PAULA DINIZ CAPUTO

UTILIZAÇÃO DE *SYNGAS* EM SUBSTITUIÇÃO A COMBUSTÍVEIS GASOSOS EM PROCESSOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: João Andrade de Carvalho Junior

Co-orientador: Sérgio Leite Lopes

Guaratinguetá

2009

Caputo, Paula Diniz
C255u Utilização de *syngas* em substituição a combustíveis gasosos em processos siderúrgicos / Paula Diniz Caputo. – Guaratinguetá : [s.n.], 2009.
72f. : il.
Bibliografia: f.68-69

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2009.
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr
Co-orientador: Sérgio Leite Lopes

1. Gás como combustível – mistura 2. Engenharia Térmica I. Título

CDU 662.767

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

PAULA DINIZ CAPUTO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. MAURICIO ARAUJO ZANARDI
Unesp - Feg

Prof. Dr. MARCO AURELIO FERREIRA
INPE/LCP

Dezembro de 2009

DADOS CURRICULARES

PAULA DINIZ CAPUTO

NASCIMENTO	24.01.1978 – BRASÍLIA / DF
FILIAÇÃO	Augusto Julio Diniz Glória das Graças Diniz
1996/2002	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília

em especial ao meu marido Léo, que sempre me incentivou e acreditou em mim. Seu carinho, dedicação e suporte foram imprescindíveis para o sucesso deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha saúde, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.* pelo incentivo constante, pela atenção e paciência e principalmente por compreender as singularidades deste projeto desenvolvido em sua maior parte a distância.

ao meu co-orientador *Dr. Sérgio Leite Lopes* pela atenção dedicada durante todo o mestrado,

aos meus pais *Augusto* e *Glória* e ao meu irmão *Thiago* que sempre incentivaram meus estudos e acreditaram em meu potencial,

aos amigos que compreenderam minha ausência durante o desenvolvimento deste trabalho, em especial aos amigos de São José dos Campos que sempre me receberam com alegria em suas casas,

aos meus colegas de mestrado que me ajudaram e incentivaram durante as aulas e provas e que contribuíram de diversas maneiras para o desenvolvimento deste trabalho,

à ArcelorMittal Tubarão que acreditou e financiou este mestrado desde o início, forneceu todos os recursos necessários para o desenvolvimento do projeto e principalmente pelo incentivo dado ao aprimoramento contínuo de meus conhecimentos técnicos.

Aos meus gerentes da ArcelorMittal Tubarão que me incentivaram e sempre me disponibilizaram o tempo e os recursos necessários para o sucesso deste trabalho

CAPUTO, P. D. **Utilização de *syngas* em substituição a combustíveis gasosos em processos siderúrgicos**. 2009. 72 f. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

Esta dissertação analisa a possibilidade de utilizar combustíveis gasosos alternativos para reduzir o consumo de gás de coqueria em usinas siderúrgicas integradas. Foram consideradas misturas a) de gás de coqueria com gases de gaseificação e b) de gás natural com gases de gaseificação, para substituir o gás de coqueria puro e misturas do gás de coqueria com gás de alto forno. Os dois parâmetros principais que definem a intercambiabilidade entre os gases foram o Índice de Wobbe e o Índice de Weaver relativo a descolamento de chama. O percentual de economia de gás de coqueria foi calculado para as diversas misturas consideradas.

PALAVRAS-CHAVE: Intercambiabilidade de gases, Índice de Wobbe, Índices de Weaver, Mistura de gases combustíveis.

CAPUTO, P. D. **Use of *syngas* as a substitute for combustible gases in steelmaking processes.** 2009. 72 f. Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

This dissertation analyzes the possibility of using alternate fuel gases to reduce the consumption of coke oven gas in integrated steel making plants. The following gas mixtures were considered: a) coke oven gas with different gasification gases and b) natural gas with different gasification gases to substitute either pure coke oven gas or mixtures of coke oven gas with blast furnace gas. Eight gasification gases from biomass and coal were selected from the literature as prospective substitutes. The two main parameters that defined the interchangeability were the Wobbe Index and the Weaver Index related to flame blow out. The economy of coke oven gas was calculated for all considered alternate gases.

KEYWORDS: Fuel gas interchangeability, Wobbe Index, Weaver Indexes, Fuel gas mixture

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Foto aérea da coqueria da AMT.....15
FIGURA 2 - Equipamentos do processo de tratamento do COG na AMT.....16
FIGURA 3 - Distribuição dos gases siderúrgicos na AMT.....21
FIGURA 4 – Fluxograma esquemático da EMG da ArcelorMittal Tubarão.....38
FIGURA 5 – Ramais da estação de mistura 1.....39
FIGURA 6 – Região dos sopradores de gás.....40
FIGURA 7 – Supervisório da EMG da AMT.....41
FIGURA 8 – Variação do fator F com a fração molar do gás mais denso na mistura..46
FIGURA 9 – Variação do Índice de Wobbe com a relação entre as massas específicas ao misturar dois combustíveis gasosos com mesmo Índice de Wobbe (k = 3,51: máximo para gases siderúrgicos com mesmo W).....46
FIGURA 10 – Redução no consumo de COG (gás misto base com PCI = 2800 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 5% para W. 51
FIGURA 11 . – Redução no consumo de COG (gás misto base com PCI = 2700 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 5% para W 55
FIGURA 12 – Redução no consumo de COG (gás misto base com PCI = 2600 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 5% para W 58
FIGURA 13 – Redução no consumo de COG (gás misto base COG+BFG com W=3060 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 10% para W.....62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composição química do COG 17
TABELA 2 – Características do COG 17
TABELA 3 – Composição química do BFG 18
TABELA 4 – Características do BFG 19
TABELA 5 - Composição química do LDG 20
TABELA 6 Características do LDG 20
TABELA 7 Composição química do GN 22
TABELA 8 – Características do GN 23
TABELA 9 - Composições de *syngas* consideradas no presente trabalho. 28
TABELA 10 – Coeficientes de velocidade de Weaver. 32
TABELA 11 – Misturas substitutas, com base no GN, para o COG. 48
TABELA 12 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64. 49
TABELA 13 – Misturas substitutas com base no próprio COG, para o gás misto de 2800 kcal/Nm^3 50
TABELA 14 – Economia de COG para as misturas estudadas (gás misto base com PCI = 2800 kcal/Nm^3). 50
TABELA 15 – PCI dos gases utilizados na mistura com COG. 51
TABELA 16 – Misturas substitutas com base no GN, para o gás misto de 2800 kcal/Nm3. 52
TABELA 17 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64, para substituir gás misto com PCI = 2800 kcal/Nm^3. 53
TABELA 18 – Misturas substitutas com base no próprio COG, para o gás misto de 2700 kcal/Nm^3 54
TABELA 19 – Economia de COG para as misturas estudadas (gás misto base com PCI = 2700 kcal/Nm^3). 54
TABELA 20 – Misturas substitutas com base no GN, para o gás misto de 2700 kcal/Nm^3 55
TABELA 21 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64, para substituir gás misto com PCI = 2700 kcal/Nm^3. 56
TABELA 22 – Misturas substitutas com base no próprio COG, para o gás misto de 2600 kcal/Nm^3 57
TABELA 23 – Economia de COG para as misturas estudadas (gás misto base com PCI = 2600 kcal/Nm^3). 57
TABELA 24 – Misturas substitutas com base no GN, para o gás misto de 2600 kcal/Nm^3 58

TABELA 25 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64, para substituir gás misto com PCI = 2600 kcal/Nm^3. 59
TABELA 26 – Misturas substitutas para o gás misto LDG+GOG do LTQ 60
TABELA 27 – Economia de COG com a utilização das misturas em relação ao LDG 60
TABELA 28 – Misturas substitutas para o gás misto BFG+GOG do LTQ.....61
TABELA 29 – Economia de COG com a utilização das misturas em relação ao BFG61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT	ArcelorMittal Tubarão
ANP	Agência Nacional de Petróleo
BFG	Gás de Alto Forno (Blast Furnace Gas)
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COG	Gás de Coqueria (Coke Oven Gas)
DME	Éter Dimetílico
EMG	Estação de Mistura de Gases
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GNS	Gás Natural Sintético
LDG	Gás de Aciaria (LD Gas)
LFG	Landfill Gas
LTQ	Laminador de Tiras a Quente
MG	Gás Misto (Mixed Gas)
MN	Número de Metano (Methane Number)
PCI	Poder Calorífico Inferior
SCG	Synthetic Coking Gas
SYNGAS	Gás de Gaseificação
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural

LISTA DE SÍMBOLOS

d	densidade relativa	[1]
A	área da seção transversal do orifício de gás no queimador	m^2
B_i	coeficiente de chama de Weaver para o componente i	[1]
F	fator F definido na equação 33	[1]
H	poder calorífico	$kcal/Nm^3$
J_A	índice de aeração primária de Weaver	[1]
J_F	índice de retorno de chama de Weaver	[1]
J_H	índice de aporte de calor de Weaver	[1]
J_I	índice de combustão incompleta de Weaver	[1]
J_L	índice de descolamento de chama de Weaver	[1]
J_Y	índice de pontas amarelas de Weaver	[1]
k	coeficiente de descarga do orifício	[1]
M	número de mols	[1]
N	relação entre os números de moles	[1]
p	pressão manométrica	kgf/cm^2
Q	taxa de energia térmica	kcal/s
ρ	massa específica	kg/Nm^3
S	fator de velocidade de chama de Weaver	[1]
T	temperatura	^oC
$\dot{V}$	Vazão volumétrica	Nm^3/s
V	Percentual Volumétrico	%
W	índice de Wobbe	$kcal/Nm^3$
xi	fração volumétrica do componente i	[1]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO....13
1.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO....13
1.2 GASES SIDERÚRGICOS....15
1.2.1 Gás de Coqueria – COG....15
1.2.2 Gás de Alto Forno – BFG....18
1.2.3 Gás de Aciaria – LDG....19
1.2.4 Distribuição dos Gases Siderúrgicos....21
1.3 GÁS NATURAL E GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO....21
1.3.1 Gás Natural – GN....21
1.3.2 Gás Liquefeito de Petróleo – GLP....23
1.4 GÁS DE GASEIFICAÇÃO....24
2 INTERCAMBIABILIDADE DE GASES....29
2.1 PRELIMINARES....29
2.2 MÉTODO DO ÍNDICE DE WOBBE....29
2.3 MÉTODO DOS MÚLTIPLOS ÍNDICES DE WEAVER....31
2.4 PESQUISA RECENTE NA ÁREA....33
2.5 PLANILHA EXCEL DESENVOLVIDA....34
2.5.1 Cálculo do Índice de Wobbe de misturas....34
2.5.2 Razão ar/combustível e composição dos produtos de combustão....36
2.6 MISTURA DE GASES....37
2.7 MISTURA DE GASES COM MESMO ÍNDICE DE WOBBE....42
3 APLICAÇÕES....47
3.1 SUBSTITUIÇÃO DE COG....47
3.2 SUBSTITUIÇÃO DO GÁS MISTO....49
3.2.1 Gás Misto com PCI = 2800 kcal/Nm^3....49
3.2.2 Gás Misto com PCI = 2700 kcal/Nm^3....53
3.2.3 Gás Misto com PCI = 2600 kcal/Nm^3....56
3.3 SUBSTITUIÇÃO DO GÁS MISTO DO LTQ DA AMT....59
4 ANÁLISE DE RESULTADOS....63
5 CONCLUSÃO....67
6 REFERÊNCIAS....68
APENDICE A – PLANILHA EXCEL DESENVOLVIDA....70

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

As usinas siderúrgicas são grandes consumidoras de energia elétrica e diante das diversas crises energéticas enfrentadas nos últimos anos, torna-se imprescindível a geração própria de energia tendo em vista que é essencial para estas indústrias ter um fornecimento confiável de energia elétrica.

Usinas siderúrgicas integradas são aquelas que adquirem as matérias primas no estado bruto, executam todas as fases do processo industrial e vendem os produtos acabados. Neste tipo de usina pode-se ter uma redução significativa no custo do produto acabado através do aproveitamento dos resíduos gerados na fabricação do aço.

A ArcelorMittal Tubarão – AMT é uma siderúrgica integrada que adota modelo energético baseado na co-geração de energia por reaproveitando de gases siderúrgicos. Sua fonte primária de energia é o carvão (representa cerca de 99% do total das energias primárias). O carvão é transformado nas Coquerias e Altos Fornos produzindo seus derivados: Gás de Coqueria (COG – Coke Oven Gas), Gás de Alto Forno (BFG – Blast Furnace Gas) e Alcatrão. Nas Aciarias ocorre a transformação do gusa em aço durante este processo é produzido o gás de Aciaria (LDG – LD Gás). Estes subprodutos são utilizados principalmente como combustível em diversos fornos da usina. O aproveitamento de subprodutos assegura o consumo mínimo de derivados de petróleo principalmente do Gás Natural (GN). O excedente é utilizado para gerar Calor e Energia Elétrica nas Centrais Termelétricas o que assegura a autonomia quanto à necessidade de eletricidade e gera adicional para vendas.

Atualmente existem seis Centrais Termelétricas instaladas (incluindo a coqueria “Heat Recovery”) que garantem sua auto-suficiência energética, contribuem para a redução de emissões atmosféricas, reduzem custos, minimizam impactos sobre a rede pública, e ainda geram uma receita adicional pela venda da energia excedente. Estas seis unidades têm potência instalada próxima dos 485 MW e utilizam como

combustível o BFG, LDG, COG e o alcatrão de forma a garantir o maior aproveitamento dos gases que não são aproveitados nos processos siderúrgicos.

O alto nível de estabilidade operacional da ArcelorMittal Tubarão coloca a empresa entre as siderúrgicas com os mais baixos índices de consumo energético no mundo, sendo 20,8% menor do que a média do setor no Brasil e equiparado aos níveis das siderúrgicas integradas da Europa e da Ásia.

A manutenção da estabilidade operacional da usina está diretamente ligada na disponibilidade dos gases siderúrgicos que mantêm a produção praticamente independente dos derivados de petróleo garantindo um consumo mínimo de GN.

Atualmente várias siderúrgicas, incluindo a ArcelorMittal Tubarão, têm optado por implantar coquerias do tipo "Heat Recovery" por possuírem menor custo de manutenção e operação e por terem menor impacto ambiental. Neste tipo de coqueria a matéria volátil proveniente do processo de coqueificação não é recuperada, mas sim queimada para geração de vapor e energia elétrica, ou seja, não há geração de COG.

O COG é o gás siderúrgico com maior poder calorífico e por isso é utilizado como combustível na maioria dos fornos envolvidos no processo siderúrgico. Aumentar a disponibilidade de COG em uma usina siderúrgica é muito importante para garantir o baixo custo do produto final e a estabilidade do processo.

Este estudo visa buscar alternativas para reduzir o consumo de COG na ArcelorMittal Tubarão utilizando gás de gaseificação que é um gás proveniente de processo de gaseificação. Será verificada a possibilidade de utilizar o gás de gaseificação como combustível principal ou misturado com outros gases siderúrgicos.

1.2 GASES SIDERÚRGICOS

Como citado anteriormente, os gases siderúrgicos são gerados durante o processo de fabricação do aço.

1.2.1 Gás de Coqueria – COG

A Coqueria é destinada a transformar o carvão mineral em coque. Esse processo ocorre em fornos que são câmaras retangulares refratadas. Um conjunto de câmaras é chamado de bateria, a coqueria da ArcelorMittal Tubarão possui 3 baterias de 49 fornos (câmaras) cada. Na parede que separa uma câmera da outra existem dutos verticais, cada fileira de duto é utilizado para aquecer duas câmaras. O aquecimento é feito com um gás rico que é canalizado e distribuído para os dutos verticais no porão da bateria. Normalmente este gás é o próprio COG ou uma mistura de BFG e COG. Na Figura 1 pode-se observar o topo das baterias 1 e 2 da coqueria da ArcelorMittal Tubarão por onde é feito o carregamento de carvão, também é possível observar a máquina de carregamento.



Figura 1 - Foto aérea da coqueria da AMT

No processo de coqueificação ocorre a pirólise seca do carvão, as moléculas complexas das substâncias do carvão, são submetidas a temperaturas elevadas da ordem de 1100 ºC, decompõem-se formando gases, líquidos, compostos sólidos de peso molecular mais reduzido e um resíduo sólido que é o coque.

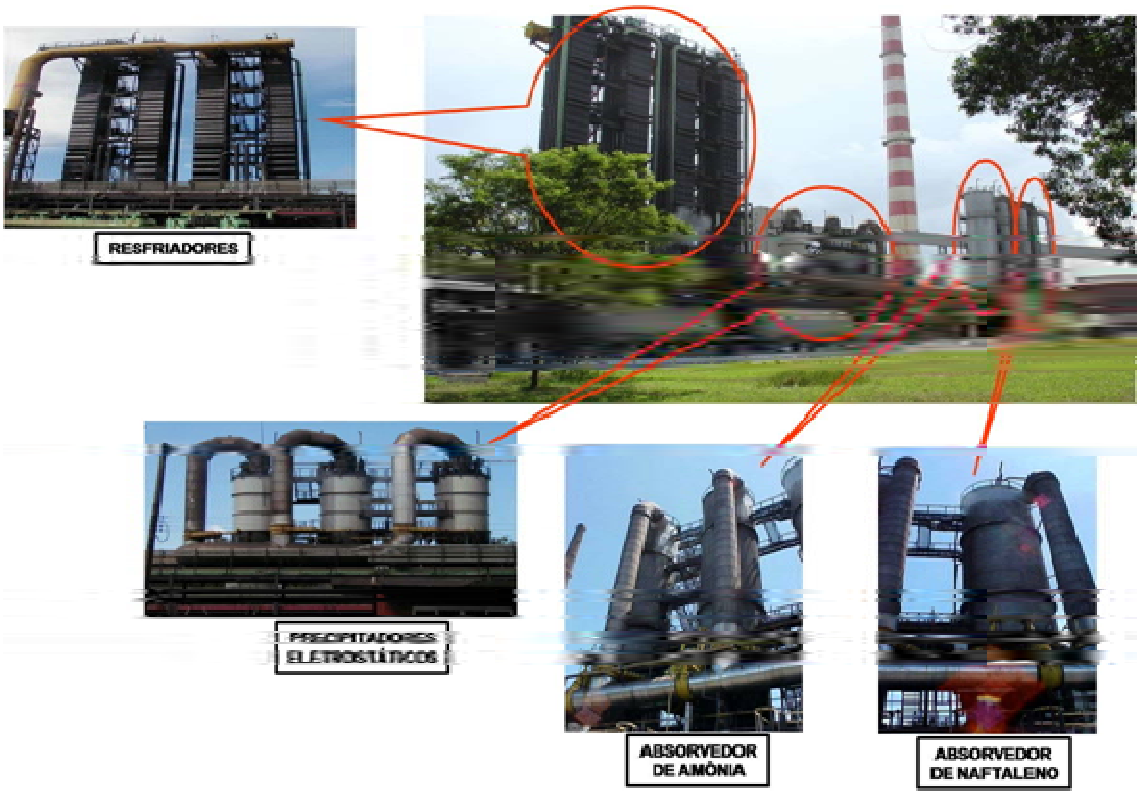


Figura 2 - Equipamentos do processo de tratamento do COG na AMT

O gás que sai das câmaras de coqueificação é conduzido para os resfriadores de COG pelos coletores das baterias. Nos resfriadores a temperatura do COG é reduzida de 83 ºC para 20 ºC. Esta redução de temperatura é fundamental para que ocorra a adequada limpeza do gás nas etapas seguintes. Após o resfriamento, o alcatrão e os sólidos que estão ainda presentes são coletados nos precipitadores eletrostáticos. A eficiência de remoção atinge valores superiores a 99,8%. Em seguida o COG é lavado com água para a redução dos teores da amônia. Com isto a amônia contida no gás é controlada abaixo de 20 mg/Nm^3. Esta etapa é importante para evitar a corrosão das tubulações. E na última etapa de limpeza, o COG é lavado com óleo diesel para remoção do naftaleno. A concentração de naftaleno no COG deve ser menor que 250 mg/Nm^3 para evitar incrustações, uma vez que o naftaleno re-sublima em baixas temperaturas. Após todas estas etapas o gás COG é bombeado pelos exaustores para o

gasômetro e posteriormente enviado aos consumidores finais. A Figura 2 mostra imagens de alguns dos equipamentos responsáveis pelo tratamento do gás COG na ArcelorMittal Tubarão.

