



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Guaratinguetá

Diego Ferolla de Abreu

**Desenvolvimento de um novo conceito para o Índice de
Wobbe**

Guaratinguetá

2012

Diego Ferolla de Abreu

Desenvolvimento de um novo conceito para o Índice de Wobbe

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.

Guaratinguetá

2012

A16
2d Abreu, Diego Ferolla de
Desenvolvimento de um novo conceito para o Índice de Wobbe /
Diego Ferolla de Abreu – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
45 f : il.
Bibliografia: f. 43-45

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior

1. Gases 2. Engenharia térmica I. Título


CDU 621.6.02

**Desenvolvimento de um novo conceito para o Índice de
Wobbe**

Diego Ferolla de Abreu


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA
DE "GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

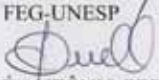
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

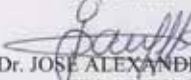

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador/FEG-UNESP


Prof. Dr. MAURÍCIO ARAÚJO ZANARDI
FEG-UNESP


Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
FEG-UNESP


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
FEG-UNESP

Novembro de 2012

DADOS CURRICULARES

DIEGO FEROLLA DE ABREU

NASCIMENTO	12/10/1988 - TAUBATÉ / SP
FILIAÇÃO	Gilberto de Abreu Lilian Ferolla de Abreu
2007/2012	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista / Campus de Guaratinguetá

de modo especial aos meus pais Gilberto e Lilian e a todos meus parentes que sempre me incentivaram nos estudos e me auxiliaram a atingir meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Deus que sempre me proporcionou saúde e condições adequadas para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

aos meus pais, Gilberto de Abreu e Lilian Ferolla de Abreu, que sempre me incentivaram a estudar e me ofereceram condições para que eu pudesse realizar estes estudos da melhor maneira possível, com todo foco direcionado à minha evolução.

ao meu orientador, Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior, que desde o primeiro dia que passei em sua sala me tratou muito bem, mesmo sendo apenas um aluno do primeiro ano viu em mim potencial para que realizássemos nossas pesquisas e me ofereceu a oportunidade de trabalhar com ele tanto na nossa Iniciação Científica quanto neste Trabalho de Graduação.

a todos os meus parentes, que sempre me ajudaram muito e são a base de toda minha estrutura, em especial às minhas avós Rosa Mastrorosa Ferolla e Amélia Abissi de Abreu que infelizmente não se encontram mais em vida, mas que de onde estiverem tenho certeza que estão felizes neste momento de conquista.

aos meus amigos que já passaram comigo por momentos bons e ruins mas que sem eles a vida não seria da mesma forma que é e que sem eles eu não teria conseguido alcançar minhas metas.

a todos os funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que sempre deram apoio, não só a mim, mas a todos os alunos desta instituição fornecendo a nós a possibilidade de crescermos profissionalmente e pessoalmente.

a todos os professores que já passaram pela minha vida e me auxiliaram a construir a base do meu crescimento, para estes tenho um agradecimento especial e uma promessa, de que estarei sempre estudando e evoluindo de modo a me tornar uma pessoa cada vez melhor.

ABREU, D. F. **Desenvolvimento de um novo conceito para o Índice de Wobbe.** 2012. 50 f. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2012.

Resumo

Com a crescente demanda de fontes alternativas de energia, cada vez mais buscam-se soluções para utilizar estas fontes em equipamentos antigos. Para equipamentos novos são realizados projetos considerando estas novas fontes de energia. Como solução para o uso de novas fontes de energia, propões-se o estudo da intercambiabilidade dos gases, no qual visa-se substituir um gás combustível por outro de forma a manter as condições iniciais do processo.

Em indústrias integradas, como é o caso de grande parte das siderúrgicas, ocorre ligação entre os processos, neste caso os subprodutos de um processo são usados como combustível de outros processos. Tem-se então condição nova para os equipamentos, projetados para estes novos combustíveis. Porém existem situações em que há falta desses subprodutos e os processos não podem ser interrompidos.

Através do estudo da intercambiabilidade é possível trabalhar com segurança nos dois casos, utilizando fontes alternativas em queimadores existentes e substitutos para queimadores novos. Porém, com estas novas soluções sendo implementadas viu-se que nem sempre o resultado dos métodos de intercambiabilidade apresentam resultados satisfatórios. Portanto, nesse estudo avalia-se uma nova abordagem para o Método do Índice de Wobbe que espera-se alcançar melhores resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Intercambiabilidade de gases, Índice de Wobbe,
Engenharia Térmica

ABREU, D. F. **Development of a new concept for Wobbe Index**. 2012. 50 pg. (Graduate in Mechanical Engineer) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2012.

Abstract

The increasing demand for alternative fuels lead to the search for solutions to use these fuels in old equipments and bring for new equipments the necessity of alternative fuels based burners. As a solution for these necessity the Gas Interchangeability`s studies came in evidence, because it studies the possibility of changing one fuel for another without changing the initial condition.

