/4)))-$$

$$(273.15*(\text{ACO}+273.15*(\text{BCO}/2+273.15*(\text{CCO}/3+\text{DO}_2/4))));$$

$$\text{DeltaCO}_2\text{G}=\text{TdutoAK}*(\text{ACO}_2+\text{TdutoAK}*(\text{BCO}_2/2+\text{TdutoAK}*(\text{CCO}_2/3+\text{DCO}_2*\text{TdutoAK}/4)))-$$

$$(273.15*(\text{ACO}_2+273.15*(\text{BCO}_2/2+273.15*(\text{CCO}_2/3+\text{DCO}_2/4))));$$

$$\text{DeltaH}_2\text{OG}=\text{TdutoAK}*(\text{AH}_2\text{O}+\text{TdutoAK}*(\text{BH}_2\text{O}/2+\text{TdutoAK}*(\text{CH}_2\text{O}/3+\text{DH}_2\text{O}*\text{TdutoAK}/4)))-$$

$$(273.15*(\text{AH}_2\text{O}+273.15*(\text{BH}_2\text{O}/2+273.15*(\text{CH}_2\text{O}/3+\text{DH}_2\text{O}/4))));$$

%Cálculo da energia dos gases

$$\text{Qgases}=\text{N}_2\text{chareal}*\text{DeltaHN}_2\text{G}+\text{O}_2\text{chareal}*\text{DeltaHO}_2\text{G}+\text{COchareal}*\text{DeltaCOG}+\text{CO}_2\text{chareal}*\text{DeltaCO}_2\text{G}+\text{VH}_2\text{Ogases}*\text{DeltaH}_2\text{OG}$$

%XX

%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da

%Braskem-PVC-Ba

%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos

%Módulo 7: Cálculo da carga térmica Perdida pela combustão incompleta(QCO)

%XX

%CO+O₂-->CO₂+ H₂O, Calor da reação = 67,636 Kcal/mol

display('Rotina 7: Cálculo da carga térmica perdida pela combustão incompleta(QCO)')

QCO=COchareal*67.636 %Verificar este calor da reação

```
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
```

```
%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da
```

```
%Braskem-PVC-Ba
```

```
%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos
```

```
%Módulo 8:Cálculo da carga térmica Perdida pelas paredes da fornalha(Qparede)
```

```
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
```

```
display('Rotina 8:Cálculo da carga térmica perdida pelas paredes da fornalha(Qparede)')
```

```
%Calculo da temperatura adiabática de chama
```

```
%Calculo da vazão total dos gases
```

```
Mgases=O2chareal+COchareal+CO2chareal+N2chareal+VH2Ogases;
```

```
%Calculo da fração molar base úmida
```

```
ntotalu=O2chareal+COchareal+CO2chareal+N2chareal+VH2Ogases;
```

```
XO2u=O2chareal/ntotalu;
```

```
XCOu=COchareal/ntotalu;
```

```
XCO2u=CO2chareal/ntotalu;
```

```
XN2u=N2chareal/ntotalu;
```

```
XH2Ou=VH2Ogases/ntotalu;
```

```
%Calculo do Cpmedio dos gases
```

```
Cpgases=XO2u*8.423+XCOu*8.069+XCO2u*13.10+XN2u*7.994+XH2Ou*10.43
```

```
Tad=273.15+((QGN)/(Mgases*Cpgases))
```

```
Tsup=input('Digite a temperatura media da parede em celsius %: ');
```

```
TsupK=Tsup+273.15;
```

```
A=478.5;
```

```
%Calculo do calor perdido devido a convecção
```

```
TinfK=32+273.15; %Temperatura da vizinhança
```

```
Pr=0.707;%Prandtl, fonte incropera pg 941
```


display('Rotina 9: Resultados de eficiência pelos métodos direto, indireto e percentagem de calor para cada corrente')

Qintot=QGN+Qar;

Qouttot=QEDC+QAAC+Qparede+Qparede+Qgases;

BE=Qintot-Qouttot;

PercQGN=(QGN/Qintot)*100;

PercQar=(Qar/Qintot)*100;

PercQEDC=(QEDC/Qintot)*100;

PercQAAC=(QAAC/Qintot)*100;

PercQparede=(Qparede/Qintot)*100;

PercQgases=(Qgases/Qintot)*100;

PercQCO=(QCO/Qintot)*100;

PercNE=(BE/Qintot)*100;

display('Método direto: Calor aproveitado dividido pela carga térmica de entrada')

EFIdir=((QEDC+QAAC)/Qintot)*100

display('Método Indireto: 100% subtraído do calor perdido')

EFInd=100-PercQparede-PercQgases-PercQCO

%XX

%Nome: programa para Cálculo da eficiência das fornalhas F-1401A/B/C da

%Braskem-PVC-Ba

%Por: Jorge Luiz Moura dos Santos

%Módulo 10: Gráficos

%XX

figure(1);clf

display(['Qintot Qouttot QGN Qar QEDC QAAC Qparede Qgases QCO'])

Vetor1= [Qintot Qouttot QGN Qar QEDC QAAC Qparede Qgases QCO]

X=0:9;1

bar(Vetor1);

```

xlabel('1Qintot 2Qoutot 3QGN 4Qar 5QEDC 6QAAC 7Qparede 8Qgases 9QCO');
ylabel('% de calor');
title('Balanço de energia')
hold on
grid
axis
hold off

```

```

figure(2);clf
display(['Excessoar ExcessoO2 EFIdir EFlind'])
Vetor2= [Excessoar ExcessoO2 EFIdir EFlind]
X=0;4;1
bar(Vetor2);
xlabel('1Excessoar 2ExcessoO2 3EFIdir 4EFlind');
ylabel('% de calor');
title('Eficiência')
hold on
grid
axis
hold off

```

```

figure(3);clf
display(['PercQGN PercQar PercQEDC PercQAAC PercQparede PercQgases PercQCO PercNE'])
Vetor3= [PercQGN PercQar PercQEDC PercQAAC PercQparede PercQgases PercQCO PercNE]
X=0;8;1
bar(Vetor3);
xlabel('1PercQGN 2PercQar 3PercQEDC 4PercQAAC 5PercQparede 6PercQgases 7PercQCO
8PercNE');
ylabel('% de calor');
title('Percentual das correntes')
hold on
grid

```

```

axis
hold off

figure(4);clf
display(['QAqEDC QVapEDC QAqmix QReac QEDC'])
Vetor4= [QAqEDC QVapEDC QAqmix QReac QEDC]
X=0;5;1
bar(Vetor4);
xlabel('1QAqEDC 2QVapEDC 3QAqmix 4QReac 5QEDC');
ylabel('energia');
title('Análise do calor cedido ao EDC')
hold on
grid
axis
hold off

```

A.2. Saída do programa para o cálculo de valores de projeto da fornalha B

Programa para Cálculo da eficiência da Fornalha F-1401A

Elaborado por Eng Jorge Moura

Rotina 1: Cálculo da carga térmica proveniente do gás natural(QGN)