A composição química média do COG produzido na ArcelorMittal Tubarão está mostrada na Tabela 1 em percentual volumétrico. As características deste COG estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 1 – Composição química do COG

COG	V (%)
H_2	61,41
CO_2	1,88
C_2H_4	1,84
C_2H_6	0,55
C_2H_2	0,09
H_2S	0,14
C_3H_8	0,09
C_4H_{10}	0,03
C_6H_6	0,80
C_7H_8	0,07
N_2	4,63
CH4	22,15
CO	6,32

Tabela 2 – Características do COG

Propriedade	COG
PCI (kcal/Nm^3)	4362
Densidade relativa (d)	0,352
Massa específica (kg/Nm^3)	0,454
Relação ar/gás (estequiométrica)	4,658
Limites de inflamabilidade (m^3 de ar/m^3 de gás), mín - máx	7,2 – 21,7

O COG por possuir um poder calorífico alto é o principal combustível utilizado nos processos da ArcelorMittal Tubarão. Este gás é utilizado puro no aquecimento de

panelas de aço, nos fornos rotativos da calcinação, na sinterização. Os dois maiores consumidores de COG são a própria coqueria onde pode ser consumido puro ou misturado com BFG, e o forno de reaquecimento de placas do Laminador de Tiras a Quente – LTQ onde é consumido misturado com BFG e LDG.

1.2.2 Gás de Alto Forno – BFG

O BFG é gerado no Alto Forno durante o processo de redução do ferro para produção do gusa. As principais partes de um Alto Forno são o cadinho, rampa, cuba, goela e topo. No topo do alto forno estão localizados os dispositivos de carregamento responsáveis por inserir e distribuir a carga composta por sinter, pelotas, minérios e coque dentro do forno. Também no topo estão localizados os dutos de saída de gás que coletam o gás produzido durante o processo e enviam para o sistema de limpeza. Na parte inferior do forno estão as ventaneiras que insuflam gás resultante da queima de coque com ar quente proveniente dos regeneradores. Este gás entra em contracorrente com a carga, promovendo uma série de reações químicas de redução e fusão dos materiais na região da rampa. A passagem dos gases pela carga provoca a redução do material carregado transformando a carga inicialmente sólida em pastosa e depois líquida (gusa e escória), enquanto o gás redutor sobe em contracorrente. Este gás arrasta partículas de minério, coque e cal e por isso precisa passar por um processo de limpeza antes de ser utilizado.

A composição química média do BFG produzido na ArcelorMittal Tubarão está mostrada na Tabela 3 em percentual volumétrico. As características do BFG são mostradas na Tabela 4.

Tabela 3 – Composição química do BFG

BFG	V (%)
H_2	3,81
CO_2	22,57
N_2	50,27
CO	23,36

Tabela 4 – Características do BFG

Propriedade	BFG
PCI (kcal/Nm3)	803
Densidade relativa (d)	1,06
Massa específica (kg/Nm3)	1,37
Relação ar/gás (estequiométrica)	0,646
Limites de inflamabilidade (m3 de ar/m3 de gás), mín – máx	35 – 73,5

Cerca de 30% do BFG é utilizado no regenerador do próprio Alto Forno para pré-aquecer o ar que é enviado para as ventaneiras responsáveis pela injeção de ar, com isso consegue-se uma economia considerável de combustível sólido no processo de redução.

Devido ao fato do BFG possuir um poder calorífico muito baixo é incomum utilizá-lo sozinho como gás combustível. Portanto, o restante do gás é misturado ao gás de coqueira para então poder ser utilizado como gás combustível nas Centrais Termoelétricas para geração de calor e eletricidade, para aquecimento dos fornos das coquerias reduzindo o consumo de COG neste processo ou nos fornos de reaquecimento de placas para produção de bobinas de aço.

1.2.3 Gás de Aciaria – LDG

O gás LDG é gerado na aciaria durante o sopro de oxigênio nos conversores ou convertedores. O sopro é realizado objetivando a descarburação do ferro-gusa. Durante este processo ocorre a oxidação dos elementos contidos no ferro-gusa (carbono e outros minerais), gerando a elevação da temperatura do metal e a eliminação dos elementos indesejáveis no aço.

Logo após o início do sopro a formação de $CO+CO_2$ é iniciada, porém o determinante para que a recuperação de gás seja iniciada são os teores de CO e O_2. Esses números podem variar dependendo do que se deseja do gás e de sua aplicação, mas normalmente um gás recuperável possui teor de CO acima de 30% e teor de O_2 abaixo de 2%. Em média recupera-se o gás situado entre o segundo e o décimo sexto minuto de sopro, o que corresponde a 70~80% do total de gás gerado em uma corrida.

Esses números deslocam-se influenciados por motivos como a taxa de gusa líquido, a vazão de O_2 e a prática operacional.

A recuperação de LDG começa pela saia móvel que regula a entrada de ar para dentro do sistema. Em seguida o gás é enviado para um sistema de lavagem formado por um saturador e um anel lavador. No saturador o gás é resfriado e saturado com água, com isso cerca de 70~75% dos particulados mais pesados são coletados. No anel lavador o gás é acelerado e chega a velocidades de 120m/s, nesta velocidade entra em contato com a água este impacto causa o molhamento (englobamento) total das micropartículas que seguem para a câmara de separação de gotas. O exaustor IDF (Induced Draft Fan) é responsável por fazer o gás passar pelo sistema de limpeza, depois dele o gás pode ser direcionado para torre de queima ou pode ir para o gasômetro. Uma válvula três vias é responsável por desviar o fluxo para chaminé ou para o gasômetro. O destino do gás é determinado principalmente pela sua composição química como explicado anteriormente.

A composição química média do LDG produzido na ArcelorMittal Tubarão está mostrada na Tabela 5 em percentual volumétrico. As características deste LDG estão mostradas na Tabela 6.

Tabela 5 - Composição química do LDG

LDG	V (%)
H_2	0,7
CO_2	12,5
O_2	0,3
N_2	15,6
CO	70,9

Tabela 6 Características do LDG

Propriedade	LDG
PCI (kcal/Nm3)	2160
Densidade relativa (d)	1,03
Massa específica (kg/Nm3)	1,33
Relação ar/gás (estequiométrica)	3,83
Limites de inflamabilidade (m3 de ar/m3 de gás), mín – máx	12,5 – 75,0

O LDG é um gás de poder calorífico médio e é utilizado em vários processos na ArcelorMittal Tubarão. Sozinho este gás é utilizado para geração de energia na Central Termoelétrica número 4 e nos fornos verticais de calcinação. Quando misturado com o COG este gás é utilizado como combustível nos fornos de reaquecimento de placa, sendo esta sua principal aplicação.

1.2.4 Distribuição dos Gases Siderúrgicos

Os gases siderúrgicos são utilizados como combustível em diversos processos siderúrgicos. A figura 3 mostra a distribuição destes gases dentro da AMT. As torres de queima representadas na figura são utilizadas apenas como dispositivo de segurança para garantir a pressão do processo, tem-se por objetivo queimar o mínimo possível de gás nas torres.

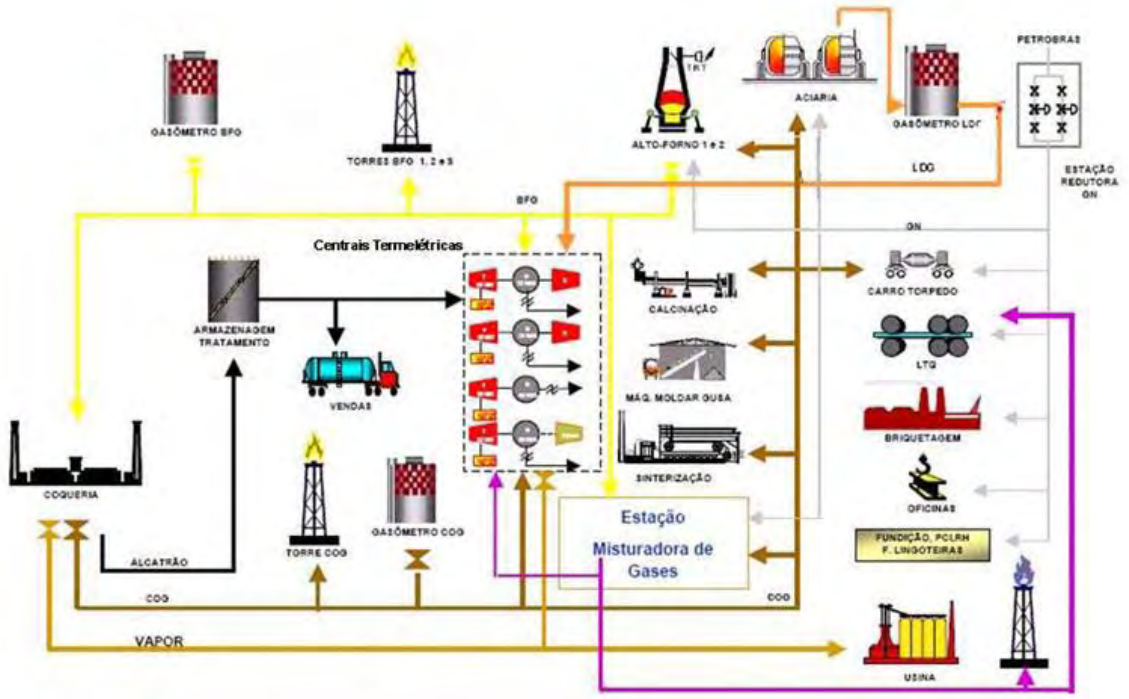


Figura 3 - Distribuição dos gases siderúrgicos na AMT

1.3 GÁS NATURAL E GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO

1.3.1 Gás Natural – GN

O GN pode ou não ocorrer associado ao petróleo e quando ocorre junto ao petróleo ele é produzido em decorrência da produção de petróleo. O GN pode ser

enviado para gasodutos de transporte e distribuição no mercado consumidor, pode ser re-injetado num campo petrolífero para manter a pressão do reservatório ou pode ser usado no campo de extração de petróleo para geração de vapor e eletricidade necessários em uma plataforma.

O GN, antes de ser enviado para consumo é tratado nas Unidades de Processamento de Gás Natural – UPGNs. A principal função destas estações é retirar do GN suas frações condensáveis que são constituídas por GLP, nafta leve e água. Por questões de segurança estes condensáveis devem ser retirados do GN antes deste ser vendido.

O GN é um excelente combustível, pois não contém compostos sulfurados, demanda excesso de ar muito baixo e queima com baixas emissões de NO_x e de particulados.

A composição química média do GN utilizado na ArcelorMittal Tubarão está mostrada na Tabela 7 em percentual volumétrico. As características deste GN estão mostradas na Tabela 8.

Tabela 7 Composição química do GN

GN	V (%)
CO_2	0,42
C_2H_6	4,96
C_3H_8	2,05
C_4H_{10}	1,09
C_5H_{12}	0,14
C_6H_{14}	0,07
N_2	1,42
CH_4	90,23

Tabela 8 – Características do GN

Propriedade	GN
PCI (kcal/Nm^3)	9280
Densidade relativa (d)	0,63
Massa específica (kg/Nm^3)	0,810
Relação ar/gás (estequiométrica)	10,29
Limites de inflamabilidade (m^3 de ar/m^3 de gás), mín - máx	4,7 – 14,8

1.3.2 Gás Liquefeito de Petróleo – GLP

O GLP é uma mistura de hidrocarbonetos com três ou quatro átomos de carbono (propano, propeno, butano e buteno), podendo apresentar-se isoladamente ou em mistura entre si e com pequenas frações de outros hidrocarbonetos. Pode ocorrer naturalmente no petróleo em um percentual máximo da ordem de 2% em volume ou pode ocorrer em associação com o GN, sendo dele separado nas UPGN's. É chamado de "gás liquefeito" por se tratar de um gás que se liquefaz na temperatura ambiente a baixas pressões, na faixa de 6 a 12 kgf/cm².

É conhecido também como gás de cozinha por sua maior aplicação ser na cocção dos alimentos, porém também é utilizado em empilhadeiras, soldagem, teste de fogões, maçaricos e outras aplicações industriais. (ANP)

Nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) ele se apresenta em estado gasoso. E torna-se líquido quando submetido a pressões relativamente baixas ou quando resfriado. O gás dentro de um recipiente encontra-se no estado saturado. Do volume total de um recipiente no máximo 85% é de gás em fase líquida e no mínimo 15% em fase de vapor. Isso constitui um espaço de segurança que evita uma pressão elevada dentro do recipiente. Os gases Propano e Butano são inodoros, porém é acrescentado substância orgânica (mercaptantes) para que produza odor para fácil percepção em caso de vazamento. A densidade média do GLP é de 522 kg/m^3, seu poder calorífico é de 11.300 kcal/kg. Deve-se ressaltar que estes são valores médios, pois a composição química do GLP varia de acordo com a fonte e a forma de extração (Morais 2005).

Na siderurgia o GLP é utilizado em misturas com ar respeitando os limites ditados pelo Índice de Wobbe para substituir o GN no caso de falta deste. A falta de GN constitui-se um problema sério para boa parte das indústrias brasileiras, portanto é estratégico para as indústrias instalar uma unidade "backup" de combustível alternativo. Normalmente opta-se pela mistura GLP+Ar, que é conhecida como ar propanado ou gás natural sintético, pela facilidade de obtenção do GLP no mercado.

1.4 GÁS DE GASEIFICAÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente e o interesse mundial de gerar energia de maneira limpa e sustentável despertou grande interesse na utilização de gases combustíveis gerados a partir da gaseificação de combustíveis sólidos como o carvão e a biomassa. Dentre as vantagens dos combustíveis gasosos sobre os sólidos podemos destacar: o gás combustível pode ser distribuído facilmente; sua combustão pode ser amplamente controlada a fim de se obter alta eficiência; pode queimar automaticamente; queima com emissão de poluentes menor; não necessita de grandes espaços para armazenagem; ideal para cozer e aquecer residências; pode ser utilizado em motores ou turbinas para geração de potência mecânica (Reed, 1981)

O processo de gaseificação gera um gás energético que pode ser utilizado como combustível em vários processos. Este gás quando é gerado em um processo de gaseificação, que utiliza carvão como combustível e oxigênio puro, pode ser utilizado como matéria prima na síntese química de diversas substâncias, tais como metanol, gasolina e cadeias de hidrocarbonetos, como plástico, por isso este gás é chamado de gás de síntese. Ele também pode ser utilizado como combustível em motores, turbinas para geração de potência ou energia elétrica, bombas de irrigação e para geração de calor.

Quando o gás é gerado em um processo de gaseificação baseado em outros combustíveis, como a biomassa, e utiliza ar no lugar de oxigênio puro, sua composição química muda e a síntese química não é mais viável. No entanto, este gás ainda pode ser utilizado como combustível. De agora em diante chamaremos o gás de gaseificação gerado com a utilização de ar como *syngas*.

Quando um material sólido ou líquido contendo carbono é gaseificado, as substâncias indesejáveis tais como compostos de enxofre e a cinza podem ser removidas do gás. Ao contrário dos processos de combustão, que trabalham com ar adicional, a gaseificação opera em condições subestequiométrica com a fonte do comburente controlada para garantir a geração tanto de calor como de gás combustível durante a gaseificação do material.

Nos processos de gaseificação as principais reações químicas que ocorrem são:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

$$C + 2H_2O \rightarrow CO + 2H_2$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$$

$$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$$

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

$$C + H_2O \rightarrow \frac{1}{2}CH_4 + \frac{1}{2}CO_2$$

A maior parte do oxigênio, puro ou ar, injetado em um gaseificador é consumido durante as três primeiras reações químicas, fornecendo calor.

Além dos agentes gaseificadores (ar, oxigênio e vapor) e da temperatura e pressão de operação do gaseificador, outros fatores podem influenciar na composição

química, no poder calorífico e na utilização do gás produzido pelo gaseificador. Os fatores a seguir influenciam nas características do *syngas*:

1. Composição da matéria-prima;
2. Preparação da matéria-prima e tamanho de partícula;
3. Temperatura do reator;
4. Tempo de residência;
5. Sistema da alimentação - seco ou úmido;
6. Geometria do fluxo de matéria-prima e reagente;
7. Sistema de remoção do mineral - cinza ou escória;
8. Método de aquecimento e transferência de calor - direto ou indireto;
9. Sistema de limpeza do *syngas* - baixa ou alta temperatura e processos usados para remoção do enxofre, nitrogênio, particulados e os outros compostos que podem impactar a compatibilidade do *syngas* para aplicações específicas, tais como: turbina e célula combustível para a geração de eletricidade, a produção do hidrogênio, a produção de combustível líquido, ou a produção química.

Dependendo do processo de gaseificação, do tipo de matéria-prima e do reagente utilizados podem ser gerados diversos tipos de *syngas*. No caso da gaseificação de leito fluidizado a composição química do gás varia mais em função das características do processo do que da matéria prima utilizada.

Uma descrição recente sobre o *syngas* pode ser encontrada no artigo de Demirbas (2007). Outro artigo recente na área é aquele de Li et al.(2009), que conduziram um estudo experimental na produção de *syngas* pela gaseificação de carvão e mistura de carvão com biomassa (serragem de pinho e palha de arroz) em leito fluidizado. Houve injeção de oxigênio puro junto com ar na tentativa de produzir um gás mais rico. Velez et al. (2007) também realizaram uma pesquisa experimental sobre co-gaseificação de carvão e biomassa em leito fluidizado.

Assim, há, na literatura, uma variedade de composições de *syngas*. Para a análise do presente trabalho, foram escolhidas as composições mostradas na Tabela 9. São gases produzidos por diferentes processos de gaseificação e agentes gaseificadores. Seis destes gases são de baixo poder calorífico e dois são de médio poder calorífico.

Tabela 9 - Composições de *syngas* consideradas no presente trabalho.

Número	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo de gaseificador	Leito fluidizado	Contracorrente	Concorrente	Leito fluidizado	Leito fluidizado*	Leito fluidizado*	Leito fluidizado	Leito fixo
Matéria prima	Biomassa	Biomassa	Biomassa	Biomassa	Linhito	Carvão betuminoso	Carvão betuminoso	Biomassa
H_2 (%)	9	11	17	18,9	32,9	37,3	18,7	20
CO (%)	14	24	21	31,0	56,7	52,0	30,7	15
CO_2 (%)	20	9	13	6,7	6,2	5,3	1,9	15
CH_4 (%)	7	3	1	2,1	2,6	3,5	0,9	4
N_2 (%)	50	53	48	40,8	0,9	1,0	47,0	45
H_2S (%)	-	-	-	0,03	0,2	0,3	0,2	-
Ar (%)**	-	-	-	0,5	0,6	0,6	0,6	-
O_2 (%)	-	-	-	-	-	-	-	1
PCI (kcal/Nm^3)	1254	1265	1158	1605	2793	2850	1498	1311
W (kcal/Nm^3)	1272	1327	1231	1763	3341	3535	1665	1415
ρ (kg/Nm^3)	1,25	1,17	1,14	1,07	0,899	0,837	1,04	1,11
Referência	(BRIDGEWATER, 1991)	(BRIDGEWATER, 1991)	(BRIDGEWATER, 1991)	(HIGMAN e BURGT, 2007)	(HIGMAN e BURGT, 2007)	(HIGMAN e BURGT, 2007)	(HIGMAN e BURGT, 2007)	(CORONADO, 2007)

*Gaseificação com O_2/vapor (outros casos, com ar).
**Incorporado como N_2.

2 INTERCAMBIABILIDADE DE GASES

2.1 PRELIMINARES

Sejam por razões econômicas ou por indisponibilidade de um determinado gás combustível, muitas vezes, na indústria, é necessária a substituição de um gás por outro tipo de gás combustível. Recentemente, houve um exemplo da importância de se ter uma opção para o combustível utilizado nos processos industriais quando o fornecimento do gás natural boliviano era incerto e a produção deste gás no Brasilnão era suficiente para atender a demanda do país.

Há critérios para se estabelecer a semelhança ou a intercambiabilidade entre gases. Para saber se um determinado gás pode ser substituído por outro, deve-se analisar várias características dos gases em questão e para isso há, na literatura, vários métodos. Cada método baseia-se em uma série de pesquisas práticas, feitas para determinados tipos de gases e para alguns queimadores padronizados. Normalmente, os gases analisados na indústria são diferentes daqueles utilizados no desenvolvimento dos métodos, por isso é recomendado utilizar mais de um método analítico.

Neste trabalho, serão considerados dois métodos, que são muito utilizados na indústria: o Método do Índice de Wobbe e o Método dos Múltiplos Índices de Weaver, descritos nos itens a seguir.

2.2 MÉTODO DO ÍNDICE DE WOBBE

Wobbe desenvolveu seu índice em 1926 ao estudar o fenômeno da combustão de gases injetados através de um orifício (Mullinger e Jenkins, 2008; Garcia, 2002). Este índice se relaciona ao fluxo de energia térmica supondo inalteradas as condições de pressão de suprimento do gás e o diâmetro do orifício através do qual o gás flui.

O Índice de Wobbe decorre da seguinte equação:

Taxa de energia térmica (kcal/s) = poder calorífico do gás (kcal/Nm3) x vazão volumétrica do gás (Nm3/s), ou seja:

$$\dot{Q} = \Delta H_{gás} Ak \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}\,, \tag{1}$$

na qual $\dot{Q}$ é a taxa de energia térmica, $\Delta H_{gás}$ é o poder calorífico do gás, A é a área da seção transversal do orifício de gás no queimador, k é o coeficiente de descarga do orifício, Δp é a pressão manométrica de suprimento do gás, e ρ = massa específica do gás.

A fórmula pode ser escrita como:

$$\dot{Q} = \Delta H_{gás} Ak \frac{1}{\sqrt{\rho_{ar}}} \sqrt{\frac{\Delta p}{d}}\,, \tag{2}$$

na qual ρ_{ar} = massa específica do ar e d = densidade do gás combustível em relação ao ar.

Wobbe definiu seu índice como:

$$\mathrm{W} = \frac{\Delta \mathrm{H}_{\mathrm{gás}}}{\sqrt{\mathrm{d}}}\,, \tag{3}$$

de tal maneira que

$$\dot{Q} = \frac{WAk}{\sqrt{\rho_{ar}}} \sqrt{\Delta p}\,. \tag{4}$$

Vê-se claramente que dois gases diferentes produzirão, no mesmo orifício, com a mesma diferença de pressão, a mesma taxa de energia térmica se os Índices de Wobbe forem os mesmos.

Um dos critérios adotados para que dois gases sejam intercambiáveis é que seus Índices de Wobbe sejam aproximadamente os mesmos, dentro de um intervalo de ± 5%. Para se conseguir um Índice de Wobbe adequado, pode-se utilizar misturas de gases na substituição.

2.3 MÉTODO DOS MÚLTIPLOS ÍNDICES DE WEAVER

Weaver desenvolveu um método baseado em índices para aferir o grau de intercambiabilidade entre gases (Garcia, 2002). São seis índices, dos quais o primeiro é baseado no índice de Wobbe e os outros avaliam características da chama. Considerando o subscrito R relativo ao gás de referência e o subscrito S relativo ao gás substituto, os índices são os seguintes:

$$J_H = \frac{PCI_S}{PCI_R}\left(\frac{d_R}{d_S}\right)^{0,5} \text{ (aporte de calor),} \tag{5}$$

na qual d é a densidade do respectivo gás com relação ao ar. Este índice é a razão entre os Índices de Wobbe para os dois gases.

$$J_A = \frac{A_S}{A_R}\left(\frac{d_R}{d_S}\right)^{0,5} \text{ (aeração primária),} \tag{6}$$

na qual A é o ar necessário para a combustão estequiométrica, em termos de volume de ar por volume de gás combustível. Este índice fornece não apenas uma medida precisa das condições relativas de suprimento de ar primário para a combustão dos dois gases, como também do ar secundário.

$$J_L = J_A \frac{S_S}{S_R}\frac{1-Q_S}{1-Q_R} \quad \text{(descolamento de chama),} \tag{7}$$

na qual Q é a fração volumétrica de oxigênio no gás e S é o fator de velocidade de chama de Weaver (representa o percentual da velocidade de chama do gás com relação à velocidade de chama do hidrogênio), calculado por:

$$S = \frac{\sum x_i B_i}{A + 1 + 5Z - 18{,}8Q}, \tag{8}$$

na qual x_i é a fração volumétrica do componente i, B_i é o coeficiente de velocidade de chama de Weaver para o componente i, e Z é a fração volumétrica de inertes (N_2, CO_2)

no gás. Coeficientes de velocidade de Weaver para diferentes gases são dados na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficientes de velocidade de Weaver.

Componente	Fator B_i	Componente	Fator B_i
H_2	339	C_2H_4	454
CO	61	C_3H_6	674
CH_4	148	i-C_4H_{10}	513
C_2H_6	301	i-C_4H_8	500
C_3H_8	398	n-C_4H_{10}	513
H_2S	200	C_5H_{12}	600

Os outros índices de Weaver são apresentados a seguir.

$$J_F = \frac{S_S}{S_R} - 1{,}4J_A + 0{,}4 \text{ (retorno de chama).} \quad (9)$$

$$J_Y = J_A + \frac{N_S - N_R}{110} - 1{,}0 \text{ (pontas amarelas),} \quad (10)$$

na qual N é o número de átomos de carbono facilmente liberados na combustão de 100 moléculas de gás. Todos os átomos de carbono de hidrocarbonetos insaturados e cíclicos, bem como todos os átomos de carbono de hidrocarbonetos saturados menos um por molécula, são considerados facilmente liberados.

$$J_I = J_A - 0{,}366\frac{R_S}{R_R} - 0{,}634 \text{ (combustão incompleta),} \quad (11)$$

na qual R é a proporção de átomos de hidrogênio para o número de átomos de carbono, considerando somente os hidrocarbonetos.

Os limites propostos por Weaver, após considerável experimentação, são:

$0{,}95 \le J_H \le 1{,}05$;

$J_L \ge 0{,}64$;

$J_F \leq 0{,}08$;

$J_I \leq \text{zero}$;

$J_Y \leq 0{,}14$.

2.4 PESQUISA RECENTE NA ÁREA

Há também resultados de pesquisa recente na área, mostrando que o tema escolhido continua importante no que se refere à busca por resultados inéditos.

Marchionna et al. (2008) conduziram estudos experimentais e de modelagem para investigar os potenciais da substituição de GLP por éter dimetílico (DME) para aplicações domésticas. Seus resultados referem-se não somente a DME puro, mas também para misturas independentes de DME com o próprio GLP, propano e butano. A principal conclusão é que misturas DME/GLP (DME: 15-20% em volume) tem muito melhor desempenho que o DME puro.

Lee et al. (2008a) desenvolveram um novo tipo de diagrama para estabilidade de chamas, adequado para intercambiabilidade de gases. Neste novo diagrama, a abscissa é a vazão de ar e a ordenada é o Índice de Wobbe. O uso do diagrama foi validado em testes usando diversos combustíveis, incluindo metano, propano e misturas biogás-propano.

Lee et al. (2008b) estudaram a intercambiabilidade de misturas de biogás de aterro sanitário (LFG, em inglês) e GLP, visando aplicações domésticas. As misturas foram preparadas de modo a possuir Índice de Wobbe e poder calorífico similares aos do gás natural. Eles chegaram à conclusão que as misturas investigadas podem substituir o gás natural, desde que o dispositivo de entrada de ar seja ajustado de maneira a diminuir a vazão de ar sugada pelo jato de combustível.

Em um trabalho anterior, Lee e Hwang (2007) investigaram experimentalmente a estabilidade de chama de LFG puro e de misturas entre LFG e GLP (estas com os mesmos Índices de Wobbe) para substituição ao gás natural. Para um queimador difusivo, a estabilidade de chama das misturas de LFG com GLP é inferior àquela do gás natural para condições de recirculação fraca. Contudo, em condições de

recirculação forte, a estabilidade da chama das misturas se aproxima daquela do gás natural.

Malenshek e Olsen (2008), na busca de novos combustíveis gasosos alternativos, simularam oito misturas combustíveis gasosas em um motor, comparando-os através do número de metano (MN), que é o parâmetro usado para quantificar a tendência de detonação de um gás. Foram testadas misturas alternativas de 24 a 140 MN (GN situa-se entre 75 e 95 MN). Os gases utilizados nas misturas foram: metano, etano, propano, butano, monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio e dióxido de carbono.

Lobar et al. (2007) desenvolveram uma nova metodologia para a determinação e medida de propriedades de gás natural e de misturas alternativas de gases combustíveis: poder calorífico, Índice de Wobbe e razão ar-combustível estequiométrica. Com o sensor desenvolvido, os valores obtidos para as propriedades mencionadas concordam em 0,5% com resultados de cromatografia.

Zachariah-Wolff et al. (2007) investigaram condições e restrições para aplicação do Índice Wobbe como principal critério para a distribuição de gases combustíveis na Holanda. Eles concluíram que há propriedades de gases que podem aumentar o intervalo de intercambiabilidade de 5% de variação no Índice de Wobbe.

2.5 PLANILHA EXCEL DESENVOLVIDA

2.5.1 Cálculo do Índice de Wobbe de misturas

O critério do Índice de Wobbe foi escolhido para nortear o presente estudo. O poder calorífico adotado para cálculo foi o inferior (PCI). A planilha desenvolvida permite a obtenção de parâmetros de balanço de massa de combustão para diversas misturas de gases combustíveis. O Apêndice A mostra imagens da planilha, nas quais pode-se observar os detalhes relatados a seguir.

Primeiramente, deve-se entrar com a composição volumétrica dos gases que compõem a mistura a ser analisada. Esta opção foi deixada em vermelho na planilha principal.

A planilha permite que se trabalhe com a mistura de até cinco gases. Caso também se deseje analisar outro gás cujos componentes não estejam na lista considerada na planilha, basta mudar o nome na coluna correspondente e entrar com a composição do mesmo, desde que sua composição volumétrica possa ser especificada pelos 23 componentes especificados.

É também possível analisar um gás que contenha outros componentes que não os especificados aqui. Neste caso, a planilha pode ser facilmente modificada.

Como geralmente a análise laboratorial dos gases combustíveis não fecha em 100%, por algum componente não ser considerado no procedimento, por algum excedente, ou mesmo por erro do instrumento, a planilha normaliza as composições para esse total, multiplicando cada valor de composição por 100 e dividindo pela soma dos valores. Esta correção está especificada na planilha principal como “Planilha obtém composições corrigidas para 100%”.

A seguir, deve-se entrar com a proporção dos gases que compõem a mistura desejada. Os valores também estão indicados em vermelho. Aqui, deve-se tomar o cuidado para que a soma das proporções seja realmente 100%.

A planilha, então, calcula a composição volumétrica do gás misto formado. À direita das células correspondentes à composição volumética, têm-se os números de mols correspondentes aos elementos C, H, O, S e N para cada um dos componentes do gás misto.

A planilha calcula as contribuições de cada um dos componentes para a massa molecular do gás misto. A massa molecular do ar foi colocada duas células abaixo. Mais duas células abaixo, em azul, é calculada a densidade relativa do gás misto, simplesmente dividindo a massa molecular do gás pela do ar.

As contribuições de cada um dos componentes para o poder calorífico inferior (PCI) do gás misto também são calculadas. O PCI para cada componente individual é multiplicado pela respectiva fração molar. O PCI para o gás misto é calculado.

Dividindo o valor pelo volume de um mol de gás ($22{,}4x10^{-3}$ Nm^3), obtém-se o parâmetro em $kcal/Nm^3$, apresentado em azul.

Com o PCI e a densidade relativa, o Índice de Wobbe do gás misto é calculado.

2.5.2 Razão ar/combustível e composição dos produtos de combustão

A fórmula geral do gás misto foi tomada como $C_nH_mO_pS_qN_r$. Os valores de n, m, p, q e r são calculados nas células C101, D101, E101, F101 e G101, respectivamente. A reação de combustão estequiométrica deste combustível, com ar, é escrita como:

$$1\ C_nH_mO_pS_qN_r + x\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow$$

$$n\ CO_2 + \frac{m}{2} H_2O + q\ SO_2 + (\frac{r}{2} + 3{,}76\ x)\ N_2, \qquad (R1)$$

na qual, do balanço de oxigênio, tem-se:

$$p + 2x = 2n + \frac{m}{2} + 2q, \qquad (12)$$

ou seja,

$$x = n + \frac{m}{4} + q - \frac{p}{2}. \qquad (13)$$

Com um excesso de ar normalizado α, a reação de combustão fica:

$$1\ C_nH_mO_pS_qN_r + \alpha\ x\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow$$

$$n\ CO_2 + \frac{m}{2} H_2O + q\ SO_2 + (\frac{r}{2} + 3{,}76\ x)\ N_2 + (\alpha - 1)\ x\ O_2\ , \qquad (R2)$$

na qual o valor de x é o mesmo dado pela equação (13).

Das equações acima, a relação entre as vazões volumétricas de ar e gás, se ambas forem medidas com o volume em Nm^3, será:

$$\left.\frac{\dot{V}_{ar}}{\dot{V}_{gás}}\right|_{normal} = 4{,}76\,\alpha x\,. \qquad (14)$$

Para ar e gás misto em temperaturas diferentes daquela para vazões normais, que correspondem a 0 ^{o}C, deve-se corrigir a razão ar/combustível em base volumétrica para:

$$\frac{\dot{V}_{ar,T_1}}{\dot{V}_{gás,T_2}} = \frac{T_1 + 273{,}16}{T_2 + 273{,}16}.4{,}76\,\alpha x\,, \qquad (15)$$

na qual T_1 e T_2 são as temperaturas do ar e do gás misto, respectivamente, em ^{o}C.

Voltando à planilha, o valor estequiométrico para x, chamado de X_{st}, é calculado para o excesso de ar normalizado, α, igual à unidade. Este valor é apresentado.

Os coeficientes e as concentrações dos componentes dos produtos de combustão para situações de estequiometria e de excesso de ar ($\alpha \geq 1$) também são calculados.

2.6 MISTURA DE GASES

Misturar gases é uma prática comum na siderurgia que visa otimizar o aproveitamento dos gases siderúrgicos. Esta otimização ocorre com o melhor gerenciamento dos gases gerados a partir dos processos produtivos da coqueria, altos fornos e aciaria que estão disponíveis para outros processos. Estes gases são melhor aproveitados quando misturados entre si em proporções específicas para atender a diversos processos, e o gás resultante desta mistura é chamado de gás misto – MG. É desta forma que se torna possível utilizar o BFG que é um gás pobre para aquecer o forno de reaquecimento de placas do laminador de tiras a quente – LTQ. Na ArcelorMittal Tubarão, o gás misto é utilizado principalmente na coqueria e no forno de reaquecimento.

No caso do forno de reaquecimento de placas do LTQ da ArcelorMittal Tubarão, foi necessário utilizar um sistema de mistura de gases capaz de gerar um gás com características específicas requeridas pelo equipamento. Os fornos do LTQ da

ArcelorMittal Tubarão requerem um gás com Índice de Wobbe, W, de 3060 kcal/Nm³, podendo sofrer uma variação máxima de 10% para mais ou para menos, e demandam uma vazão que varia de 3000 a 110000 Nm^3/h por serem fornos digitais. Estes fornos digitais controlam a temperatura através de zonas e cada uma destas zonas possui vários queimadores do tipo on/off. Então, para controlar a temperatura, o sistema do forno liga ou desliga uma ou mais zonas o que gera a grande variação de demanda relatada acima.