Iniciar digitando a Composição do Gás natural

Digite a Composição do metano em %: 96.36

Digite a Composição do etano em %: 1.86

Digite a Composição do propano em %: 0.02

Digite a Composição do butano em %: 0

Digite a Composição do dióxido de carbono em %: 0

Digite a Composição do nitrogênio em %: 1.76

P =

0.9824

PCIGN =

8.5331e+003

Digite a vazão de gás natural pelo FR-1405 em Nm³/h: 1400

Digite a temperatura de gás natural pelo TG1413 em Celsius: 25

Digite a pressão de gás natural pelo PG1425 em Kgf/cm²: 7.61

PMGN =

16.5291

QGN =

1.1641e+007

Rotina 2: Balanço de massa na fornalha

Reação de combustão do Metano : $1 \text{ CH}_4 + 2 \text{ O}_2 \rightarrow 1 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$

Reação de combustão do Etano : $1 \text{ C}_2\text{H}_6 + 3.5 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ CO}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O}$

Reação de combustão do Propano : $1 \text{ C}_3\text{H}_8 + 5 \text{ O}_2 \rightarrow 3 \text{ CO}_2 + 4 \text{ H}_2\text{O}$

Reação de combustão do Butano : $1 \text{ C}_4\text{H}_{10} + 6.5 \text{ O}_2 \rightarrow 4 \text{ CO}_2 + 5 \text{ H}_2\text{O}$

Digite a Composição de oxigênio na chaminé pelo AI-1401A em %: 3

Digite a Composição de monóxido de carbono na chaminé pelo AI-1402A em %: 0

Digite a Composição de dióxido de carbono na chaminé em %: 10.1

Excessoar =

14.7126

ExcessoO2 =

3.0897

Rotina 3: Cálculo da carga térmica proveniente do ar que entra na fornalha(Qar)

Qar =

9.8739e+004

Rotina 4: Cálculo da carga térmica cedida ao produto(QEDC)

Digite a vazão do Dicloroetano pelo FC-1403 em t/h: 30.842

Digite a temperatura do Dicloroetano pelo TI-1460 em Celsius: 25

Digite a conversão média do EDC em %: 55

QAqEDC =

2.6462e+006

QVapEDC =

1372469

Digite a temperatura do Dicloroetano, MVC e HCl pelo TC-1404 em Celsius: 498

QAqmix =

2.4216e+006

QReac =

2.8973e+006

QEDC =

9.3376e+006

Rotina 5: Cálculo da carga térmica Cedida ao economizador (QAAC)

Digite a Vazão de água para a fornalha A pelo FI-1450 em t/h: 14.22

Digite a temperatura de entrada de água na pelo TG-1702 em Celsius: 104

Digite a temperatura de saída de água na pelo TI-1001_66 em Celsius: 182

Digite a temperatura de saída de água na pelo TI-1001_67 em Celsius: 182

Cpmedio =

1.0139

QAAC =

1.1246e+006

Rotina 6: Cálculo da carga térmica perdida pelos gases exaustos(Qgases)

Digite a temperatura do duto pelo TG-1490 em Celsius: 221

Qgases =

9.9321e+005

Rotina 7: Cálculo da carga térmica perdida pela combustão incompleta (QCO)

QCO =

0

Rotina 8: Cálculo da carga térmica perdida pelas paredes da fornalha (Qparede)

Cpgases =

8.8406

Tad =

2.0591e+003

Digite a temperatura média da parede em celsius %: 82

Qparede =

2.3325e+005

Rotina 9: Resultados de eficiência pelos métodos direto, indireto e percentagem de calor para cada corrente

Método direto: Calor aproveitado dividido pela carga térmica de entrada

EFIdir =

89.1164

Método Indireto: 100% subtraído do calor perdido

EFlind =

89.5530

[Qintot Qoutot QGN Qar QEDC QAAC Qparede Qgases QCO]

Vetor1 =

1.0e+007 *

Columns 1 through 8

1.1740 1.1922 1.1641 0.0099 0.9338 0.1125 0.0233 0.0993

Column 9

0

ans =

1

ans =

0 10 0 12000000

[Excessoar ExcessoO2 EFlidir EFlind]

Vetor2 =

14.7126 3.0897 89.1164 89.5530

ans =

1

ans =

0.5000 4.5000 0 90.0000

[PercQGN PercQar PercQEDC PercQAAC PercQparede PercQgases PercQCO PercNE]

Vetor3 =

99.1589 0.8411 79.5373 9.5791 1.9868 8.4601 0 -1.5502

ans =

1

ans =

0 9 -20 100

[QAqEDC QVapEDC QAqmix QReac QEDC]

Vetor4 =

1.0e+006 *

2.6462 1.3725 2.4216 2.8973 9.3376

ans =

1

ans =

1.0e+007 *

0.0000 0.0000 0 1.0000

Apêndice B

Coleta de dados e resultados

B.1. Quadro da Coleta de dados

	Análise do Gás natural						Dados de Processo			Analísadores on line					Dados de Processo						
	CH4	C3H6	C3H8	C4H10	CO2	N2	FR-1406	T gás natural	P gas natural	O2 B	CO B	CO2B	FR-1404	TI-1460	Conv.	TIC-1411	Vazão AAC F-1401B	Temperatura da AAC entrada TG-1702 (oC):	Temperatura da AAC saída TI-1001 68 (oC):	Temperatura da AAC saída TI-1001 69 (oC):	TG-1491
	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CO ₂	N ₂		TG-1413 (°C):	PI-1425 (Kgff/cm ²):	AI1401B .PV	AI1403B. PV	Texto 300 M		FIC-1451 (Ton/h):							
Manati	88,56	3,78	1,5	0	0,35	5,8	1400	25	7,61	3	0	10,1	30,84	25	55	498	14,22	104	182	182	221
Projeto	96,36	1,86	0,02	0	0	1,76	1400	25	7,61	3	0	10,1	30,84	25	55	498	14,22	104	182	182	221
1/7/2008	89,58	8,15	0,02	0,00	0,75	1,50	1221,00	21,00	8,50	0,97	0,45	11,35	31,10	126	51,58	495	13,00	104	159	156	250
2/7/2008	89,56	8,19	0,00	0,00	0,77	1,48	1242,00	22,00	8,50	0,98	0,57	11,35	31,10	125	51,14	496	13,00	104	160	158	250
3/7/2008	89,52	8,08	0,12	0,00	0,75	1,53	1230,00	21,00	8,50	0,91	0,56	11,39	31,10	124	51,99	496	13,00	102	159	156	250
4/7/2008	89,41	8,31	0,07	0,00	0,78	1,44	1220,00	22,00	8,50	3,09	0,52	10,15	31,10	125	50,83	496	13,40	103	160	156	250
5/7/2008	89,59	8,21	0,01	0,00	0,77	1,43	1232,00	23,00	8,50	3,78	0,59	9,76	31,10	122	50,01	496	12,70	104	159	157	250
6/7/2008	89,50	8,23	0,01	0,00	0,76	1,50	1224,00	23,00	8,50	2,51	0,61	10,48	31,10	123	50,20	496	12,80	104	158	157	250
7/7/2008	89,48	8,22	0,00	0,00	0,77	1,53	1228,00	22,00	8,50	2,63	0,63	10,41	31,10	123	49,62	497	13,40	105	159	156	250
8/7/2008	89,44	8,29	0,02	0,00	0,78	1,47	1263,00	22,00	8,50	2,54	0,66	10,46	31,10	122	51,34	496	12,90	105	160	158	250
9/7/2008	88,93	8,40	0,38	0,16	0,77	1,35	1248,00	23,00	8,50	2,46	0,67	10,51	31,10	121	51,95	496	12,60	105	159	157	250
10/7/2008	89,50	8,25	0,01	0,00	0,75	1,48	1258,00	22,00	8,50	2,34	0,64	10,58	31,10	120	52,52	496	11,80	105	160	157	250
11/7/2008	89,37	8,14	0,01	0,00	0,73	1,76	1242,00	23,00	8,50	2,42	0,53	10,53	31,10	120	51,57	496	13,00	104	159	157	250
12/7/2008	89,52	8,22	0,00	0,00	0,73	1,53	1250,00	23,00	8,50	2,40	0,46	10,54	31,10	120	51,71	496	13,00	104	159	157	250
13/7/2008	89,48	8,19	0,00	0,00	0,75	1,58	1256,00	23,00	8,50	2,50	0,54	10,49	31,10	120	52,06	496	13,00	104	159	157	250
14/7/2008	89,47	8,22	0,01	0,00	0,74	1,56	1249,00	23,00	8,50	2,35	0,59	10,57	31,10	120	51,14	496	13,00	101	159	157	250
15/7/2008	89,52	8,14	0,01	0,00	0,74	1,59	1258,00	21,00	8,50	2,42	0,51	10,53	31,10	120	53,22	496	12,00	101	168	164	250
16/7/2008	89,57	8,07	0,01	0,00	0,74	1,62	1270,00	23,00	8,50	2,26	0,55	10,62	31,10	120	52,20	496	13,50	103	161	159	250
17/7/2008	89,53	8,14	0,01	0,00	0,75	1,58	1246,00	23,00	8,50	2,22	0,54	10,64	31,10	121	51,64	496	13,50	103	156	153	250
18/7/2008	89,18	8,32	0,00	0,00	0,76	1,74	1259,00	22,00	8,50	2,24	0,60	10,63	31,10	120	51,63	496	15,20	103	151	149	250
19/7/2008	89,55	8,12	0,00	0,00	0,75	1,57	1262,00	22,00	8,50	2,24	0,54	10,63	31,10	119	51,97	496	15,40	105	151	149	250
20/7/2008	89,46	8,27	0,00	0,00	0,76	1,52	1260,00	20,00	8,50	2,05	0,56	10,74	31,10	119	52,59	496	15,00	104	151	149	245
21/7/2008	89,44	8,26	0,00	0,00	0,74	1,55	1180,00	21,00	8,50	2,14	0,61	10,69	29,40	119	54,45	496	15,60	103	147	145	240
22/7/2008	89,26	8,19	0,26	0,06	0,76	1,47	1182,00	20,00	8,50	2,74	0,54	10,34	29,40	119	51,66	496	15,80	103	148	146	240

23/7/2008	89,63	8,07	0,01	0,00	0,74	1,54	1186,00	20,00	8,50	2,40	0,50	10,54	29,40	117	51,60	496	15,00	103	148	146	240
24/7/2008	89,68	8,00	0,01	0,00	0,71	1,60	1191,00	20,00	8,50	2,61	0,65	10,42	29,40	117	51,56	496	15,00	103	148	146	240
25/7/2008	89,51	7,65	0,46	0,05	0,74	1,59	1176,00	20,00	8,50	2,66	0,71	10,39	29,40	118	50,79	496	14,50	103	151	149	240