Este sistema de mistura de gases é baseado no controle do Índice de Wobbe. Os fornos de reaquecimento possuem vários queimadores e o calor gerado por cada queimador é controlado pela abertura e fechamento de um orifício. Portanto, utilizando-se o controle por W, pode-se garantir a quantidade de calor gerada por cada queimador mesmo quando a composição do gás varia.

A mistura é realizada simultaneamente com quatro gases: COG, BFG, LDG e GN, e atende a dois fornos de LTQ. O fluxograma esquemático da Estação de Mistura de Gases – EMG da AMT está mostrado na Figura 4.

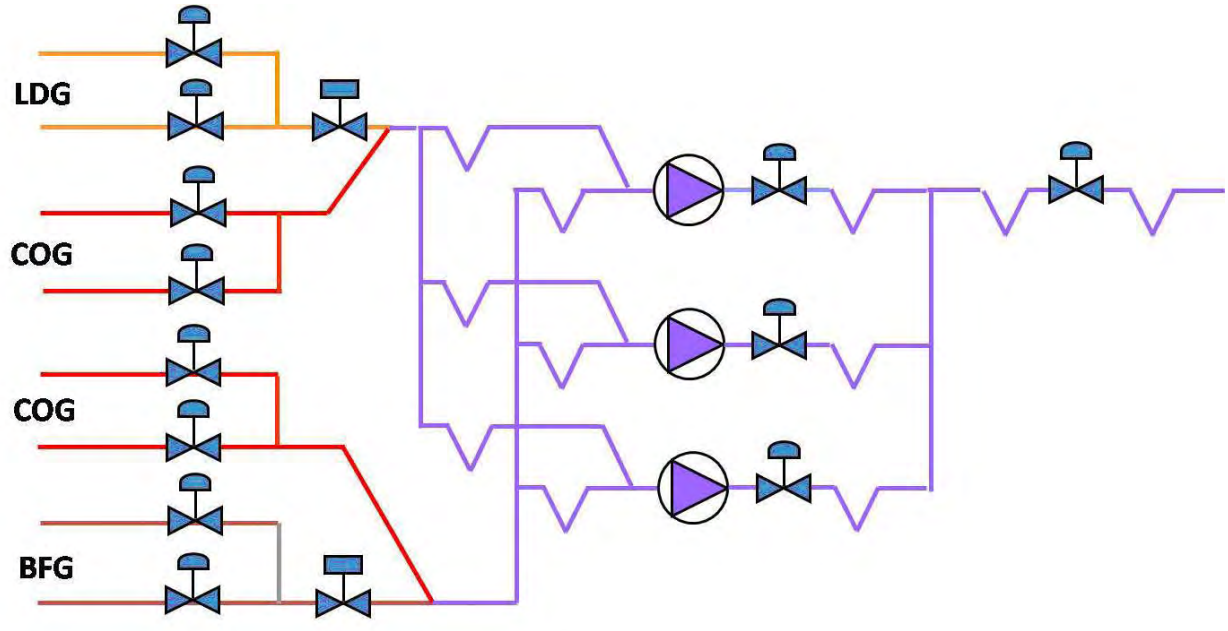


Figura 4 – Fluxograma esquemático da EMG da ArcelorMittal Tubarão.

Para garantir o melhor controle do W, os gases são misturados em pares conforme mostrado na Figura 4. Como a vazão demandada pelos fornos varia muito,

cada gás possui dois ramais de controle; assim, pode-se utilizar válvulas menores, o que proporciona um controle mais eficiente da vazão. Desta forma, pode-se ter dois tipos de mistura antes dos sopradores:

Mistura 1: LDG +COG;

Mistura 2: BFG + COG;

A Figura 5 é uma foto dos ramais da estação onde ocorre a mistura 1 (LDG+COG). O ramal de maior diâmetro corresponde ao LDG por se tratar do gás de menor poder calorífico.



Figura 5 – Ramais da estação de mistura 1

A mistura 1 é aquela que requer menor consumo de COG e, portanto, é a mistura principal. A mistura 2 é utilizada normalmente em vazões mínimas; seu consumo só aumenta na falta de LDG. A mistura 3 só é utilizada quando falta LDG e a disponibilidade de COG não é suficiente para atender à demanda dos fornos; então, utiliza-se o GN como complemento do COG.

A mistura começa com a injeção do COG nos gases LDG e BFG e a homogeneização do gás misto resultante ocorre nos sopradores de gás que servem também para aumentar a pressão do gás misto, garantindo que este chegue aos fornos com uma pressão entre 0,12 e 0,15 kgf/cm^2. Estes sopradores foram projetados para trabalhar com qualquer uma das misturas e podem variar sua rotação de acordo com a demanda do LTQ de forma a evitar que a pressão do sistema sofra grandes alterações para mais ou para menos. A Figura 6 mostra uma foto da região dos sopradores da EMG da AMT.



Figura 6 – Região dos sopradores de gás

Na EMG, o controle principal do Índice de Wobbe é baseado no controle da relação entre os gases, ou seja, a proporção de cada gás na mistura foi previamente calculada, utilizando-se válvulas controladoras de vazão para garantir que esta proporção seja mantida. Como os gases utilizados podem sofrer variações de massa específica e de PCI, utiliza-se um equipamento para medir o W, *online*, das misturas 1, 2 e 3, e também da mistura final (após os sopradores). Com a leitura destes

equipamentos, faz-se o ajuste fino do sistema de controle e garante-se a variação máxima de 10% do W.

A Figura 7 mostra a tela do supervisório da EMG. Nesta tela pode-se verificar o W da mistura, a vazão e pressão de cada gás, o percentual de abertura das válvulas, a rotação dos sopradores e outros parâmetros que permitem acompanhar o processo e identificar qualquer anomalia.

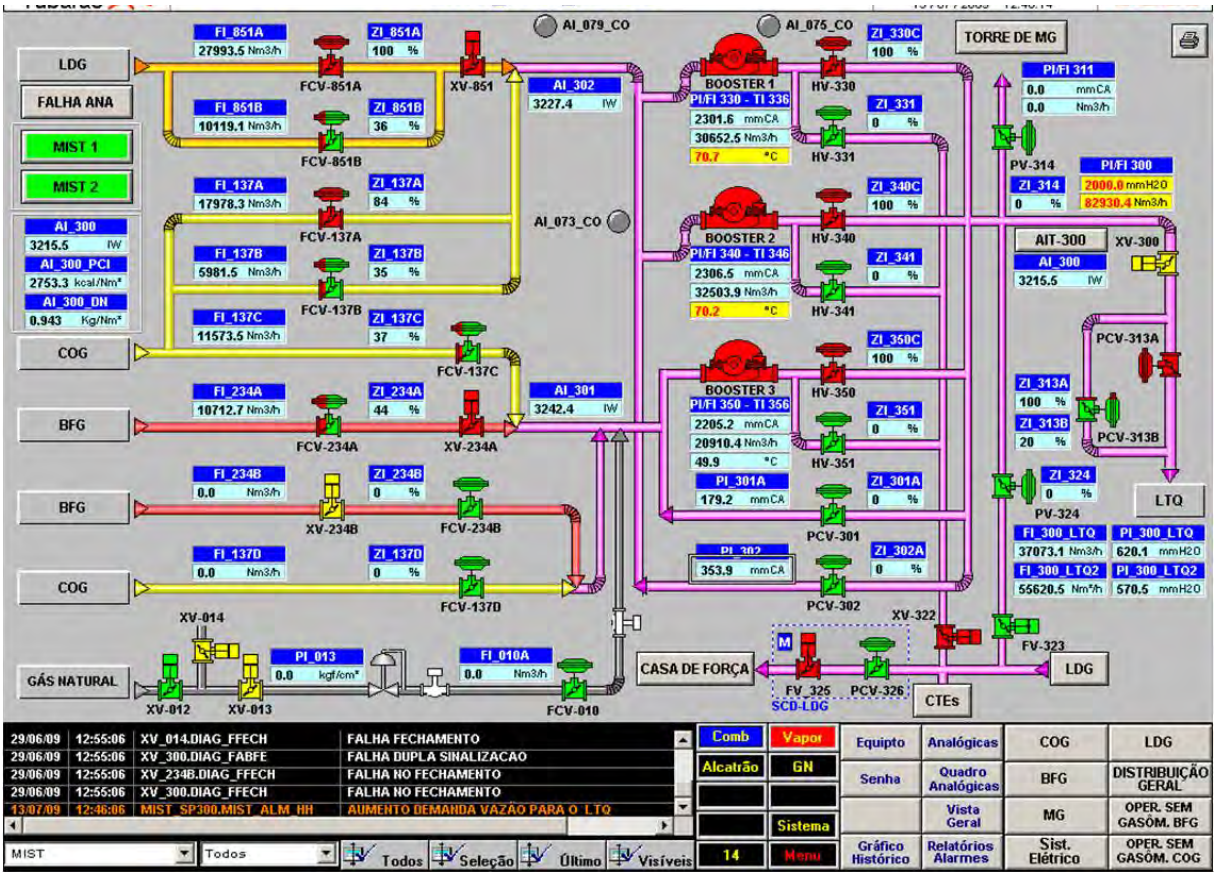


Figura 7 – Supervisório da EMG da AMT

O processo de mistura de gás pode ser uma das melhores formas de utilização do *syngas* na ArcelorMittal Tubarão.

2.7 MISTURA DE GASES COM MESMO ÍNDICE DE WOBBE

Como informado no item 2.6 os gases são misturados em pares visando sempre manter o W igual nas misturas. Neste item será avaliado o resultado da mistura de duas misturas com o mesmo W.

Sejam duas misturas de gases, M_1 e M_2, ambas com o mesmo Índice de Wobbe. Será demonstrado aqui que uma nova mistura, M_3, formada a partir de M_1 e M_2, não manterá o Índice de Wobbe original e que, no entanto, a variação é desprezível. Este fato simplifica bastante o monitoramento das misturas de gases pelo sistema de controle.

Caracterizando as misturas M_1 e M_2 por Índices de Wobbe W_1 e W_2 ($W_1 = W_2$), calores de combustão ΔH_1 e ΔH_2 e massas específicas ρ_1 e ρ_2, respectivamente, tem-se:

$$W_1 = \frac{\Delta H_1}{\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_{ar}}}}, \tag{16}$$

$$W_2 = \frac{\Delta H_2}{\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_{ar}}}}, \tag{17}$$

na qual ρ_{ar} é a massa específica do ar.

Chamando de N a relação entre o número de moles de M_1 e o número de moles de M_2 para formar a mistura M_N, tem-se:

$$N\ M_1 + 1\ M_2 = (N + 1)\ M_N\ . \tag{18}$$

Para a mistura M_N caracterizada como acima, as frações molares de cada um dos componentes gasosos M_1 e M_2 serão, respectivamente:

$$X_1 = \frac{N}{N+1}, \tag{19}$$

$$X_2 = \frac{1}{N+1}. \tag{20}$$

O calor de combustão da mistura M_N será:

$$\Delta H_N = \frac{N\Delta H_1 + \Delta H_2}{N+1}. \tag{21}$$

Para a massa específica deve-se considerar:

$$\rho_N = \frac{m_1 + m_2}{V_1 + V_2} = \frac{\frac{m_1}{V_2} + \frac{m_2}{V_2}}{\frac{V_1}{V_2} + \frac{V_2}{V_2}} = \frac{N\frac{m_1}{V_1} + \frac{m_2}{V_2}}{N+1}, \tag{22}$$

$$\rho_N = \frac{N\rho_1 + \rho_2}{N+1}, \tag{23}$$

na qual m_1 e m_2 são as massas e V_1 e V_2 são os volumes das misturas M_1 e M_2, respectivamente.

O novo Índice de Wobbe será:

$$W_N = \frac{\Delta H_N}{\sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_{ar}}}} = \frac{\frac{N\Delta H_1 + \Delta H_2}{N+1}}{\sqrt{\frac{N\rho_1 + \rho_2}{(N+1)\rho_{ar}}}}, \tag{24}$$

$$W_N = \frac{N\Delta H_1}{\sqrt{N+1}\sqrt{\frac{N\rho_1 + \rho_2}{\rho_{ar}}}} + \frac{\Delta H_2}{\sqrt{N+1}\sqrt{\frac{N\rho_1 + \rho_2}{\rho_{ar}}}}. \tag{25}$$

<u>Primeiro caso</u>: $\rho_1 = \rho_2$

Inserindo $\rho_1 = \rho_2$, tem-se:

$$W_N = \frac{N\Delta H_1}{\sqrt{N+1}\sqrt{\frac{(N+1)\rho_1}{\rho_{ar}}}} + \frac{\Delta H_2}{\sqrt{N+1}\sqrt{\frac{(N+1)\rho_2}{\rho_{ar}}}}, \quad (26)$$

$$W_N = \frac{N}{N+1}W_1 + \frac{1}{N+1}W_2 = \frac{N}{N+1}W_1 + \frac{1}{N+1}W_1 = \frac{N+1}{N+1}W_1 = W_1 = W_2, \quad (27)$$

demonstrando que o novo Índice de Wobbe permanece igual ao Índice de Wobbe original.

Segundo caso: $\rho_1 = k\,\rho_2$, com $k \neq 1$.

O Índice de Wobbe da nova mistura será:

$$W_N = \frac{N\Delta H_1}{\sqrt{N+1}\sqrt{\frac{N\rho_1 + \frac{\rho_1}{k}}{\rho_{ar}}}} + \frac{\Delta H_2}{\sqrt{N+1}\sqrt{\frac{kN\rho_2 + \rho_2}{\rho_{ar}}}}, \quad (28)$$

$$W_N = \frac{N\Delta H_1}{\sqrt{N+1}\sqrt{N+\frac{1}{k}}\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_{ar}}}} + \frac{\Delta H_2}{\sqrt{N+1}\sqrt{kN+1}\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_{ar}}}}, \quad (29)$$

$$W_N = \frac{NW_1}{\sqrt{N+1}\sqrt{N+\frac{1}{k}}} + \frac{W_2}{\sqrt{N+1}\sqrt{kN+1}}, \quad (30)$$

$$W_N = \left(\frac{N}{\sqrt{N+1}\sqrt{N+\frac{1}{k}}} + \frac{1}{\sqrt{N+1}\sqrt{kN+1}} \right) W_1 . \quad (31)$$

Vê-se que o Índice de Wobbe resultante da mistura de dois gases com Índices de Wobbe iguais não depende dos poderes caloríficos de cada um dos gases, apenas da relação entre suas massas específicas (k) e da relação entre seus números de mols (N).

Assim, para $\rho_1 \neq \rho_2$:

$$W_N = F\, W_1, \tag{32}$$

na qual

$$F = \frac{N}{\sqrt{N+1}\sqrt{N+\frac{1}{k}}} + \frac{1}{\sqrt{N+1}\sqrt{kN+1}}. \tag{33}$$

Valores para o fator F podem ser imediatamente encontrados. Considere-se o COG, que é o gás siderúrgico com menor massa específica (0,454 kg/Nm^3). Seu Índice de Wobbe é 7349 kcal/Nm^3. O COG pode ser substituído pelo gás de coqueria sintético ("synthetic coking gas", SCG), que é uma mistura de GLP e ar. Para manter o mesmo Índice de Wobbe do COG, o SCG deve ser composto de 33,95 % de GLP e 66,05 % de ar, o que resulta em uma mistura combustível com massa específica de 1,592 kg/Nm^3. Neste caso, k = 1,592/0,454 = 3,51, resultando em um valor mínimo para F de 0,952, que representa uma variação de 4,8% no Índice de Wobbe, o que ocorre para uma fração molar de 35% do gás mais denso, ou seja, o SCG. Esta é uma variação máxima, uma vez que k = 3,51 é o valor máximo que se pode obter para a razão entre as massas específicas de gases com o mesmo Índice de Wobbe utilizados comumente nas empresas siderúrgicas.

O substituto para o GN é o chamado gás natural sintético (GNS), que também é uma mistura de GLP com ar, porém em outra proporção para manter o Índice de Wobbe (GNS = 57,55% GLP + 42,45% Ar). Neste caso, k = 1,8034 e o valor mínimo para F é 0,981, que representa uma variação máxima de 1,9% no Índice de Wobbe, que ocorre para uma fração molar de 40% do gás mais pesado, no caso o GNS.

A Figura 8 apresenta um gráfico da máxima variação de F com a fração molar do gás mais pesado, para as misturas COG + SCG e GN + GNS. A Figura 9 apresenta a máxima variação do Índice de Wobbe como função da relação entre as massas específicas, k. Vê-se, então, que se pode desprezar a variação no Índice de Wobbe para a maior parte das misturas utilizadas na indústria siderúrgica.

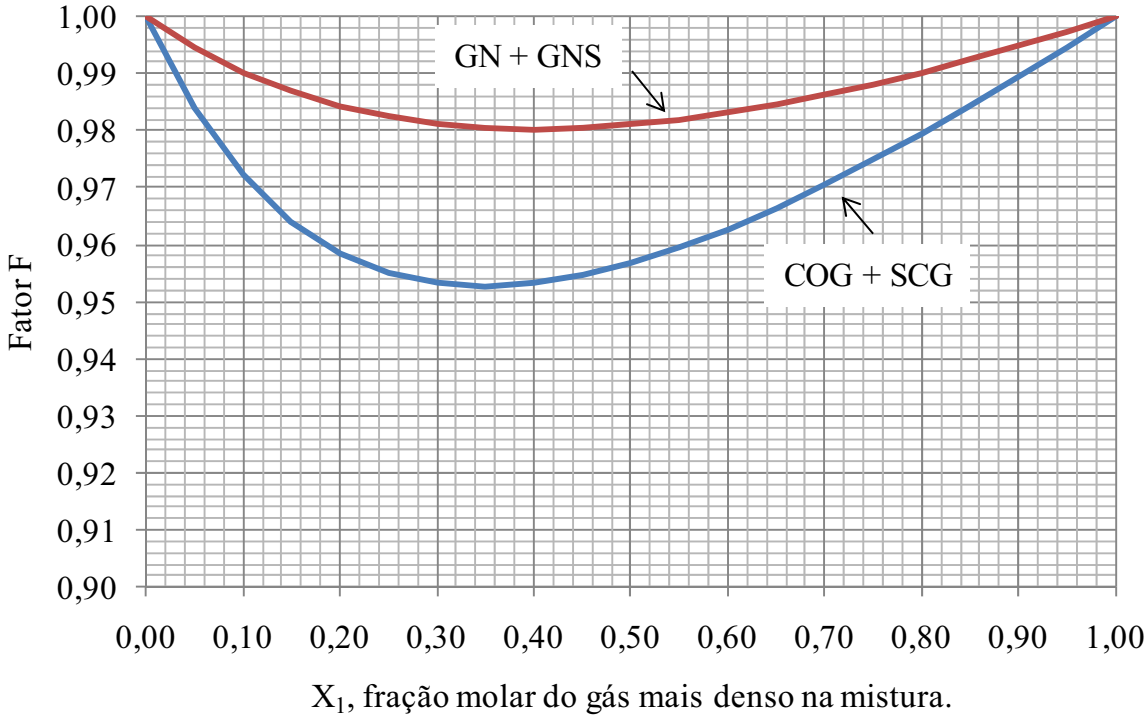


Figura 8 – Variação do fator F com a fração molar do gás mais denso na mistura.