26/7/2008	88,29	7,95	0,74	0,37	0,67	1,97	1237,00	21,00	8,50	2,23	0,65	10,64	29,40	117	50,74	496	14,20	103	149	147	240
27/7/2008	89,55	7,50	0,11	0,10	0,68	2,06	1217,00	23,00	8,50	2,07	0,63	10,72	29,40	117	52,67	496	15,00	103	149	147	230
28/7/2008	89,53	7,40	0,15	0,10	0,68	2,14	1200,00	20,00	8,50	2,40	0,66	10,54	29,40	118	52,44	496	16,40	104	147	145	230
29/7/2008	88,87	8,02	0,42	0,29	0,74	1,66	1192,00	21,00	8,50	2,12	0,48	10,70	29,40	45	50,66	498	16,70	104	144	142	230
30/7/2008	88,38	7,47	1,11	0,57	0,72	1,75	1278,00	22,00	8,50	1,60	0,51	10,99	29,40	45	50,88	500	15,40	105	148	146	230
31/7/2008	89,47	7,82	0,15	0,10	0,69	1,77	1256,00	22,00	8,50	1,62	0,49	10,98	29,40	45	52,05	499	16,20	105	146	144	230
1/8/2008	89,53	7,71	0,09	0,07	0,69	1,91	1267,00	22,00	8,50	1,67	0,51	10,96	29,40	26	51,63	499	17,00	105	148	146	230
2/8/2008	89,57	7,59	0,09	0,07	0,69	1,99	1245,00	21,00	8,50	3,50	0,48	9,92	29,40	27	39,51	496	16,50	105	147	145	230
3/8/2008	89,65	7,96	0,03	0,01	0,73	1,61	1224,00	22,00	8,50	1,86	0,37	10,84	29,40	28	52,08	498	17,20	104	141	139	230
4/8/2008	89,37	7,30	0,16	0,15	0,67	2,35	1250,00	22,00	8,50	1,55	0,40	11,02	29,40	28	51,55	499	17,00	104	141	139	230
5/8/2008	89,29	7,31	0,15	0,15	0,66	2,44	1259,00	22,00	8,50	2,34	0,42	10,57	29,40	28	52,41	499	17,00	104	141	139	230
6/8/2008	89,26	7,38	0,13	0,12	0,66	2,44	1277,00	22,00	8,50	2,24	0,45	10,63	29,40	28	50,04	499	17,00	101	144	143	245
7/8/2008	89,57	8,11	0,02	0,00	0,71	1,59	1250,00	22,00	8,50	2,02	0,43	10,76	29,40	27	52,41	499	16,00	104	144	142	245
8/8/2008	89,64	8,02	0,00	0,00	0,71	1,63	1255,00	22,00	8,50	1,98	0,40	10,78	29,40	28	52,00	499	16,00	104	146	144	245
9/8/2008	89,68	7,98	0,07	0,00	0,72	1,55	1251,00	22,00	8,50	2,13	0,50	10,69	29,40	28	51,82	499	16,40	104	145	144	245
10/8/2008	89,54	8,08	0,06	0,00	0,72	1,59	1257,00	20,00	8,50	2,14	0,56	10,69	29,40	27	51,63	499	17,30	104	146	144	245
11/8/2008	89,52	8,07	0,05	0,00	0,72	1,65	1260,00	20,00	8,50	2,21	0,54	10,65	29,40	27	51,09	499	17,00	104	149	144	245
12/8/2008	89,66	7,82	0,10	0,00	0,72	1,71	1275,00	19,00	8,50	2,22	0,48	10,64	29,40	26	51,05	499	16,00	104	145	143	245
13/8/2008	89,69	7,77	0,11	0,01	0,72	1,69	1180,00	21,00	8,50	2,49	0,40	10,49	29,40	119	51,67	497	16,90	104	147	145	245
14/8/2008	89,82	7,62	0,11	0,03	0,71	1,71	1201,00	22,00	8,50	2,64	0,35	10,40	29,40	120	52,17	497	17,00	105	149	147	245
15/8/2008	89,82	7,56	0,08	0,05	0,70	1,79	1201,00	21,00	8,50	2,69	0,38	10,38	29,40	120	52,08	497	16,00	104	148	146	246
16/8/2008	89,84	7,64	0,04	0,04	0,71	1,73	1198,00	21,00	8,50	2,47	0,38	10,50	29,40	120	51,97	497	16,00	104	148	146	246
17/8/2008	89,83	7,73	0,04	0,01	0,72	1,66	1208,00	21,00	8,50	2,45	0,44	10,51	29,40	120	52,38	497	16,00	104	148	146	246
18/8/2008	89,59	7,33	0,12	0,09	0,66	2,22	1215,00	21,00	8,50	2,46	0,42	10,51	29,40	119	51,77	497	16,00	103	147	145	245
19/8/2008	89,51	7,49	0,09	0,09	0,66	2,15	1225,00	21,00	8,50	2,45	0,47	10,51	29,40	119	53,61	497	16,00	101	149	147	245
20/8/2008	89,51	7,40	0,10	0,10	0,66	2,22	1218,00	21,00	8,50	2,50	0,44	10,48	29,40	119	52,97	497	17,30	104	149	147	245
21/8/2008	89,50	7,40	0,09	0,10	0,67	2,25	1211,00	22,00	8,50	2,55	0,41	10,46	29,40	119	51,89	497	17,30	104	148	146	245
22/8/2008	89,41	7,69	0,08	0,08	0,68	2,06	1211,00	22,00	8,50	2,65	0,44	10,40	29,40	119	52,93	497	16,00	105	149	147	245
23/8/2008	89,54	7,97	0,02	0,01	0,70	1,76	1227,00	22,00	8,50	2,43	0,46	10,52	29,40	118	52,69	497	17,00	105	148	146	245
24/8/2008	89,49	7,83	0,03	0,03	0,73	1,90	1215,00	22,00	8,50	2,50	0,45	10,48	29,40	118	52,61	497	16,40	105	149	147	245
25/8/2008	89,49	7,95	0,03	0,03	0,74	1,75	1216,00	21,00	8,50	2,49	0,45	10,49	29,40	118	52,67	497	16,80	105	149	147	245
26/8/2008	89,39	7,73	0,18	0,13	0,70	1,87	1219,00	22,00	8,50	2,61	0,57	10,42	29,40	126	52,89	497	18,00	105	151	149	245
27/8/2008	89,03	7,30	0,77	0,31	0,70	1,90	1216,00	22,00	8,50	2,78	0,64	10,33	28,60	126	53,22	496	17,00	105	151	149	245