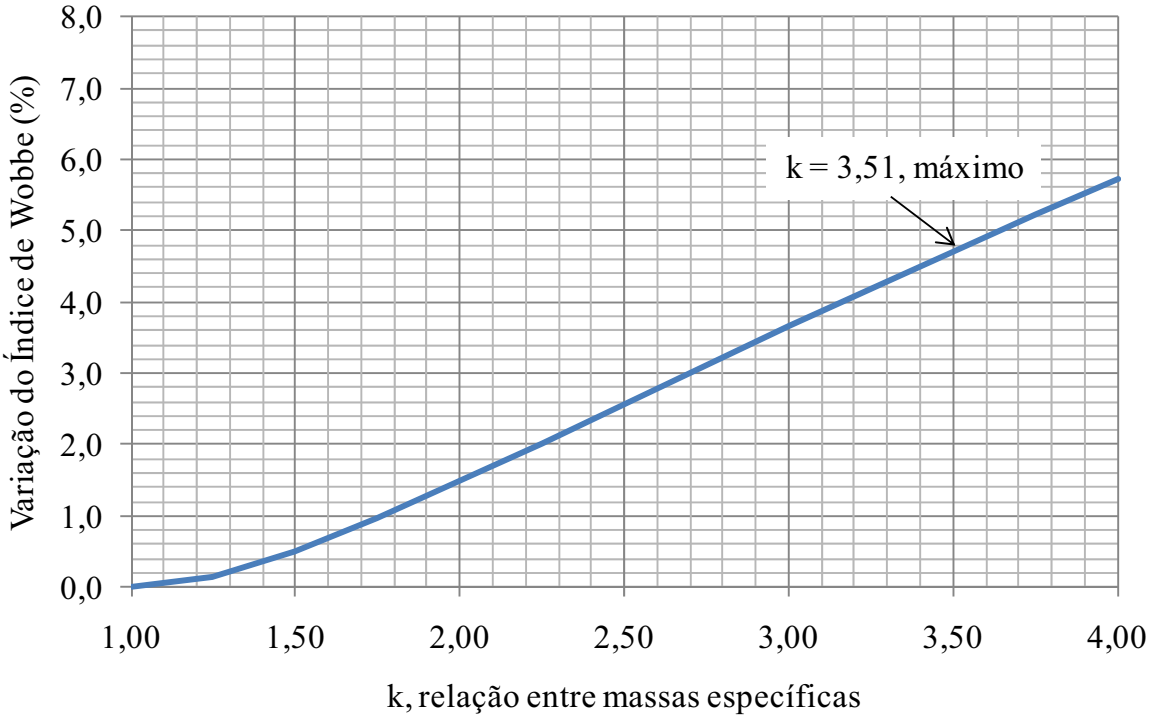


Figura 9 – Variação do Índice de Wobbe com a relação entre as massas específicas ao misturar dois combustíveis gasosos com mesmo Índice de Wobbe (k = 3,51: máximo para gases siderúrgicos com mesmo W).

3 APLICAÇÕES

Neste capítulo será avaliada a possibilidades de utilização dos gases descritos na Tabela 9 para reduzir o consumo ou substituir por completo o COG em processos siderúrgicos.

Para fazer esta avaliação serão considerados os dois índices descritos anteriormente: Índice de Wobbe e o Mútiplos Índices de Weaver. No caso deste último só será utilizado o J_L que se refere ao descolamento de chama, ou à tendência do gás substituto ancorar ou não no queimador do gás de referência. Este é o único índice de Weaver que inviabiliza a intercambiabilidade de gases.

Logo um gás só será considerado viável para substituir o gás de referência quando atingir as seguintes condições:.

1. Seu Índice de Wobbe poderá variar no máximo 5% (para mais ou para menos) em relação ao Índice de Wobbe de referência
2. Seu Índice de descolamento de chama JL deverá ser maior ou igual à 0,64.

3.1 SUBSTITUIÇÃO DE COG

Primeiramente será considerada a substituição em situações nas quais o COG é queimado puro. Como os gases da Tabela 9 possuem PCI e Índice de Wobbe menores que os do COG, é necessário que eles sejam misturados com um gás com PCI e Índice de Wobbe maiores que os do COG.

O GN possui PCI e Índice de Wobbe maiores que o COG e é um gás com alta disponibilidade para as indústrias. Portanto, este gás foi escolhido para ser a base das misturas substitutas.

Conforme explicado na introdução desta dissertação a AMT visa sempre o consumo mínimo de GN em seus processos, porém, sob o ponto de vista científico a análise com GN é necessária.

A Tabela 11 apresenta os parâmetros das misturas substitutas. A vazão requerida da mistura é calculada por:

$$\dot{V} = \frac{PCI_R}{PCI_S}\dot{V}_R, \tag{34}$$

na qual os subscritos R e S correspondem ao gás de referência (COG, no caso) e ao gás substituto, respectivamente.

Observa-se na Tabela 11 que todas as misturas substitutas possuem índices de descolamento de chama inferiores ao valor mínimo de 0,64, indicado por Weaver.

Tabela 11 – Misturas substitutas, com base no GN, para o COG.

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_S}{\dot{V}_R}$
COG*	4362	7349	0,4537	1	1
69% GN + 31% BFG	6651	7615	0,9824	0,315	0,656
58% GN + 42% LDG	6288	7035	1,0288	0,302	1,058
61% GN + 39% Gás 1	6149	7042	0,9817	0,296	1,082
60% GN + 40% Gás 2	6073	7056	0,9539	0,307	1,095
60% GN + 40% Gás 3	6031	7051	0,9418	0,325	1,103
57% GN + 43% Gás 4	5982	7077	0,9200	0,345	1,112
0% GN + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	0,343	2,367
0% GN + 100% Gás 6	2867	3562	0,8345	0,397	2,320
57% GN + 43% Gás 7	5937	7066	0,9091	0,342	1,120
59% GN + 41% Gás 8	6018	7082	0,9295	0,337	1,105

A Tabela 12 mostra as misturas entre o COG (base) e a mistura substituta de tal forma a obter um mínimo igual a 0,64 para o índice de descolamento. Sem considerar os custos do GN e do gás que compõem a mistura substituta, pode-se calcular a economia de COG com base na fórmula:

$$\text{Economia}\,(\%) = 100 - \%\text{COG}\,\frac{PCI_R}{PCI_S}(\%), \tag{35}$$

Tabela 12 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64.

Mistura	PCI (kcal/Nm3)	W (kcal/Nm3)	Economia de COG
50% COG + 50% (65% GN + 35% BFG)	5337	7248	59%
46% COG + 54% (64% GN + 36% LDG)	5633	7501	64%
47% COG + 53% (67% GN + 33% Gás 1)	5565	7534	63%
46% COG + 54% (66% GN + 34% Gás 2)	5546	7540	64%
45% COG + 55% (66% GN + 34% Gás 3)	5548	7543	65%
43% COG + 57% (63% GN + 37% Gás 4)	5548	7541	66%
31% COG + 69% (53% GN + 47% Gás 5)	5657	7573	76%
27% COG + 73% (51% GN + 49% Gás 6)	5658	7592	79%
43% COG + 57% (63% GN + 37% Gás 7)	5526	7537	66%
44% COG + 56% (64% GN + 36% Gás 8)	5512	7495	65%

A máxima relação entre as massas específicas (ρ) da mistura substituta e do COG é 2,266 (= 1,0288/0,454). Com os dados da Figura 9, verifica-se que a máxima variação do Índice de Wobbe será 2,1%.

3.2 SUBSTITUIÇÃO DO GÁS MISTO

Conforme explicado no capítulo anterior, é prática comum nas usinas siderúrgicas gerenciar o aproveitamento dos gases gerados a partir dos processos produtivos da coqueria, alto fornos e aciaria que estão disponíveis. Estes gases são melhor aproveitados quando misturados entre si em proporções específicas para atender a diversos processos. Neste item serão consideradas três situações de gás misto, para PCI´s de 2800, 2700 e 2600 kcal/Nm^3;

A base de dados resultante destas análises baseadas em gases siderúrgicos permite que a mesma análise seja realizada para qualquer tipo de gás.

3.2.1 Gás Misto com PCI = 2800 kcal/Nm^3

O gás misto com PCI de 2800 kcal/Nm^3 é composto de 56,1% COG e 43,9% BFG, com um Índice de Wobbe de 3437 kcal/Nm^3.

Primeiramente será analisada a substituição por um novo gás misto baseado no próprio COG. A Tabela 13 mostra as misturas substitutas com base no próprio COG misturado com LDG e com os gases alternativos da Tabela 9.

Tabela 13 – Misturas substitutas com base no próprio COG, para o gás misto de 2800 kcal/Nm^3.

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_S}{\dot{V}_I}$
56,1% COG + 43,9% BFG*	2800	3437	0,8546	1,000	1
47% COG + 53% Gás 1	2715	3291	0,8762	0,885	1,031
45% COG + 55% Gás 2	2659	3276	0,8479	0,902	1,053
46% COG + 54% Gás 3	2632	3289	0,8244	0,983	1,064
38% COG + 62% Gás 4	2658	3303	0,8336	0,970	1,054
0% COG + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	1,195	0,997
0% COG + 100% Gás 6	2867	3562	0,8345	1,384	0,977
38% COG + 61% Gás 7	2621	3300	0,8119	0,973	1,068
43% COG + 57% Gás 8	2631	3290	0,8233	0,982	1,064

*Base

A Tabela 14 mostra a economia de COG que pode ser conseguida com cada caso. Para este cálculo, utiliza-se a fórmula:

$$\text{Economia}\ (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\%\text{COG}_S}{\%\text{COG}_R} \frac{\text{PCI}_R}{\text{PCI}_S} \right) (\%), \qquad (36)$$

Tabela 14 – Economia de COG para as misturas estudadas (gás misto base com PCI = 2800 kcal/Nm^3).

Mistura	Economia de COG
47% COG + 53% Gás 1	13,6%
45% COG + 55% Gás 2	15,5%
46% COG + 54% Gás 3	12,8%
38% COG + 62% Gás 4	28,6%
0% COG + 100% Gás 5	100,0%
0% COG + 100% Gás 6	100,0%
38% COG + 61% Gás 7	25,7%
43% COG + 57% Gás 8	18,4%

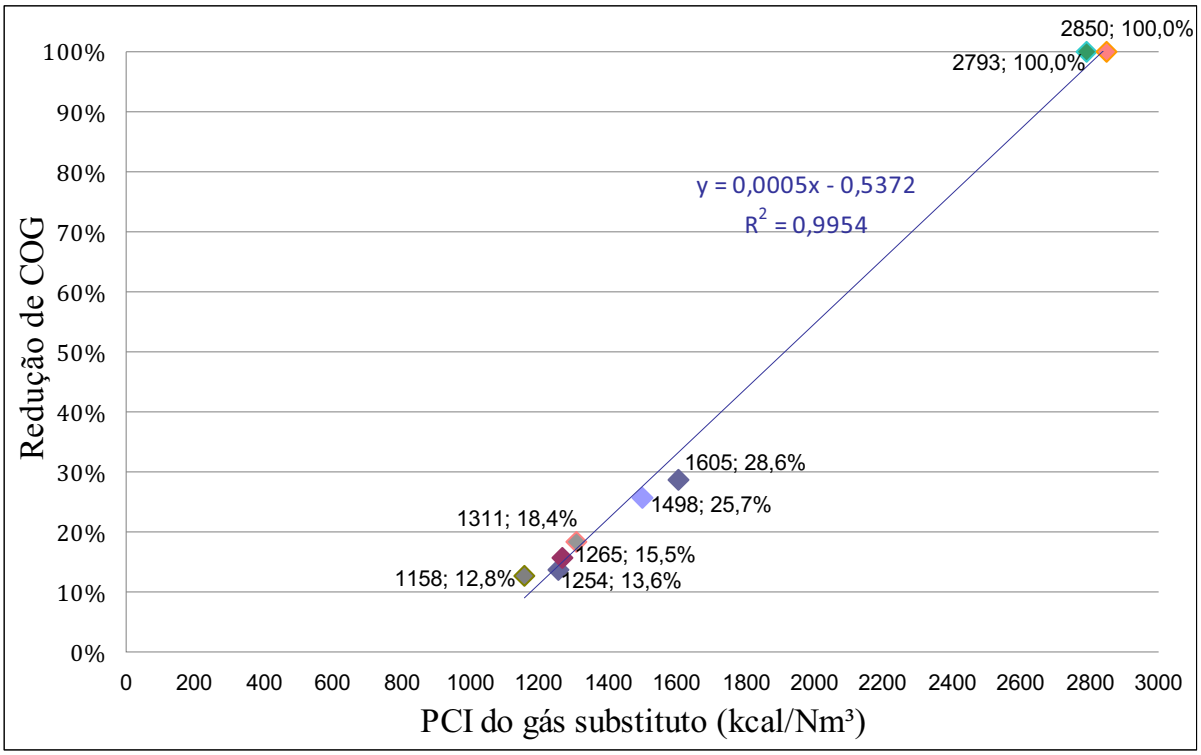


Figura 10 – Redução no consumo de COG (gás misto base com PCI = 2800 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 5% para W.

A Figura 10 mostra a relação entre o PCI do gás substituto e a economia com COG. Neste gráfico pode-se verificar uma excelente correlação linear, de 0,9954 entre os casos válidos.

Apesar de já ter sido apresentado anteriormente na Tabela 15 serão mostrados os PCI dos gases considerados na Tabela 14 e na Figura 10.

Tabela 15 – PCI dos gases utilizados na mistura com COG.

Gás	PCI
GÁS 1	1254
GÁS 2	1265
GÁS 3	1158
GÁS 4	1605
GÁS 5	2793
GÁS 6	2850
GÁS 7	1498
GÁS 8	1311

Em seguida, será analisada a substituição por um novo gás misto baseado no GN. A Tabela 16 mostra as misturas substitutas de GN com LDG e com os gases alternativos da Tabela 10.

Observa-se na Tabela 16 que apenas duas das misturas substitutas possuem índices de descolamento de chama superiores ao valor mínimo de 0,64, indicado por Weaver. Os dois casos em que o J_L ficou acima de 0,64 foi com gases 5 e 6 que possuem um poder calorífico maior que 2500 kcal/Nm³ porque são provenientes de processos de gaseificação com oxigênio puro (percentual de N_2 muito baixo). Considerando que o *syngas* deste estudo provavelmente será proveniente de gaseificação com ar pode-se afirmar que a utilização de uma mistura apenas de *syngas* com GN para substituir o gás misto COG+BFG não é viável para uma usina siderúrgica.

Tabela 16 – Misturas substitutas com base no GN, para o gás misto de 2800 kcal/Nm3.

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_r}$
56,1% COG + 43,9% BFG*	2800	3437	0,8546	1	1
31% GN + 69% BFG	3431	3562	1,1942	0,376	0,816
26% GN + 74% Gás 1	3341	3556	1,1361	0,431	1,027
25% GN + 75% Gás 2	3269	3568	1,0803	0,472	1,050
25% GN + 75% Gás 3	3188	3518	1,0575	0,540	1,076
20% GN + 80% Gás 4	3146	3543	1,0151	0,616	1,091
0% GN + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	1,195	1,221
0% GN + 100% Gás 6	2867	3562	0,8345	1,384	1,197
21% GN + 79% Gás 7	3140	3576	0,9924	0,613	1,093
23% GN + 77% Gás 8	3154	3518	1,0348	0,583	1,088

*Base

Para viabilizar a utilização destas misturas será necessário utilizá-las junto à mistura COG+BFG e não mais como substituta. A Tabela 17 mostra as misturas entre o gás misto base e a mistura substituta de tal forma a obter um J_L mínimo aproximado de 0,64 para o índice de descolamento. Sem considerar os custos do GN e do gás que compõem a mistura substituta, a economia de COG é calculada com base na equação (36).

Tabela 17 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64, para substituir gás misto com PCI = 2800 kcal/Nm^3.

Mistura	PCI (kcal/Nm3)	W (kcal/Nm3)	Economia de COG
43% (56,1%COG+43,9%BFG) + 57% (31% GN + 69% BFG)	3160	3508	62%
37% (56,1%COG+43,9%BFG) + 63% (26% GN + 74% Gás 1)	3141	3512	67%
32% (56,1%COG+43,9%BFG) + 68% (25% GN + 75% Gás 2)	3119	3526	71%
22% (56,1%COG+43,9%BFG) + 78% (25% GN + 75% Gás 3)	3103	3500	80%
7% (56,1%COG+43,9%BFG) + 93% (20% GN + 80% Gás 4)	3122	3536	94%
100% (0% GN + 100% Gás 5)*	2810	3365	100%
100% (0% GN + 100% Gás 6)*	2867	3562	100%
7% (56,1%COG+43,9%BFG) + 93% (21% GN + 79% Gás 7)	3116	3566	94%
14% (56,1%COG+43,9%BFG) + 86% (23% GN + 77% Gás 8)	3105	3507	87%

*Índice de Descolamento de Weaver é adequado.

3.2.2 Gás Misto com PCI = 2700 kcal/Nm^3

Agora são analisadas misturas semelhantes a um gás misto de 2700 kcal/Nm^3. O gás misto base neste caso é composto de 53,3% COG e 46,7% BFG, com um Índice de Wobbe de 3266 kcal/Nm^3. A Tabela 18 mostra misturas substitutas compostas pelo próprio COG mais um gás alternativo, mantendo o Índice de Wobbe. A Tabela 19 mostra a economia correspondente de COG para cada uma das misturas. Pode ser observado uma economia de 100% na mistura com o Gás 5. Já o Gás 6 não pode compor com COG porque o Índice de Wobbe resultante é superior ao desejado.

Tabela 18 – Misturas substitutas com base no próprio COG, para o gás misto de 2700 kcal/Nm^3.

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_r}$
53,3% COG + 46,7% BFG*	2700	3266	0,8802	1	1
44% COG + 56% Gás 1	2622	3136	0,9001	0,885	1,030
42% COG + 58% Gás 2	2566	3123	0,8694	0,904	1,052
46% COG + 57% Gás 3	2536	3130	0,8450	0,991	1,065
34% COG + 66% Gás 4	2548	3121	0,8581	0,961	1,060
0% COG + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	1,312	0,961
0% COG + 100% Gás 6**	2867	3562	0,8345	1,520	0,942
35% COG + 65% Gás 7	2507	3112	0,8354	0,962	1,077
45% COG + 60% Gás 8	2540	3139	0,8427	0,995	1,063

*Base

**Gas 6 não pode compor com COG porque o W está fora da faixa estabelecida de +/- 5% do W da mistura base.

Tabela 19 – Economia de COG para as misturas estudadas (gás misto base com PCI = 2700 kcal/Nm^3).

Mistura	Economia de COG
44% COG + 56% Gás 1	15%
42% COG + 58% Gás 2	17%
46% COG + 57% Gás 3	14%
34% COG + 66% Gás 4	32%
0% COG + 100% Gás 5	100%
0% COG + 100% Gás 6*	0%
35% COG + 65% Gás 7	29%
45% COG + 60% Gás 8	20%

*A economia gerada pelo gás 6 foi considerada 0% porque este gás não pode compor com COG

Observa-se na Tabela 19 que os gases de maior PCI (ver Tabela 15) produzirão uma maior economia de COG quando misturados ao COG para a substituição da mistura COG + BFG. Há uma excelente correlação linear, de 0,9965, entre esses dados, conforme mostrado na Figura 11.

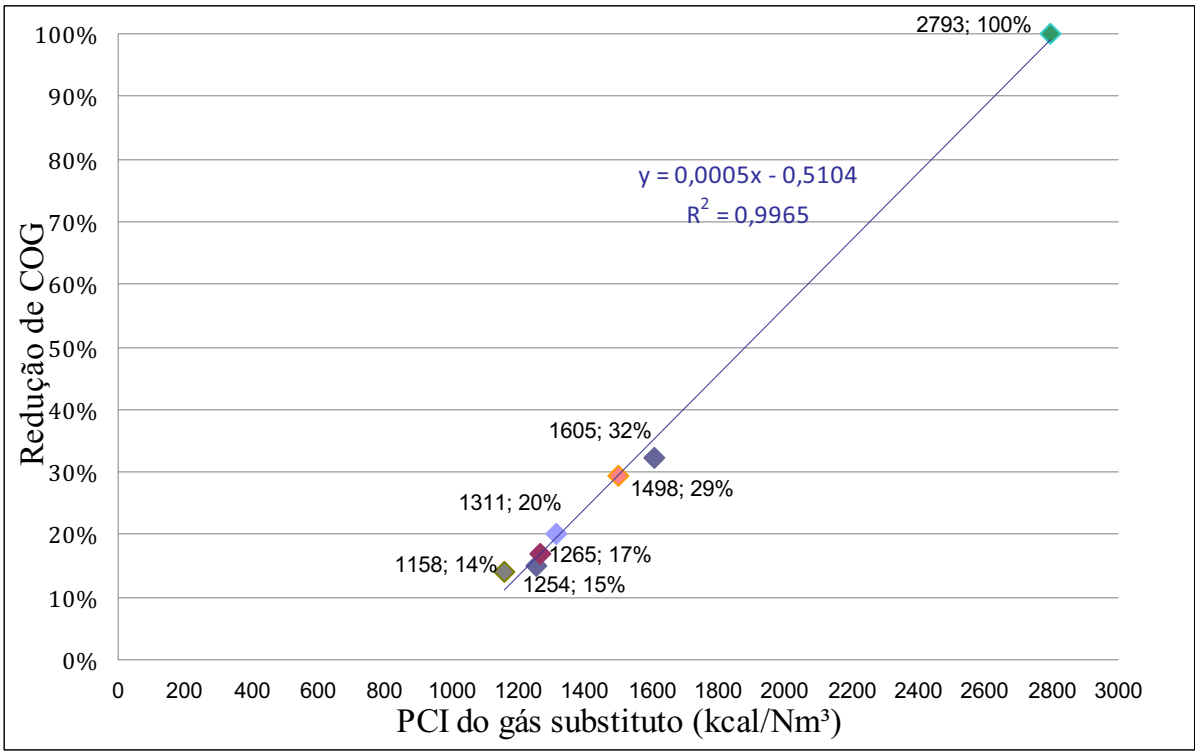


Figura 11 . – Redução no consumo de COG (gás misto base com PCI = 2700 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 5% para W

Tabela 20 – Misturas substitutas com base no GN, para o gás misto de 2700 kcal/Nm^3.

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_I}$
53,7% COG + 46,7% BFG*	2700	3266	0,8802	1	1
29% GN + 71% BFG	3261	3371	1,2053	0,380	0,828
24% GN + 76% Gás 1	3180	3372	1,1450	0,442	1,026
23% GN + 77% Gás 2	3108	3382	1,0875	0,485	1,049
24% GN + 76% Gás 3	3107	3423	1,0608	0,575	1,050
18% GN + 82% Gás 4	2993	3362	1,0202	0,641	1,090
0% GN + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	1,312	1,161
0% GN + 100% Gás 6**	2867	3562	0,8345	1,520	1,137
19,3% GN + 80,7% Gás 7	3007	3419	0,9963	0,643	1,084
22% GN + 78% Gás 8	3075	3425	1,0377	0,622	1,061

*Base
**Gas 6 não pode compor com GN porque o W está fora da faixa estabelecida de +/- 5% do W da mistura base

A Tabela 20 apresenta as misturas geradas com GN para substituir o gás misto de COG+BFG. Nesta caso, com PCI base de 2700kcal/Nm³, foi possível obter três

misturas com J_L superior à 0,64. O J_L ficou acima de 0,64 em três casos: gases 4, 5 e 7. Porém, a quantididade de misturas com o índice inferior à 0,64 ainda é significativa.

Para aumentar a faixa de *syngases* que poderão eventualmente substituir a mistura base faremos novamente uma mistura entre o gás misto base e o gás misto com GN. A Tabela 21 apresenta esta mistura de tal forma que o J_L mínimo seja de aproximadamente 0,64. As respectivas economias de COG também são apresentadas nesta tabela.

Tabela 21 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64, para substituir gás misto com PCI = 2700 kcal/Nm^3.

Mistura	PCI (kcal/Nm3)	W (kcal/Nm3)	Economia de COG
49% (53,3%COG+46,7%BFG) + 51% (29% GN + 71% BFG)	2986	3319	54%
43% (53,3%COG+46,7%BFG) + 57% (24% GN + 76% Gás 1)	2974	3327	60%
37% (53,3%COG+46,7%BFG) + 63% (23% GN + 77% Gás 2)	2957	3339	65%
19,5% (53,3%COG+46,7%BFG) + 80,5% (24% GN + 76% Gás 3)	3028	3393	82%
0% (53,3%COG+46,7%BFG) + 100% (18% GN + 82% Gás 4)	2993	3362	100%
0% (53,3%COG+46,7%BFG) + 100% (0% GN + 100% Gás 5)	2810	3365	100%
0% (53,3%COG+46,7%BFG) + 100% (0% GN + 100% Gás 6)	2867	3562	100%
0% (53,3%COG+46,7%BFG) + 100% (19,3% GN + 80,7% Gás 7)	3007	3419	100%
6% (53,3%COG+46,7%BFG) + 94% (22% GN + 78% Gás 8)	3052	3415	87%

**Gas 6 não pode compor com GN porque o W está fora da faixa estabelecida de +/- 5% do W da mistura base

3.2.3 Gás Misto com PCI = 2600 kcal/Nm^3

As Tabelas 22 a 25 repetem os procedimentos anteriores, agora para um gás misto com PCI de 2600 kcal/Nm^3 (50,58% COG e 49,52% BFG). O Índice de Wobbe

correspondente é 3100 kcal/Nm^3 e também será permitida variação de +/- 5%. Toda argumentação referente a estas tabelas é similar à dos itens anteriores.

Tabela 22 – Misturas substitutas com base no próprio COG, para o gás misto de 2600 kcal/Nm^3.

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_S}{\dot{V}_R}$
50,48% COG + 49,52% BFG*	2600	3100	0,9060	1	1
41% COG + 59% Gás 1	2529	2985	0,9240	0,887	1,028
39% COG + 61% Gás 2	2473	2973	0,8910	0,908	1,051
40% COG + 60% Gás 3	2440	2976	0,8656	1,000	1,066
31% COG + 69% Gás 4	2465	2988	0,8765	0,978	1,055
0% COG + 100% Gás 5**	2810	3365	0,8973	1,446	0,925
0% COG + 100% Gás 6**	2867	3562	0,8345	1,675	0,907
32% COG + 68% Gás 7	2421	2974	0,8530	0,977	1,074
37% COG + 63% Gás 8	2449	2992	0,8622	1,010	1,062

*Base

**Gases 5 e 6 não podem compor com COG porque o W está fora da faixa estabelecida de +/- 5% do W da mistura base.

Tabela 23 – Economia de COG para as misturas estudadas (gás misto base com PCI = 2600 kcal/Nm^3).

Mistura	Economia de COG
41% COG + 59% Gás 1	21%
39% COG + 61% Gás 2	23%
40% COG + 60% Gás 3	20%
31% COG + 69% Gás 4	39%
0% COG + 100% Gás 5*	0%
0% COG + 100% Gás 6*	0%
32% COG + 68% Gás 7	36%
37% COG + 63% Gás 8	26%

*A economia gerada pelos gases5 e 6 foi considerada 0% porque estes gases não podem compor com COG

Observa-se na Tabela 23 que os gases de maior PCI (ver Tabela 15) produzirão uma maior economia de COG quando misturados ao COG para a substituição da mistura COG + BFG. Há uma boa correlação linear, de 0,9714, entre esses dados, conforme mostrado na Figura 12.

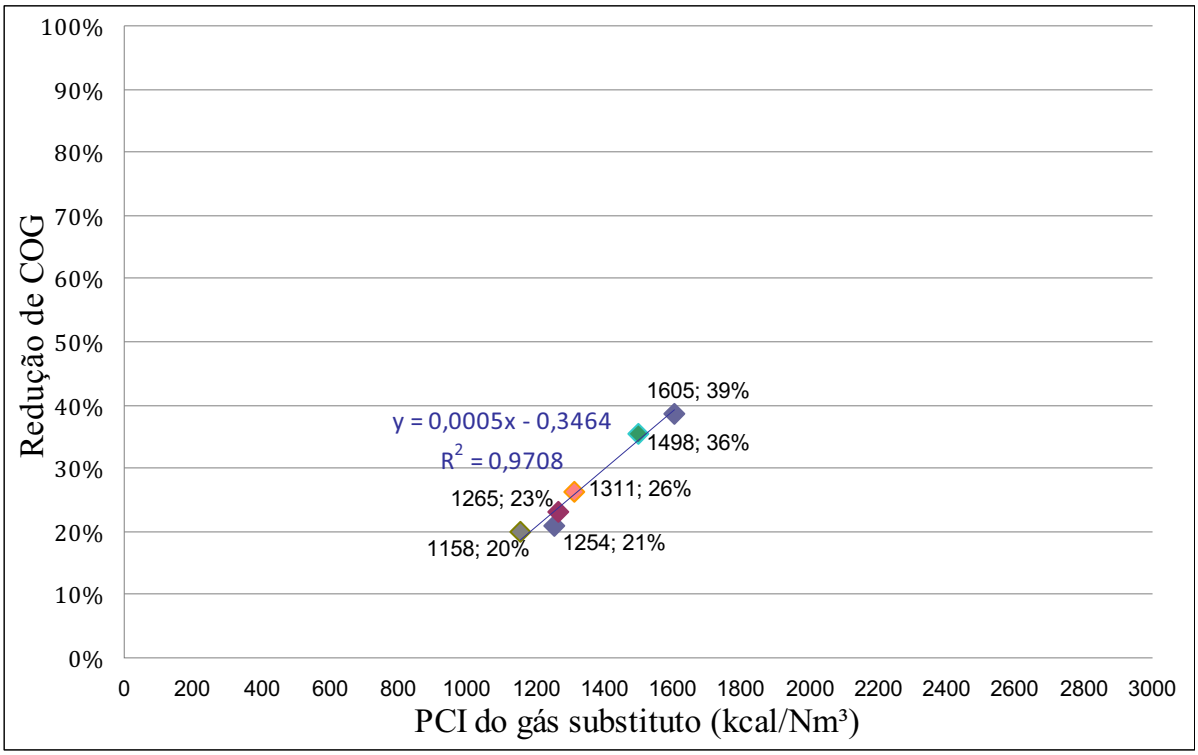


Figura 12 – Redução no consumo de COG (gás misto base com PCI = 2600 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 5% para W

O gráfico da Figura 12 não contempla os gases 5 e 6 porque a utilização destes gases neste caso é inviável, o índice de Wobbe ficou fora da faixa. As escalas deste gráfico foram mantidas iguais às dos gráficos das figuras 10 e 11 para facilitar a comparação entre os mesmos.

Tabela 24 – Misturas substitutas com base no GN, para o gás misto de 2600 kcal/Nm^3.

Gás	PCI (kcal/Nm3)	W (kcal/Nm3)	ρ (kg/Nm3)	JL	Vs/Vr
56,1% COG + 43,9% BFG*	2600	3100	0,9060	1	1
27% GN + 73% BFG	3092	3181	1,2165	0,384	0,841
22% GN + 78% Gás 1	3020	3190	1,1538	0,453	1,024
21% GN + 79% Gás 2	2948	3197	1,0947	0,499	1,049
22% GN + 78% Gás 3	2945	3234	1,0674	0,596	1,050
16% GN + 84% Gás 4	2839	3182	1,0253	0,668	1,089
0% GN + 100% Gás 5**	2810	3365	0,8973	1,446	1,100
0% GN + 100% Gás 6**	2867	3562	0,8345	1,675	1,078
17% GN + 83% Gás 7	2829	3207	1,0016	0,663	1,093
20% GN + 80% Gás 8	2915	3238	1,0436	0,648	1,060

*Base

**Gases 5 e 6 não podem compor com GN porque o W está fora da faixa estabelecida de +/- 5% do W da mistura base.

Tabela 25 – Misturas com índice de descolamento de chama mínimo de 0,64, para substituir gás misto com PCI = 2600 kcal/Nm^3.

Mistura	PCI (kcal/Nm3)	W (kcal/Nm3)	Economia de COG
58% (50,48% COG + 49,52% BFG) + 42% (27% GN + 73% BFG)	2807	3319	42%
50,4% (50,48% COG + 49,52% BFG) + 49,6% (22% GN + 78% Gás 1)	2808	3327	50%
43,4% (50,48% COG + 49,52% BFG) + 56,6% (21% GN + 79% Gás 2)	2797	3339	58%
19,5% (50,48% COG + 49,52% BFG) + 80,5% (22% GN + 78% Gás 3)	2878	3393	81%
100% (16% GN + 84% Gás 4)	2839	3362	100%
100% (0% GN + 100% Gás 5)	2810	3365	0%
100% (0% GN + 100% Gás 6)	2867	3562	0%
100% (17% GN + 83% Gás 7)	2829	3419	100%
100%(20% GN + 80% Gás 8)	2915	3415	100%

**Gases 5 e 6 não podem compor com GN porque o W está fora da faixa estabelecida de +/- 5% do W da mistura base.

3.3 SUBSTITUIÇÃO DO GÁS MISTO DO LTQ DA AMT

Neste item será analisada a possibilidade de utilizar os gases da Tabela 9 misturados com COG para substituir os gases que hoje alimentam os dois fornos de reaquecimento de placa do LTQ da ArcelorMittal Tubarão. Conforme informado no item 2.6 desta dissertação, os fornos do LTQ são alimentados por dois tipos de gás misto: o principal é o LDG+COG e o outro é o BFG+COG.

Para que a mistura dos gases da Tabela 9 com COG possa substituir um dos gases do LTQ é necessário que dois parâmetros sejam atendidos simultaneamente. São estes parâmetros:

1. Índice de Wobbe de 3060 kcal/Nm³ com variação máxima de 10% (para mais ou para menos), ou seja, o valor de W deve estar entre2754 e 3366 kcal/Nm³
2. Índice de deslocamento de chama JL for maior ou igual à 0,64.

Na Tabela 26 verificamos que apenas o Gás 6 não é adequado para substituir o gás misto LDG+COG utilizado nos fornos do LTQ.

Tabela 26 – Misturas substitutas para o gás misto LDG+GOG do LTQ

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{V_s}{V_t}$
26% COG + 74% LDG	2799	3060	1,0767	1,000	1,000
41% COG + 59% Gás 1	2529	2985	0,9240	1,099	1,107
39% COG + 61% Gás 2	2473	2973	0,8910	1,124	1,132
40% COG + 60% Gás 3	2440	2976	0,8656	1,239	1,147
31% COG + 69% Gás 4	2465	2988	0,8765	1,212	1,135
0% COG + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	1,792	0,996
0% COG + 100% Gás 6	2867	3562	0,8345	2,076	0,976
32% COG + 68% Gás 7	2421	2974	0,8530	1,211	1,156
37% COG + 63% Gás 8	2449	2992	0,8622	1,251	1,143

Na Tabela 27 observa-se claramente que a utilização das misturas para substituir a mistura LDG+COG dos fornos do LTQ não é viável. Com exceção ao Gás 5 que poderia substituir sozinho a mistura LDG+COG os demais gases irão requerer uma quantidade de COG maior se comparado à mistura LDG+COG.

Tabela 27 – Economia de COG com a utilização das misturas em relação ao LDG

Mistura	Economia de COG
41% COG + 59% Gás 1	-56%
39% COG + 61% Gás 2	-52%
40% COG + 60% Gás 3	-58%
31% COG + 69% Gás 4	-21%
0% COG + 100% Gás 5	100%
0% COG + 100% Gás 6*	0%
32% COG + 68% Gás 7	-27%
37% COG + 63% Gás 8	-46%

*A economia gerada pelo gás 6 foi considerada 0% porque este gás não pode compor com COG

Na Tabela 28 verificamos que apenas o Gás 6 não é adequado para substituir o gás misto BFG+COG utilizado nos fornos do LTQ.