28/8/2008	89,35	7,60	0,10	0,10	0,68	2,16	1178,00	22,00	8,50	2,85	0,62	10,28	28,60	126	52,41	496	17,00	105	151	149	245
29/8/2008	89,39	7,54	0,10	0,10	0,68	2,20	1184,00	22,00	8,50	2,82	0,64	10,30	28,60	125	53,58	496	17,00	103	147	145	245
30/8/2008	89,43	8,08	0,01	0,01	0,73	1,73	1190,00	22,00	8,50	2,82	0,64	10,30	28,60	125	51,88	496	17,00	105	148	146	245
31/8/2008	89,53	7,95	0,01	0,00	0,72	1,79	1180,00	22,00	8,50	2,79	0,63	10,32	28,60	125	52,38	496	17,00	103	147	145	245
1/9/2008	89,47	7,63	0,06	0,06	0,68	2,10	1169,00	22,00	8,50	2,88	0,65	10,27	27,30	124	54,64	495	17,70	104	148	146	245
2/9/2008	89,67	7,46	0,06	0,06	0,67	2,09	1121,00	21,00	8,50	3,70	0,52	9,80	25,20	126	55,15	494	17,20	104	143	141	245
3/9/2008	89,50	7,62	0,06	0,06	0,71	2,06	1035,00	20,00	8,50	3,74	0,55	9,78	25,20	117	52,71	494	17,00	105	143	141	245
4/9/2008	89,49	7,64	0,07	0,06	0,70	2,04	1050,00	22,00	8,50	3,03	0,53	10,18	31,10	119	45,71	496	16,50	105	151	149	250
5/9/2008	89,42	7,65	0,08	0,07	0,69	2,10	1301,00	22,00	8,50	1,95	0,46	10,79	31,10	118	50,92	497	17,10	106	151	148	250
6/9/2008	89,37	7,68	0,11	0,09	0,70	2,04	1281,00	21,00	8,50	1,80	0,55	10,88	31,10	115	52,06	497	16,70	105	150	148	250
7/9/2008	89,42	7,84	0,04	0,03	0,72	1,95	1298,00	22,00	8,50	1,60	0,49	10,99	31,10	118	51,53	497	17,00	105	151	149	250
8/9/2008	89,41	7,56	0,08	0,08	0,68	2,18	1301,00	22,00	8,50	1,43	0,58	11,09	31,10	117	52,08	498	17,00	105	151	149	250
9/9/2008	89,45	7,65	0,07	0,06	0,73	2,04	1288,00	21,00	8,50	1,50	0,59	11,05	31,10	118	51,31	499	17,90	104	151	149	250
10/9/2008	89,44	7,77	0,05	0,05	0,71	1,98	1287,00	22,00	8,50	1,77	0,54	10,90	31,10	115	52,33	499	17,00	104	151	149	250
11/9/2008	89,46	7,53	0,07	0,06	0,73	2,15	1306,00	22,00	8,50	1,92	0,58	10,81	31,10	116	51,70	499	17,00	106	151	149	250
12/9/2008	89,33	7,77	0,07	0,05	0,73	2,05	1284,00	22,00	8,50	1,66	0,58	10,96	31,10	117	51,91	499	17,00	105	152	148	250
13/9/2008	89,46	7,82	0,07	0,06	0,68	1,90	1296,00	20,00	8,50	1,68	0,53	10,95	31,10	118	51,96	499	16,70	105	153	151	250
14/9/2008	89,37	7,69	0,09	0,08	0,72	2,04	1289,00	20,00	8,50	1,52	0,45	11,04	31,10	117	51,46	499	16,80	105	152	150	250
15/9/2008	89,41	7,56	0,09	0,09	0,70	2,15	1300,00	22,00	8,50	1,58	0,41	11,01	31,10	119	51,92	499	16,60	105	151	148	250
16/9/2008	89,46	7,64	0,06	0,06	0,74	2,03	1313,00	22,00	8,50	1,54	0,36	11,03	31,10	119	52,18	499	16,40	105	152	149	250
17/9/2008	89,46	7,62	0,06	0,05	0,74	2,07	1305,00	22,00	8,50	1,56	0,41	11,02	31,10	119	51,92	499	17,00	105	150	148	250
18/9/2008	89,35	7,58	0,08	0,07	0,78	2,14	1306,00	22,00	8,50	1,45	0,38	11,08	31,10	116	51,89	500	17,40	104	150	148	250
19/9/2008	89,30	7,46	0,11	0,09	0,76	2,28	1314,00	22,00	8,50	1,60	0,41	10,99	31,10	116	51,83	500	17,40	104	150	148	250
20/9/2008	89,44	7,75	0,10	0,05	0,72	1,94	1315,00	22,00	8,50	1,60	0,43	10,99	31,10	116	52,42	500	17,20	105	152	149	250
21/9/2008	89,39	7,94	0,03	0,03	0,75	1,85	1310,00	21,00	8,50	1,65	0,50	10,96	31,10	115	49,45	500	17,00	105	153	150	250
22/9/2008	89,31	7,83	0,07	0,06	0,74	1,99	1312,00	23,00	8,50	1,66	0,46	10,96	30,10	116	52,41	499	17,00	105	149	147	260
23/9/2008	89,36	7,46	0,09	0,09	0,76	2,23	1246,00	22,00	8,50	1,53	0,50	11,03	31,10	113	52,21	500	17,00	105	150	147	260
24/9/2008	89,16	7,35	0,14	0,12	0,90	2,34	1310,00	21,00	8,50	1,14	0,56	11,26	31,10	114	52,18	500	16,20	105	150	147	260
25/9/2008	89,18	7,42	0,11	0,11	0,84	2,34	1333,00	22,00	8,50	1,41	0,50	11,10	31,10	114	52,47	499	17,20	102	151	149	260
26/9/2008	88,96	7,49	0,24	0,17	0,83	2,31	1323,00	22,00	8,50	1,49	0,47	11,06	31,10	113	52,01	499	17,00	102	151	148	260
27/9/2008	89,15	7,48	0,09	0,09	0,89	2,30	1310,00	22,00	8,50	1,55	0,45	11,02	31,10	114	50,92	500	17,30	105	151	149	260
28/9/2008	89,22	7,59	0,08	0,08	0,83	2,19	1316,00	22,00	8,50	1,47	0,46	11,06	31,10	116	51,97	500	17,10	105	151	149	260