Tabela 28 – Misturas substitutas para o gás misto BFG+GOG do LTQ

Gás	PCI (kcal/Nm^3)	W (kcal/Nm^3)	ρ (kg/Nm^3)	J_L	$\frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_r}$
49,8% COG + 50,2% BFG	2576	3060	0,9122	1	1
37% COG + 63% Gás 1	2404	2790	0,9559	0,795	1,071
35% COG + 65% Gás 2	2349	2780	0,9196	0,816	1,096
36% COG + 64% Gás 3	2312	2776	0,8930	0,906	1,114
26% COG + 74% Gás 4	2328	2773	0,9071	0,872	1,107
0% COG + 100% Gás 5	2810	3365	0,8973	1,481	0,917
0% COG + 100% Gás 6	2867	3562	0,8345	1,716	0,898
28% COG + 72% Gás 7	2307	2796	0,8765	0,893	1,117
32% COG + 68% Gás 8	2297	2755	0,8946	0,896	1,122

Na Tabela 29 verifica-se que todas as mistura, com exceção do Gás 6, irão gerar economia de COG. Estes dados também permitem verificar que há uma excelente correlação linear, de 0,9977, entre o PCI do gás substituto e a economia de COG gerada por ele. A Figura 13 mostra esta correlação.

Tabela 29 – Economia de COG com a utilização das misturas em relação ao BFG

Mistura	Economia de COG
37% COG + 63% Gás 1	12%
35% COG + 65% Gás 2	14%
36% COG + 64% Gás 3	11%
26% COG + 74% Gás 4	31%
0% COG + 100% Gás 5	100%
0% COG + 100% Gás 6	0%
28% COG + 72% Gás 7	28%
32% COG + 68% Gás 8	17%

*A economia gerada pelo gás 6 foi considerada 0% porque este gás não pode compor com COG

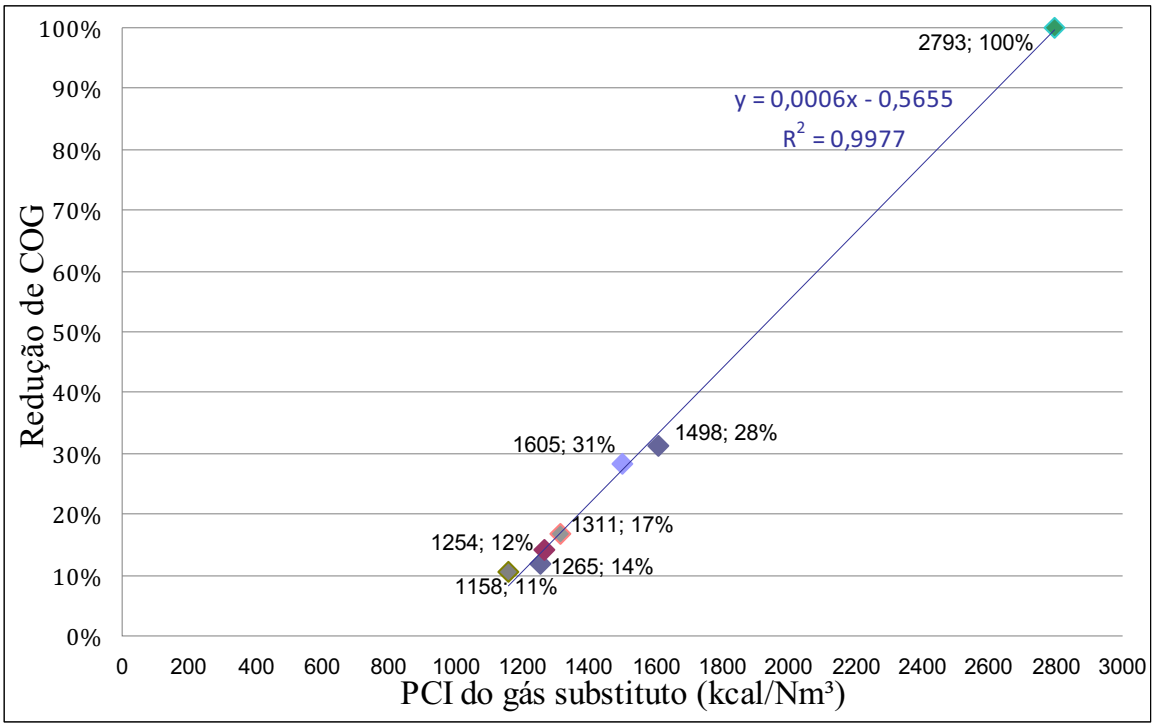


Figura 13 – Redução no consumo de COG (gás misto base COG+BFG com W=3060 kcal/Nm^3) como função do poder calorífico do gás substituto; misturas com variação máxima de 10% para W

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Deve ser ressaltado que o principal objetivo deste trabalho é verificar o potencial de redução no consumo de COG em uma usina siderúrgica integrada, como a ArcelorMittal Tubarão, através da utilização de gases provenientes de processos de gaseificação (*syngas*). Portanto, todas as análises deste trabalho foram realizadas buscando substituir o COG por *syngas* ou por uma mistura com *syngas*.

As simulações de misturas foram feitas com a planilha de Excel que calcula todos os parâmetros necessários para avaliação da viabilidade de intercambiabilidade. Os dados dos gases analisados foram baseados nas características dos gases siderúrgicos da ArcelorMittal Tubarão e dos *syngases* da Tabela 9. Os parâmetros adotados para validar a intercambiabilidade entre gases foi o Índice de Wobbe e o Índice de descolamento de chama de Weaver.

O item 2.6 mostra a importância da mistura e da intercambiabilidade de gases para as indústrias siderúrgicas. Neste item apresenta-se uma situação rara, senão inédita, de misturar duas misturas de gases siderúrgicos com mesmo W para otimizar a utilização dos gases sem comprometer a estabilidade e confiabilidade do fornecimento de gás para os consumidores.

Em função desta mistura de misturas fez-se necessário avaliar a variação do W resultante. No item 2.7 mostrou-se que o W resultante para uma mistura de duas misturas com o mesmo W pode ser diferente se as massas específicas das misturas em questão forem diferentes. No entanto, verificou-se que a diferença máxima é menor que 4,8%, ficando dentro da faixa recomendada por Wobbe. Portanto, pode-se concluir que a mistura de duas misturas com o mesmo W pode ser utilizada para substituir uma das misturas originais.

A análise dos conceitos apresentados no capítulo 2 e dos resultados das simulações de mistura mostradas nas tabelas do capítulo 3 gera uma série de conclusões.

A primeira simulação, realizada visando substituir o COG puro por uma mistura de GN com *syngas* ou BFG ou LDG, mostrou-se inviável. Na Tabela 11 todos os J_L estão muito abaixo do valor de 0,64 recomendado por Weaver; logo, em todos os casos poderia haver descolamento de chama gerando riscos elevados de segurança. Pode-se concluir que a utilização de misturas de GN para substituição completa do COG em processos que o utilizam como único combustível é inviável.

Diante dos resultados da Tabela 11 decidiu-se simular a mistura COG + (GN+Gás substituto), de maneira a garantir que o índice de descolamento de chama fosse de no mínimo 0,64. A mistura mostrada na Tabela 12 tornou a substituição do COG viável e proporcionou economia deste gás. Conclui-se com isso que a utilização de *syngas* com PCI baixo é viável.

Foram realizadas outras simulações utilizando os *syngases* da Tabela 9 e os gases siderúrgicos e também utilizando mistura com GN. Estas simulações foram realizadas visando a substituição do gás misto COG+BFG que é o mais comum na siderurgia, porém os mesmos critérios e planilhas podem ser utilizados para avaliar a substituição de outro gás misto, o que foi realizado no item 3.3 onde simulou-se a substituição do gás misto COG+LDG.

No item 3.2 simulou-se a substituição do gás misto de referência COG+BFG por misturas de COG+*syngas*, de GN+*syngas* ou gás siderúrgico e de (COG+BFG)+(GN+*syngas* ou gás siderúrgico). A simulação foi feita para três tipos gás misto, cada um com um PCI específico. Os valores dos PCI`s utilizados foram escolhidos baseados na experiência com processos siderúrgicos que utilizam gás misto.

Verificou-se que quando se substitui o gás de referência por COG+*syngas* quanto menor o PCI do gás misto de referência, maior será a economia de COG. Também verificou-se que para os gases com PCI menor que 2000 kcal/Nm³ a vazão requerida de gás misto aumenta em todos os casos e, mais uma vez, quanto menor o PCI do gás de referência menor o aumento na vazão requerida. Contudo, todos os aumentos de

vazão foram inferiores a 7%, valor baixo se considerados os valores de economia de COG.

Outra constatação importante na substituição por COG+*syngas* é a correlação entre o PCI dos gases substitutos (*syngas*) e o percentual de economia de COG. Verificou-se que quanto maior o PCI do gás substituto maior a economia de COG.

A substituição do gás de referência por misturas com GN apresentou resultados melhores se comparado ao caso da substituição de COG. Neste caso quanto maior o PCI menor a quantidade de misturas intercambiáveis.

No caso do PCI de 2800 kcal/Nm³ os gases 5 e 6 da Tabela 9 podem substituir completamente o gás misto de referência. No entanto, é necessário um aumento de vazão de 18 e 16% respectivamente; além disso, estes gases são gás de síntese, ou seja, para siderurgia este tipo de gás dificilmente será viável economicamente.

No caso do PCI de 2700 kcal/Nm³ os gases 4, 5 e 7 são intercambiáveis. O gás 5 também neste caso substitui por completo o gás de referência e requer um aumento de vazão de 14%, porém existe o inconveniente de se tratar de um gás com produção cara. Já a mistura com os gases 4 e 7 é intercambiável. É interessante ressaltar que ambos os gases possuem o W maior que 1500 kcal/Nm³ e menor que 2000 kcal/Nm³. Para a mistura com estes dois gases o aumento de vazão requerido foi de apenas 8%.

Para o PCI de 2600 kcal/Nm³ também existem três misturas intercambiáveis (gases 4,7 e 8). Neste caso todas são com gases provenientes de gaseificação com ar e o aumento de vazão requerido ficou entre 8 e 9%. Neste caso também é importante ressaltar que os três gases substitutos possuem W superior a 1400 kcal/Nm³ e menor que 2000 kcal/Nm³

Como a quantidade de misturas de GN intercambiáveis com o gás misto de referência foram poucas, foi simulada uma mistura de (COG+BFG)+(GN+*syngas* ou gás siderúrgico) para cada PCI, de forma a garantir que o W fique na faixa de +/- 5% e o J_L fique igual a 0,64. Neste caso apenas a mistura contendo o gás 6 não foi intercambiável para os PCI`s de 2700 e 2600 kcal/Nm³. Verifica-se que esta

substituição é a que proporciona maior economia de COG. Contudo, considerando o custo do GN a mistura de COG com *syngas* ou com gases siderúrgicos é a mais atrativa.

No item 3.3 avaliou-se a intercambiabilidade entre as misturas com *syngas* e os dois tipos de gás misto utilizados nos fornos de reaquecimento do LTQ da AMT. Verificou-se que no caso do gás misto principal LDG+COG a intercambiabilidade é viável para sete dos oito gases considerados. Apenas o Gás 6 não é intercambiável. Contudo, a substituição do gás misto LDG+COG por estas misturas de *syngas* aumentam o consumo de COG, com exceção do gás cinco que pode substituir por completo o COG, mas é um gás oriundo de um processo de gaseificação mais caro.

No caso do gás misto BFG+COG utilizado no LTQ verificou-se também que a intercambiabilidade é viável para sete dos oito gases considerados e apenas o Gás 6 não é intercambiável. Já neste caso ocorre uma economia de COG para todas as misturas viáveis. Como mostrado na Figura 13, também é possível fazer uma boa correlação entre o PCI do gás substituto com a redução no consumo de COG, verificando que quanto maior o PCI do gás substituto maior a redução no consumo de COG.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostram claramente que a redução no consumo de COG é viável quando existe disponibilidade de gases provenientes de processos de gaseificação. Também mostrou que misturas com o *syngas* podem substituir outros gases muito utilizados em processo siderúrgicos como é o caso do gás misto BFG+COG.

Foi possível concluir que a intercambiabilidade aumenta significativamente quando substitui-se uma mistura de COG com gás siderúrgico por uma mistura de *syngas* com COG ou GN.

A simulação realizada para os gases mistos do LTQ mostrou que não basta que um gás seja intercambiável para que a substituição seja viável. Deve-se considerar o aspecto econômico, pois no caso do gás misto LDG+COG a substituição aumentou o consumo de COG ao invés de diminuí-lo.

Os dados gerados por este trabalho permitem que seja desenvolvida uma sistemática para avaliação de intercambiabilidade de gases na ArcelorMittal Tubarão. Com isso será possível avaliar a intercambiabilidade entre os gases da AMT e qualquer tipo de gás disponível. Logo, caso a ArcelorMittal decida avaliar a possibilidade de instalar um gaseificador utilizando como matéria prima algum de seus subprodutos o destino do gás gerado por este processo de gaseificação poderá ser determinado utilizando-se a sistemática desenvolvida neste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L.A., **Manual de Siderurgia – Volume 1 – Produção.** 1.ed. São Paulo: Arte&Ciência, 1997. 470p.

BRIDGEWATER, A.V., **Review of Thermochemical Biomass Conversion**. ESTU B1202, Crown, 1991.

CORONADO, C.J.R., **Análise técnico-econômica de um gaseificador de biomassa de 100 kg/h para acionamento de um motor de combustão interna**. 2007. 195 f Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão E Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.33, n.1, p.1–18, feb. 2007.

FERREIRA, M.A., **Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke**. 1997. 227 f Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Transmissão E Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1997

GARCIA, R., **Combustíveis e Combustão Industrial.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 202p.

HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. **Gasification**. 2. ed. Burlington, MA: Gulf Professional Publishing, 2007. 435p.

LEE, C-H; HWANG, C-H; HONG, S-C. Proposal and validation of a new type of flame stability diagram for partially premixed flames. **Fuel**, v.87, n.17-18, p. 3687-3693, dec 2008.

LEE, C-H; HWANG, C-H; LEE, H-Y. A study on the interchangeability of LFG–LPG mixed fuels with LFG quality in domestic combustion appliances. **Fuel**, v.87, n.3, p.297-303, mar. 2008.

LEE, C-H; HWANG, C-H. An experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels. **Fuel**, v.86, n.5-6, p.649-655, apr. 2007.

LOUBAR, K.; RAHMOUNI, C.; LE CORRE, O.; TAZEROUT, M. A combustionless determination method for combustion properties of natural gases. **Fuel**, v.86, n.16, p.2535-2544, nov. 2007.

MARCHIONNA, M.; PATRINI, R.; SANFILLIPO, D.; MIGLIAVACCA, G. Fundamental investigations on di-methyl ether (DME) as LPG substitute or make-up for domestic uses. **Fuel Processing Technology**, v.89, n.12, p.1255-1261, dec.2008.

MALENSHEK, M.; OLSEN, D.B. Methane Number Testing of Alternative Gaseous Fuels. **Fuel**, v.88, n.4, p.650-656, apr. 2009.

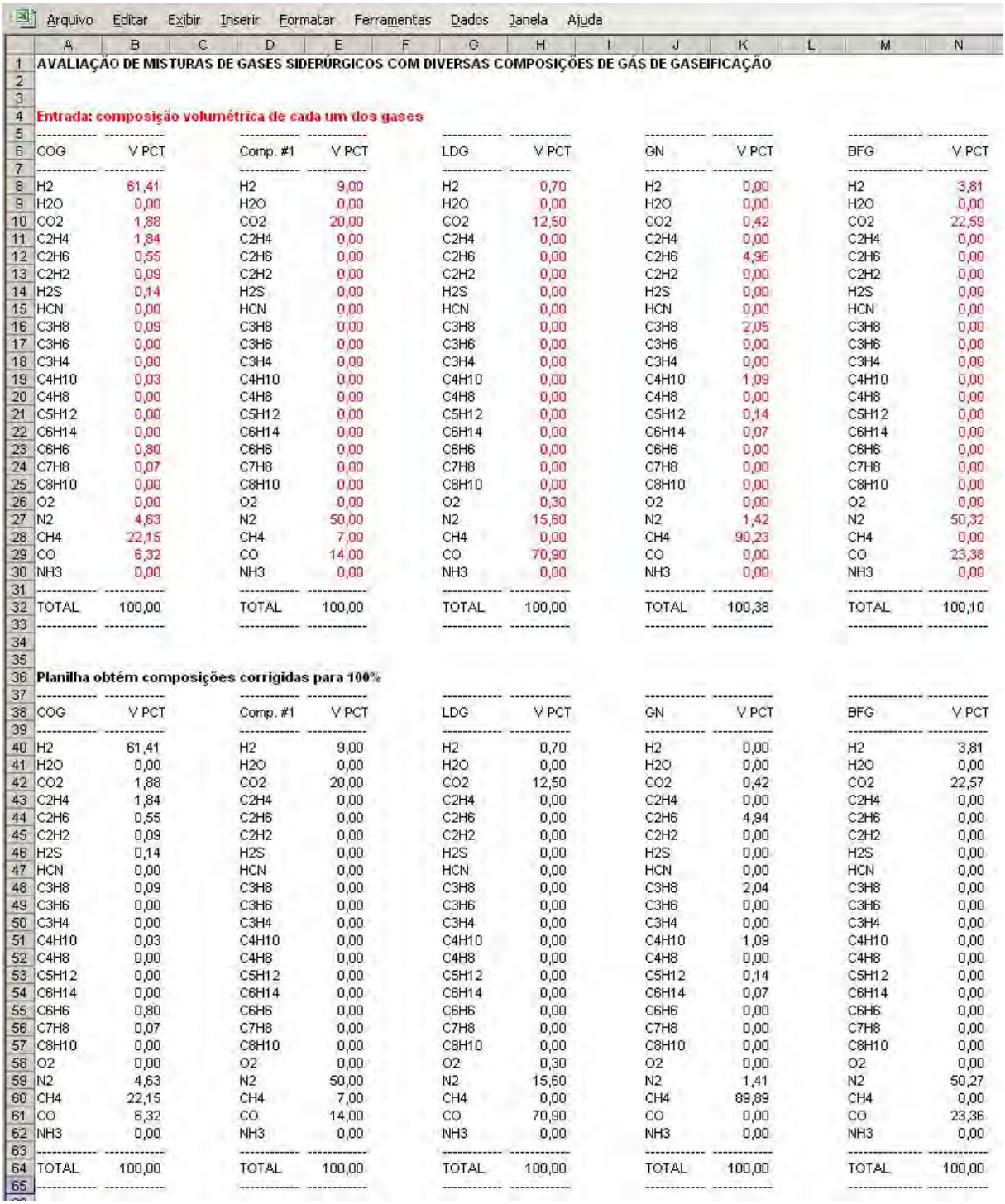
MORAIS, A.B., **Perspectivas de inserção do GLP na matriz energética brasileira**. 2005. 122 f Dissertação (Mestrado em Engenharia – Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005

REZAIYAN, J. E CHEREMISINOFF , N. P. **Gasification Technologies - A Primer for Engineers and Scientists.** 1.ed. Boca Raton, FL: Taylor &Fancis Group, 2005. 366p.