B.2. Quadro de resultados

	Resultados Forno B Vetor 1									Vetor 2				Vetor 3							Vetor 4					
	Qint tot 10 ⁷ Kcal	Qout tot 10 ⁷ Kcal	QGN 10 ⁷ Kcal	Qar 10 ⁷ Kcal	QEDC 10 ⁷ Kcal	QAAC 10 ⁷ Kcal	Qpared 10 ⁷ Kcal	Qgas es 10 ⁷ Kcal	QCO Kcal	Ar excesso	O2 Excesso	EF Direta	Ef indireta	%QGN	%Qar	%QEDC	%QAAC	%Qpared	%Qgases	%QCO	%NE	QAQEDC 10 ⁶ Kcal	QVapEDC 10 ⁶ Kcal	QAQM ix 10 ⁶ Kcal	Qreac 10 ⁶ Kcal	QEDC 10 ⁶ Kcal
Manati	1,16	1,20	1,15	0,01	0,93	0,11	0,02	0,10	0,00	15,99	3,36	90,39	89,07	99,11	0,89	80,67	9,72	2,02	8,92	0,00	-3,34	2,65	1,37	2,42	2,90	9,34
Projeto	1,17	1,19	1,16	0,01	0,93	0,11	0,02	0,10	0,00	14,71	3,09	89,12	89,55	99,16	0,84	79,54	9,58	1,99	8,46	0,00	-1,44	2,65	1,37	2,42	2,90	9,34
1/7/2008	1,08	1,03	1,07	0,01	0,80	0,07	0,03	0,10	162,40	0,75	0,16	80,35	87,85	99,33	0,67	73,82	6,53	2,91	9,23	0,00	4,59	1,44	1,38	2,41	2,74	7,98
2/7/2008	1,10	1,03	1,09	0,01	0,80	0,07	0,03	0,10	206,85	-0,40	-0,08	79,26	87,96	99,30	0,69	72,66	6,61	2,87	9,17	0,00	5,84	1,46	1,38	2,42	2,72	7,97
3/7/2008	1,09	1,04	1,08	0,01	0,80	0,07	0,03	0,10	201,34	-0,60	-0,13	80,45	87,95	99,34	0,66	73,74	6,71	2,89	9,16	0,00	4,62	1,47	1,38	2,42	2,76	8,03
4/7/2008	1,08	1,04	1,07	0,01	0,80	0,07	0,03	0,11	207,90	10,27	2,16	80,38	87,20	99,23	0,77	73,48	6,90	2,90	9,89	0,00	3,92	1,46	1,38	2,42	2,70	7,96
5/7/2008	1,09	1,04	1,08	0,01	0,79	0,07	0,03	0,11	244,42	13,13	2,76	79,32	87,02	99,18	0,82	72,93	6,38	2,89	10,10	0,00	4,81	1,49	1,38	2,42	2,66	7,95
6/7/2008	1,08	1,03	1,07	0,01	0,79	0,07	0,03	0,10	234,23	6,21	1,30	79,92	87,46	99,23	0,71	73,51	6,42	2,98	9,63	0,00	4,62	1,48	1,38	2,42	2,67	7,95
7/7/2008	1,09	1,03	1,08	0,01	0,79	0,07	0,03	0,10	244,09	6,61	1,39	79,61	87,43	99,26	0,74	73,03	6,58	2,90	9,67	0,00	4,93	1,48	1,38	2,42	2,64	7,92
8/7/2008	1,12	1,04	1,11	0,01	0,80	0,07	0,03	0,11	261,61	5,89	1,24	78,04	87,57	99,26	0,74	71,72	6,32	2,81	9,61	0,00	6,72	1,49	1,38	2,42	2,73	8,02
9/7/2008	1,12	1,04	1,11	0,01	0,81	0,07	0,03	0,11	265,27	5,65	1,19	77,92	87,62	99,23	0,77	71,88	6,04	2,80	9,57	0,00	6,91	1,50	1,38	2,42	2,76	8,07
10/7/2008	1,11	1,04	1,10	0,01	0,81	0,06	0,03	0,11	250,11	5,02	1,06	78,61	87,62	99,27	0,73	72,85	5,75	2,82	9,55	0,00	6,19	1,52	1,38	2,42	2,79	8,11
11/7/2008	1,09	1,05	1,08	0,01	0,81	0,07	0,03	0,11	206,47	6,57	1,38	80,33	87,45	99,22	0,78	73,81	6,52	2,88	9,67	0,00	4,22	1,52	1,38	2,42	2,74	8,06
12/7/2008	1,10	1,05	1,09	0,01	0,81	0,07	0,03	0,11	181,71	7,29	1,53	79,53	87,47	99,22	0,78	73,08	6,45	2,85	9,68	0,00	5,09	1,52	1,38	2,42	2,75	8,06
13/7/2008	1,11	1,05	1,10	0,01	0,81	0,07	0,03	0,11	213,64	6,84	1,44	79,44	87,49	99,22	0,78	73,01	6,43	2,84	9,67	0,00	5,21	1,52	1,38	2,42	2,77	8,08
14/7/2008	1,10	1,05	1,09	0,01	0,80	0,08	0,03	0,11	229,58	5,63	1,18	79,70	87,56	99,23	0,77	72,90	6,81	2,85	9,59	0,00	5,00	1,52	1,38	2,42	2,72	8,03
15/7/2008	1,11	1,06	1,10	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	202,48	6,82	1,43	80,40	87,50	99,29	0,71	73,30	7,11	2,83	9,67	0,00	4,27	1,52	1,38	2,42	2,83	8,15
16/7/2008	1,12	1,06	1,11	0,01	0,90	0,08	0,03	0,11	216,93	5,59	1,17	79,37	87,60	99,23	0,77	72,39	6,98	2,81	9,59	0,00	5,41	1,52	1,38	2,42	2,77	8,09
17/7/2008	1,10	1,04	1,09	0,01	0,80	0,07	0,03	0,11	209,04	5,56	1,17	79,72	87,55	99,23	0,77	73,30	6,42	2,86	9,58	0,00	4,98	1,50	1,38	2,42	2,74	8,05
18/7/2008	1,11	1,05	1,10	0,01	0,80	0,07	0,03	0,11	234,31	5,03	1,06	78,99	87,59	99,27	0,73	72,46	6,52	2,83	9,57	0,00	5,77	1,52	1,38	2,42	2,73	8,04
19/7/2008	1,11	1,05	1,10	0,01	0,81	0,07	0,03	0,11	212,11	5,63	1,18	79,01	87,58	99,27	0,73	72,69	6,32	2,82	9,59	0,00	5,75	1,53	1,38	2,42	2,76	8,09
20/7/2008	1,12	1,05	1,11	0,01	0,81	0,07	0,03	0,10	218,41	4,54	0,95	78,98	87,83	99,34	0,66	72,72	6,26	2,81	9,35	0,00	6,04	1,53	1,38	2,42	2,79	8,12

21/7/2008	1,04	1,00	1,04	0,01	0,78	0,07	0,03	0,10	222,26	4,40	0,93	80,99	87,81	99,31	0,69	74,48	6,51	3,01	9,18	0,00	3,81	1,44	1,31	2,29	2,73	7,78
22/7/2008	1,06	1,00	1,05	0,01	0,76	0,07	0,03	0,10	296,93	8,39	1,76	78,92	87,59	99,32	0,68	72,25	6,67	2,98	9,43	0,00	5,70	1,44	1,31	2,29	2,59	7,63
23/7/2008	1,05	0,99	1,04	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	187,32	6,83	1,43	79,31	87,67	99,33	0,67	72,94	6,38	3,00	9,33	0,00	5,36	1,47	1,31	2,29	2,59	7,65
24/7/2008	1,05	0,99	1,05	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	243,54	6,19	1,30	79,07	87,70	99,33	0,67	72,71	6,36	2,99	9,31	0,00	5,64	1,47	1,31	2,29	2,59	7,65
25/7/2008	1,05	0,99	1,04	0,01	0,76	0,07	0,03	0,10	264,48	6,00	1,26	79,18	87,59	99,33	0,67	72,59	6,60	3,00	9,30	0,00	5,51	1,46	1,31	2,28	2,55	7,60
26/7/2008	1,12	0,99	1,11	0,01	0,76	0,06	0,03	0,10	235,32	4,80	1,01	73,96	87,95	99,30	0,70	68,15	5,80	2,82	9,23	0,00	11,18	1,47	1,31	2,28	2,55	7,61
27/7/2008	1,06	1,00	1,05	0,01	0,77	0,07	0,03	0,09	233,33	3,80	0,80	78,96	88,19	99,24	0,76	72,52	6,44	2,96	8,85	0,00	6,28	1,47	1,31	2,29	2,64	7,71
28/7/2008	1,05	1,00	1,04	0,01	0,77	0,07	0,03	0,09	245,31	4,96	1,04	79,79	88,06	99,33	0,67	73,14	6,65	2,99	8,95	0,00	5,28	1,46	1,31	2,29	2,63	7,68
29/7/2008	1,07	1,07	1,06	0,01	0,84	0,07	0,03	0,10	181,99	6,02	1,26	85,06	88,13	99,30	0,70	78,90	6,17	2,94	8,93	0,00	0,13	2,29	1,31	2,30	2,54	8,45
30/7/2008	1,17	1,08	1,16	0,01	0,85	0,07	0,03	0,10	205,48	3,64	0,76	78,31	88,53	99,28	0,72	72,69	5,63	2,70	8,77	0,00	7,52	2,29	1,31	2,32	2,55	8,48
31/7/2008	1,11	1,08	1,10	0,01	0,85	0,07	0,03	0,10	187,00	3,23	0,68	82,87	88,40	99,28	0,72	76,94	5,93	2,84	8,77	0,00	2,70	2,29	1,31	2,31	2,61	8,53
1/8/2008	1,11	1,11	1,10	0,01	0,87	0,07	0,03	0,10	195,33	3,09	0,65	85,01	88,39	99,28	0,72	78,49	6,52	2,83	8,78	0,00	0,56	2,51	1,31	2,31	2,59	8,72
2/8/2008	1,09	1,04	1,08	0,01	0,81	0,07	0,03	0,10	199,15	12,68	2,66	80,11	87,71	99,05	0,75	73,83	6,29	2,88	9,40	0,00	4,72	2,50	1,31	2,27	1,98	8,06
3/8/2008	1,08	1,09	1,07	0,01	0,87	0,06	0,03	0,10	140,26	5,63	1,18	86,67	88,19	99,27	0,73	80,84	5,82	2,92	8,89	0,00	-1,39	2,49	1,31	2,30	2,62	8,72
4/8/2008	1,09	1,09	1,08	0,01	0,87	0,06	0,03	0,10	151,30	3,67	0,77	85,60	88,27	99,27	0,73	79,90	5,70	2,89	8,84	0,00	-0,22	2,49	1,31	2,31	2,59	8,70
5/8/2008	1,10	1,10	1,09	0,01	0,87	0,06	0,03	0,10	166,15	7,27	1,53	85,50	88,04	99,25	0,75	79,83	5,67	2,87	9,08	0,00	-0,33	2,49	1,31	2,31	2,63	8,74
6/8/2008	1,11	1,10	1,10	0,01	0,86	0,07	0,03	0,11	178,93	6,39	1,34	84,27	87,62	99,25	0,75	77,68	6,59	2,83	9,55	0,00	0,52	2,49	1,31	2,31	2,51	8,62
7/8/2008	1,10	1,11	1,10	0,01	0,88	0,06	0,03	0,10	167,01	5,65	1,19	85,09	87,74	99,27	0,73	79,35	5,74	2,85	9,41	0,00	-0,20	2,50	1,31	2,31	2,63	8,75
8/8/2008	1,11	1,11	1,10	0,01	0,87	0,07	0,03	0,10	155,81	5,78	1,21	84,93	87,74	99,26	0,74	78,91	6,02	2,84	9,42	0,00	-0,04	2,49	1,31	2,31	2,61	8,72
9/8/2008	1,10	1,11	1,10	0,01	0,87	0,07	0,03	0,10	194,34	5,53	1,16	85,00	87,75	99,27	0,73	78,90	6,10	2,85	9,40	0,00	-0,10	2,49	1,31	2,31	2,60	8,71
10/8/2008	1,11	1,11	1,11	0,01	0,87	0,07	0,03	0,10	218,43	4,89	1,03	84,78	87,79	99,34	0,66	78,31	6,46	2,83	9,38	0,00	0,19	2,50	1,31	2,31	2,59	8,71
11/8/2008	1,11	1,11	1,11	0,01	0,87	0,07	0,03	0,11	212,16	5,43	1,14	84,53	87,76	99,33	0,67	77,96	6,58	2,82	9,42	0,00	0,40	2,50	1,31	2,31	2,57	8,69
12/8/2008	1,13	1,10	1,12	0,01	0,87	0,06	0,03	0,11	191,85	6,13	1,29	82,99	87,74	99,36	0,64	77,23	5,76	2,79	9,47	0,00	1,96	2,51	1,31	2,31	2,56	8,69
13/8/2008	1,04	1,00	1,03	0,01	0,76	0,07	0,03	0,10	150,59	8,33	1,75	80,46	87,37	99,28	0,72	73,53	6,92	3,02	9,60	0,00	3,90	1,44	1,31	2,29	2,59	7,64
14/8/2008	1,06	1,00	1,05	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	135,45	9,69	2,04	79,58	87,34	99,24	0,76	72,55	7,03	2,98	9,68	0,00	4,78	1,43	1,31	2,30	2,62	7,66
15/8/2008	1,05	1,00	1,05	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	146,97	9,48	1,99	79,16	87,30	99,27	0,73	72,55	6,61	2,98	9,72	0,00	5,15	1,43	1,31	2,30	2,62	7,65
16/8/2008	1,05	1,00	1,05	0,01	0,76	0,07	0,03	0,10	144,99	8,41	1,77	79,27	87,37	99,28	0,72	72,64	6,63	2,99	9,64	0,00	5,11	1,43	1,31	2,30	2,61	7,65
17/8/2008	1,06	1,00	1,05	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	168,27	7,67	1,61	78,75	87,45	99,29	0,71	72,18	6,57	2,96	9,59	0,00	5,74	1,43	1,31	2,30	2,63	7,67
18/8/2008	1,06	1,00	1,05	0,01	0,76	0,07	0,03	0,10	161,26	7,76	1,63	78,76	87,42	99,28	0,72	72,17	6,58	2,97	9,62	0,00	5,69	1,44	1,31	2,29	2,60	7,65
19/8/2008	1,07	1,02	1,06	0,01	0,77	0,08	0,03	0,10	181,39	7,25	1,52	79,44	87,48	99,29	0,71	72,33	7,11	2,94	9,58	0,00	5,10	1,44	1,31	2,30	2,69	7,74
20/8/2008	1,06	1,01	1,06	0,01	0,77	0,08	0,03	0,10	169,60	7,83	1,64	79,81	87,42	99,28	0,72	72,55	7,26	2,96	9,62	0,00	4,65	1,44	1,31	2,30	2,66	7,71
21/8/2008	1,05	1,01	1,05	0,01	0,77	0,08	0,03	0,10	157,57	8,33	1,75	79,73	87,36	99,24	0,76	72,58	7,15	2,98	9,65	0,00	4,65	1,44	1,31	2,29	2,51	7,65
22/8/2008	1,06	1,01	1,05	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	170,24	8,62	1,81	79,28	87,38	99,24	0,76	72,69	6,58	2,97	9,66	0,00	5,14	1,44	1,31	2,30	2,66	7,71
23/8/2008	1,08	1,01	1,07	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	178,27	7,38	1,55	78,16	87,54	99,25	0,75	71,44	6,71	2,91	9,54	0,00	6,47	1,46	1,31	2,30	2,65	7,71
24/8/2008	1,06	1,01	1,06	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	173,25	7,85	1,65	79,06	87,45	99,25	0,75	72,34	6,72	2,95	9,59	0,00	5,44	1,46	1,31	2,30	2,64	7,70
25/8/2008	1,07	1,01	1,06	0,01	0,77	0,07	0,03	0,10	173,94	7,80	1,64	78,81	87,48	99,28	0,72	71,96	6,84	2,94	9,58	0,00	5,74	1,46	1,31	2,30	2,64	7,71