RICHARDS, G.A. et al. Issues for low-emission, fuel-flexible power systems, **Progress in Energy and Combustion Science**, v.27, n.2, p.141–169, feb. 2001.

ZACHARIAH-WOLFF, J.L.; EGYEDI, T.M.; HEMMES, K. From natural gas to hydrogen via the Wobbe Index: the role of standardized gateways in sustainable infrastructure transitions. **Hydrogen Energy**, v.32, n.9, p.1235-1245, jun. 2007.

APENDICE A – PLANILHA EXCEL DESENVOLVIDA



Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE GASES SIDERÚRGICOS COM DIVERSAS COMPOSIÇÕES DE GÁS DE GASEIFICAÇÃO

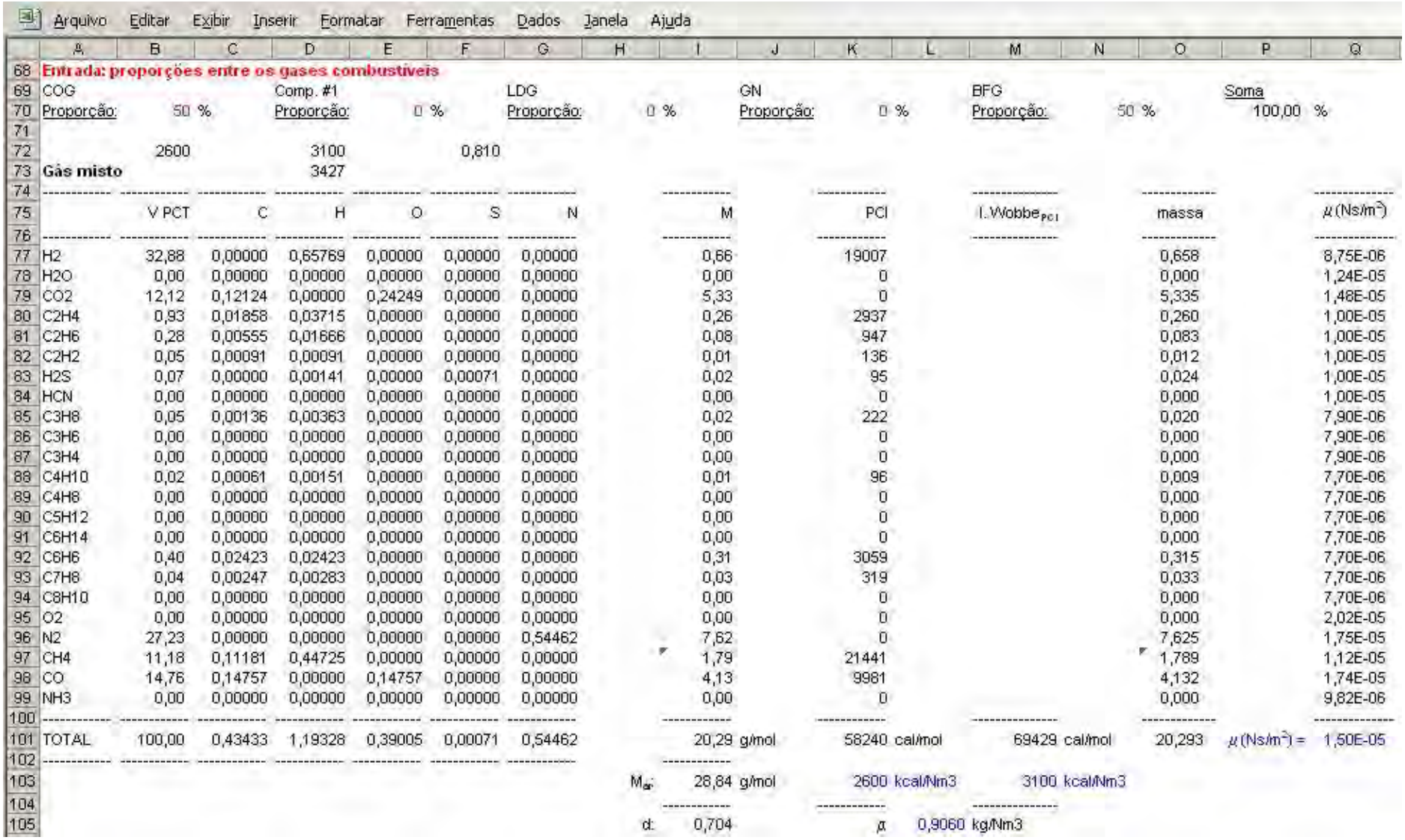
Entrada: composição volumétrica de cada um dos gases

COG	V PCT	Comp. #1	V PCT	LDG	V PCT	GN	V PCT	BFG	V PCT
H2	61,41	H2	9,00	H2	0,70	H2	0,00	H2	3,81
H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00
CO2	1,88	CO2	20,00	CO2	12,50	CO2	0,42	CO2	22,59
C2H4	1,84	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00
C2H6	0,55	C2H6	0,00	C2H6	0,00	C2H6	4,96	C2H6	0,00
C2H2	0,09	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00
H2S	0,14	H2S	0,00	H2S	0,00	H2S	0,00	H2S	0,00
HCN	0,00	HCN	0,00	HCN	0,00	HCN	0,00	HCN	0,00
C3H8	0,09	C3H8	0,00	C3H8	0,00	C3H8	2,05	C3H8	0,00
C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00
C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00
C4H10	0,03	C4H10	0,00	C4H10	0,00	C4H10	1,09	C4H10	0,00
C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00
C5H12	0,00	C5H12	0,00	C5H12	0,00	C5H12	0,14	C5H12	0,00
C6H14	0,00	C6H14	0,00	C6H14	0,00	C6H14	0,07	C6H14	0,00
C6H6	0,80	C6H6	0,00	C6H6	0,00	C6H6	0,00	C6H6	0,00
C7H8	0,07	C7H8	0,00	C7H8	0,00	C7H8	0,00	C7H8	0,00
C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00
O2	0,00	O2	0,00	O2	0,30	O2	0,00	O2	0,00
N2	4,63	N2	50,00	N2	15,60	N2	1,42	N2	50,32
CH4	22,15	CH4	7,00	CH4	0,00	CH4	90,23	CH4	0,00
CO	6,32	CO	14,00	CO	70,90	CO	0,00	CO	23,38
NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00
TOTAL	100,00	TOTAL	100,00	TOTAL	100,00	TOTAL	100,38	TOTAL	100,10

Planilha obtém composições corrigidas para 100%

COG	V PCT	Comp. #1	V PCT	LDG	V PCT	GN	V PCT	BFG	V PCT
H2	61,41	H2	9,00	H2	0,70	H2	0,00	H2	3,81
H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00
CO2	1,88	CO2	20,00	CO2	12,50	CO2	0,42	CO2	22,57
C2H4	1,84	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00
C2H6	0,55	C2H6	0,00	C2H6	0,00	C2H6	4,94	C2H6	0,00
C2H2	0,09	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00
H2S	0,14	H2S	0,00	H2S	0,00	H2S	0,00	H2S	0,00
HCN	0,00	HCN	0,00	HCN	0,00	HCN	0,00	HCN	0,00
C3H8	0,09	C3H8	0,00	C3H8	0,00	C3H8	2,04	C3H8	0,00
C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00
C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00
C4H10	0,03	C4H10	0,00	C4H10	0,00	C4H10	1,09	C4H10	0,00
C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00
C5H12	0,00	C5H12	0,00	C5H12	0,00	C5H12	0,14	C5H12	0,00
C6H14	0,00	C6H14	0,00	C6H14	0,00	C6H14	0,07	C6H14	0,00
C6H6	0,80	C6H6	0,00	C6H6	0,00	C6H6	0,00	C6H6	0,00
C7H8	0,07	C7H8	0,00	C7H8	0,00	C7H8	0,00	C7H8	0,00
C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00
O2	0,00	O2	0,00	O2	0,30	O2	0,00	O2	0,00
N2	4,63	N2	50,00	N2	15,60	N2	1,41	N2	50,27
CH4	22,15	CH4	7,00	CH4	0,00	CH4	89,89	CH4	0,00
CO	6,32	CO	14,00	CO	70,90	CO	0,00	CO	23,36
NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00
TOTAL	100,00	TOTAL	100,00	TOTAL	100,00	TOTAL	100,00	TOTAL	100,00

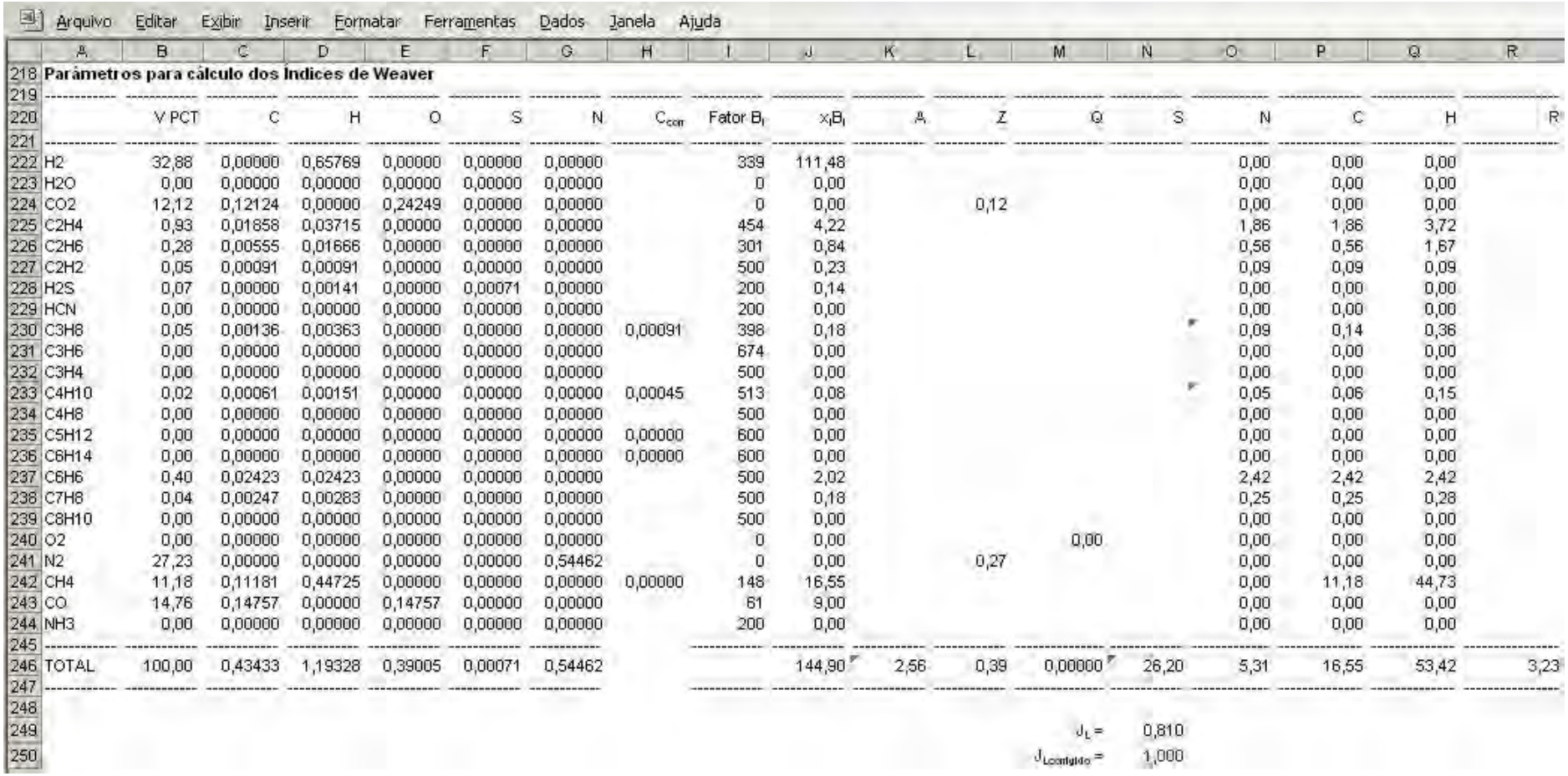
APENDICE A – PLANILHA EXCEL DESENVOLVIDA



Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
68	**Entrada: proporções entre os gases combustíveis**																
69	COG			Comp. #1			LDG			GN			BFG			Soma	
70	Proporção:	50 %		Proporção:	0 %		Proporção:	0 %		Proporção:	0 %		Proporção:	50 %		100,00 %	
71																	
72		2600		3100		0,810											
73	**Gás misto**			3427													
74	---	---	---	---	---	---	---		---		---		---		---		---
75		V PCT	C	H	O	S	N		M		PCI		I.Wobbe$_{PCI}$		massa		μ (Ns/m^2)
76	---	---	---	---	---	---	---		---		---		---		---		---
77	H2	32,88	0,00000	0,65769	0,00000	0,00000	0,00000		0,66		19007				0,658		8,75E-06
78	H2O	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		1,24E-05
79	CO2	12,12	0,12124	0,00000	0,24249	0,00000	0,00000		5,33		0				5,335		1,48E-05
80	C2H4	0,93	0,01858	0,03715	0,00000	0,00000	0,00000		0,26		2937				0,260		1,00E-05
81	C2H6	0,28	0,00555	0,01666	0,00000	0,00000	0,00000		0,08		947				0,083		1,00E-05
82	C2H2	0,05	0,00091	0,00091	0,00000	0,00000	0,00000		0,01		136				0,012		1,00E-05
83	H2S	0,07	0,00000	0,00141	0,00000	0,00071	0,00000		0,02		95				0,024		1,00E-05
84	HCN	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		1,00E-05
85	C3H8	0,05	0,00136	0,00363	0,00000	0,00000	0,00000		0,02		222				0,020		7,90E-06
86	C3H6	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		7,90E-06
87	C3H4	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		7,90E-06
88	C4H10	0,02	0,00061	0,00151	0,00000	0,00000	0,00000		0,01		96				0,009		7,70E-06
89	C4H8	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		7,70E-06
90	C5H12	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		7,70E-06
91	C6H14	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		7,70E-06
92	C6H6	0,40	0,02423	0,02423	0,00000	0,00000	0,00000		0,31		3059				0,315		7,70E-06
93	C7H8	0,04	0,00247	0,00283	0,00000	0,00000	0,00000		0,03		319				0,033		7,70E-06
94	C8H10	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		7,70E-06
95	O2	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		2,02E-05
96	N2	27,23	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,54462		7,62		0				7,625		1,75E-05
97	CH4	11,18	0,11181	0,44725	0,00000	0,00000	0,00000		1,79		21441				1,789		1,12E-05
98	CO	14,76	0,14757	0,00000	0,14757	0,00000	0,00000		4,13		9981				4,132		1,74E-05
99	NH3	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0,00		0				0,000		9,82E-06
100	---	---	---	---	---	---	---		---		---		---		---		---
101	TOTAL	100,00	0,43433	1,19328	0,39005	0,00071	0,54462		20,29	g/mol	58240	cal/mol	69429	cal/mol	20,293	μ (Ns/m^2) =	1,50E-05
102	---	---	---	---	---	---	---		---								
103								M_{ar}:	28,84	g/mol	2600	kcal/Nm3	3100	kcal/Nm3			
104									---		---		---				
105								d:	0,704		μ	0,9060	kg/Nm3				

APENDICE A – PLANILHA EXCEL DESENVOLVIDA



Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
218	**Parâmetros para cálculo dos Índices de Weaver**																	
219																		
220		V PCT	C	H	O	S	N	C_{corr}	Fator B_i	x_iB_i	A	Z	Q	S	N	C	H	R
221																		
222	H2	32,88	0,00000	0,65769	0,00000	0,00000	0,00000		339	111,48					0,00	0,00	0,00	
223	H2O	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0	0,00					0,00	0,00	0,00	
224	CO2	12,12	0,12124	0,00000	0,24249	0,00000	0,00000		0	0,00		0,12			0,00	0,00	0,00	
225	C2H4	0,93	0,01858	0,03715	0,00000	0,00000	0,00000		454	4,22					1,86	1,86	3,72	
226	C2H6	0,28	0,00555	0,01666	0,00000	0,00000	0,00000		301	0,84					0,56	0,56	1,67	
227	C2H2	0,05	0,00091	0,00091	0,00000	0,00000	0,00000		500	0,23					0,09	0,09	0,09	
228	H2S	0,07	0,00000	0,00141	0,00000	0,00071	0,00000		200	0,14					0,00	0,00	0,00	
229	HCN	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		200	0,00					0,00	0,00	0,00	
230	C3H8	0,05	0,00136	0,00363	0,00000	0,00000	0,00000	0,00091	398	0,18					0,09	0,14	0,36	
231	C3H6	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		674	0,00					0,00	0,00	0,00	
232	C3H4	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		500	0,00					0,00	0,00	0,00	
233	C4H10	0,02	0,00061	0,00151	0,00000	0,00000	0,00000	0,00045	513	0,08					0,05	0,06	0,15	
234	C4H8	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		500	0,00					0,00	0,00	0,00	
235	C5H12	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	600	0,00					0,00	0,00	0,00	
236	C6H14	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	600	0,00					0,00	0,00	0,00	
237	C6H6	0,40	0,02423	0,02423	0,00000	0,00000	0,00000		500	2,02					2,42	2,42	2,42	
238	C7H8	0,04	0,00247	0,00283	0,00000	0,00000	0,00000		500	0,18					0,25	0,25	0,28	
239	C8H10	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		500	0,00					0,00	0,00	0,00	
240	O2	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		0	0,00			0,00		0,00	0,00	0,00	
241	N2	27,23	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,54462		0	0,00		0,27			0,00	0,00	0,00	
242	CH4	11,18	0,11181	0,44725	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	148	16,55					0,00	11,18	44,73	
243	CO	14,76	0,14757	0,00000	0,14757	0,00000	0,00000		61	9,00					0,00	0,00	0,00	
244	NH3	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000		200	0,00					0,00	0,00	0,00	
245																		
246	TOTAL	100,00	0,43433	1,19328	0,39005	0,00071	0,54462			144,90	2,56	0,39	0,00000	26,20	5,31	16,55	53,42	3,23
247																		
248																		
249													J_L =	0,810				
250													$J_{Lcorrigido}$ =	1,000				