26/8/2008	1,08	1,01	1,07	0,01	0,76	0,08	0,03	0,10	220,40	7,13	1,50	78,57	87,52	99,25	0,75	70,93	7,64	2,92	9,55	0,00	6,02	1,36	1,31	2,30	2,66	7,62
27/8/2008	1,09	0,99	1,08	0,01	0,74	0,01	0,03	0,10	251,54	7,44	1,56	75,40	87,53	99,25	0,75	68,27	7,13	2,89	9,58	0,00	9,24	1,33	1,27	2,23	2,60	7,43
28/8/2008	1,03	0,98	1,02	0,01	0,74	0,08	0,03	0,10	231,91	7,69	1,62	79,26	87,32	99,25	0,75	71,73	7,54	3,05	9,63	0,00	5,00	1,33	1,27	2,22	2,56	7,38
29/8/2008	1,03	0,98	1,03	0,01	0,75	0,07	0,03	0,10	239,55	7,27	1,53	79,29	87,35	99,25	0,75	72,12	7,17	3,04	9,61	0,00	5,02	1,34	1,27	2,23	2,62	7,45
30/8/2008	1,05	0,97	1,04	0,01	0,74	0,07	0,03	0,10	241,79	7,39	1,55	77,28	87,43	99,25	0,75	70,37	6,92	3,00	9,57	0,00	7,14	1,34	1,27	2,22	2,53	7,37
31/8/2008	1,04	0,98	1,03	0,01	0,74	0,07	0,03	0,10	235,21	7,26	1,52	78,54	87,40	99,25	0,75	71,39	7,15	3,04	9,57	0,00	5,82	1,34	1,27	2,22	2,56	7,39
1/9/2008	1,02	0,96	1,01	0,01	0,72	0,08	0,03	0,10	240,41	7,40	1,55	77,78	87,31	99,25	0,75	70,22	7,56	3,08	9,61	0,00	6,45	1,29	1,21	2,12	2,55	7,17
2/9/2008	0,98	0,89	0,97	0,01	0,66	0,07	0,03	0,10	195,06	13,31	2,80	74,30	86,79	99,25	0,75	67,53	6,77	3,21	10,00	0,00	9,28	1,17	1,12	1,95	2,27	6,61
3/9/2008	0,91	0,88	0,90	0,01	0,66	0,06	0,03	0,09	191,13	13,22	2,78	79,73	86,53	99,28	0,72	72,70	7,04	3,47	10,00	0,00	3,34	1,26	1,12	1,94	2,27	6,59
4/9/2008	0,92	1,00	0,91	0,01	0,77	0,08	0,03	0,09	179,69	9,62	2,02	92,61	86,66	99,24	0,76	84,41	8,20	3,42	9,91	0,00	-9,37	1,53	1,38	2,41	2,43	7,75
5/9/2008	1,14	1,05	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	184,06	5,00	1,05	77,48	87,65	99,27	0,73	70,84	6,64	2,76	9,58	0,00	7,41	1,54	1,38	2,43	2,70	8,06
6/9/2008	1,12	1,06	1,12	0,01	0,82	0,07	0,03	0,11	214,10	3,35	0,70	79,20	87,72	99,31	0,69	72,57	6,63	2,80	9,48	0,00	5,72	1,58	1,38	2,43	2,77	8,15
7/9/2008	1,14	1,06	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	191,86	3,07	0,65	78,00	87,79	99,28	0,72	71,17	6,83	2,77	9,44	0,00	7,02	1,54	1,38	2,43	2,74	8,09
8/9/2008	1,13	1,06	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	223,35	1,29	0,27	78,61	87,87	99,29	0,71	71,77	6,84	2,77	9,35	0,00	6,49	1,55	1,38	2,44	2,77	8,14
9/9/2008	1,13	1,06	1,12	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	226,24	1,58	0,33	79,26	87,84	99,32	0,68	71,85	7,41	2,79	9,37	0,00	5,79	1,54	1,38	2,45	2,73	8,10
10/9/2008	1,13	1,07	1,12	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	210,35	3,27	0,69	79,72	87,74	99,28	0,72	72,68	7,04	2,79	9,47	0,00	5,23	1,58	1,38	2,45	2,78	8,19
11/9/2008	1,14	1,06	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	229,54	3,57	0,75	78,25	87,72	99,28	0,72	71,58	6,67	2,76	9,51	0,00	6,71	1,56	1,38	2,45	2,75	8,14
12/9/2008	1,12	1,06	1,11	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	223,51	2,41	0,51	79,41	87,78	99,28	0,72	72,50	6,91	2,80	9,42	0,00	5,57	1,55	1,38	2,45	2,76	8,14
13/9/2008	1,14	1,06	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	208,24	2,97	0,62	78,25	87,80	99,35	0,65	71,28	6,98	2,76	9,44	0,00	6,80	1,54	1,38	2,45	2,76	8,13
14/9/2008	1,13	1,06	1,12	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	175,53	3,08	0,65	78,69	87,77	99,35	0,65	71,76	6,93	2,78	9,45	0,00	6,30	1,55	1,38	2,45	2,73	8,12
15/9/2008	1,13	1,06	1,13	0,01	0,81	0,07	0,03	0,11	161,40	3,67	0,77	78,14	87,73	99,28	0,72	71,53	6,60	2,77	9,49	0,00	6,83	1,53	1,38	2,45	2,76	8,12
16/9/2008	1,15	1,06	1,14	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	143,51	4,07	0,85	77,51	87,75	99,27	0,73	70,91	6,60	2,74	9,51	0,00	7,51	1,53	1,38	2,45	2,77	8,13
17/9/2008	1,14	1,06	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	161,75	3,61	0,76	77,96	87,75	99,28	0,72	71,30	6,66	2,76	9,49	0,00	7,03	1,53	1,38	2,45	2,76	8,12
18/9/2008	1,14	1,07	1,13	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	149,74	3,48	0,73	78,68	87,75	99,28	0,72	71,70	6,97	2,76	9,48	0,00	6,32	1,56	1,38	2,46	2,76	8,16
19/9/2008	1,14	1,07	1,13	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	163,24	3,89	0,82	78,33	87,72	99,27	0,73	71,38	6,95	2,75	9,53	0,00	6,64	1,56	1,38	2,46	2,75	8,16
20/9/2008	1,15	1,07	1,14	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	171,69	3,71	0,78	77,94	87,79	99,28	0,72	71,05	6,89	2,73	9,48	0,00	7,13	1,56	1,38	2,46	2,78	8,19
21/9/2008	1,15	1,06	1,14	0,01	0,80	0,08	0,03	0,11	198,62	3,28	0,69	76,78	87,81	99,31	0,69	69,82	6,97	2,73	9,45	0,00	8,30	1,58	1,38	2,45	2,63	8,04
22/9/2008	1,15	1,07	1,14	0,01	0,82	0,07	0,03	0,11	183,03	3,67	0,77	77,71	87,45	99,24	0,76	71,25	6,46	2,74	9,81	0,00	7,00	1,56	1,38	2,45	2,78	8,18
23/9/2008	1,08	1,07	1,08	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	186,57	2,64	0,55	82,72	87,32	99,28	0,72	75,80	6,92	2,90	9,77	0,00	1,71	1,60	1,38	2,46	2,77	8,22
24/9/2008	1,14	1,06	1,13	0,01	0,82	0,07	0,03	0,11	215,05	0,37	0,08	78,33	87,59	99,33	0,67	72,05	6,28	2,76	9,65	0,00	6,49	1,59	1,38	2,46	2,77	8,20
25/9/2008	1,16	1,08	1,15	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	198,57	2,16	0,45	78,15	87,52	99,28	0,72	70,93	7,23	2,72	9,76	0,00	6,65	1,59	1,38	2,45	2,79	8,21
26/9/2008	1,16	1,08	1,15	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	187,68	2,87	0,60	77,96	87,48	99,28	0,72	70,89	7,08	2,72	9,80	0,00	6,80	1,60	1,38	2,45	2,76	8,19
27/9/2008	1,14	1,07	1,13	0,01	0,81	0,08	0,03	0,11	177,64	3,35	0,70	78,48	87,40	99,28	0,72	71,53	6,95	2,77	9,84	0,00	6,15	1,59	1,38	2,46	2,70	8,13
28/9/2008	1,15	1,07	1,14	0,01	0,82	0,08	0,03	0,11	181,79	2,90	0,61	78,09	87,47	99,28	0,72	71,28	6,81	2,74	9,79	0,00	6,64	1,56	1,38	2,46	2,76	8,17