In integrated industries, as most of steel industries, there is a link between process, the byproducts of one process are used as fuel for other process. There are new conditions for the equipments, that will be developed for these fuels, but even in these industries there will be situations which the byproduct won`t be available, and the process cannot stop.

Using the gas interchangeability`s concepts is possible to work with security in both cases. Using alternative fuels in fossil fuel based burners and having a back-up solution for new technology burner. But using these new solutions were verified that there are some cases which the interchangeability`s methods does not work with satisfactory results, and for this reason, this study came to develop a new concept for the Method of Wobbe Index to evaluate the possibility to increase the range of the satisfactory results.

KEYWORDS: Gas interchangeability, Wobbe Index, Thermal Engineering

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Curva da energia cedida ao objeto em função da temperatura de operação	15
Figura 2	- Diferenças entre as curvas de entalpia em função da temperatura para dois gases combustíveis diferentes	16
Figura 3	- Gráfico do número de Wobbe versus velocidade de chama de Weaver	19
Figura 4	- Composição dos gases fornecida pelo usuário	32
Figura 5	- Correção das composições dos gases	33
Figura 6	- Informações do gás misto	34
Figura 7	- Detalhe da apresentação dos resultados dos índices com a solicitação de dados de entrada adicionais	34
Figura 8	- Dado de entrada do excesso de ar e dados de saída do gás produto da combustão	35
Figura 9	- Cálculo da temperatura de chama adiabática	35
Figura 10	- Calculo das curvas de entalpia e energia perdida em função da temperatura	36
Figura 11	- Curva entalpia x temperatura do gás de combustão	36
Figura 12	- Curva porcentagem do PCI x temperatura do gás de combustão	37
Figura 13	- Curva da entalpia dos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência COG	38
Figura 14	- Curva da porcentagem do PCI cedido aos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência COG	38
Figura 15	- Diferenças dos Índices de Wobbe Alternativo em função da temperatura de operação, gás de referência COG	39
Figura 16	- Curva da entalpia dos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência Gás Misto	40
Figura 17	- Curva da porcentagem do PCI cedido aos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência Gás Misto	40
Figura 18	- Diferenças dos Índice de Wobbe Alternativo em função da temperatura de operação, gás de referência Gás Misto	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição volumétrica do COG	25
Tabela 2	- Composição volumétrica do BFG	26
Tabela 3	- Composição volumétrica do LDG	27

LISTA DE ABREVIATURAS

A. G. A.	American Gas Association
BFG	Blast Furnace Gas (Gás de Alto Forno)
COG	Coke Oven Gas (Gás de Coqueria)
DME	Dimethyl-Ether (Éter Dimetílico)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GM	Gás Misto
GN	Gás Natural
GNL	Gás Natural Liquefeito
LDG	LD Gas (Gás de Aciaria)
LFG	Landfill Gas (Gás de Aterro Sanitário)
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramics (Cerâmica Aquecida à Baixa Temperatura)
MN	Methane Number (Número de Metano)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI*	Poder Calorífico Inferior Alternativo
Tca	Temperatura de Chama Adiabática
Top	Temperatura de Operação

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área da Seção Transversal do Orifício do Queimador	m^2
A	Quantidade de ar necessário para combustão estequiométrica, em base molar	mol
Bi	Coefficiente de Velocidade de Chama de Weaver para o Componente i	[1]
C	Índice de Mudança de Desempenho do Queimador	[1]
cp	Calor Específico Sensível a pressão constante	kJ/kmol.K
d	Densidade relativa do gás	[1]
E	Entalpia dos produtos teóricos da combustão de 15 a 871 °C (60 °F a 1600 °F)	kJ
F	Soma dos produtos das frações molares	[1]
h	Entalpia Específica	kJ/kmol
H	Poder Calorífico	kJ/Nm^3
Hc	Entalpia de Formação	kJ/kmol
Ja	Índice de Aeração Primária de Weaver	[1]
Jf	Índice de Retorno de Chama de Weaver	[1]
Jh	Índice de Aporte de Calor de Weaver	[1]
Ji	Índice de Combustão Incompleta de Weaver	[1]
Jl	Índice de Deslocamento de Chama de Weaver	[1]
Jy	Índice de Pontas Amarelas de Weaver	[1]
k	Coefficiente de Descarga do Orifício	[1]
N	Número de átomos de carbono facilmente liberados na combustão de 100 moléculas de gás	átomos
O	Fração Volumétrica de Oxigênio na Mistura	[1]
P	Pressão Manométrica	Pa
PCI	Poder Calorífico Inferior	kJ/Nm^3
PCI*	Poder Calorífico Inferior Alternativo	kJ/Nm^3
PCS	Poder Calorífico Superior	kJ/Nm^3
Q	Taxa de Energia Térmica	W

R	Proporção de número de átomos de hidrogênio para o número de átomos de carbono considerando somente os hidrocarbonetos	[1]
S	Fator de Velocidade de Chama de Weaver	[1]
T	Temperatura	°C
x_i	Fração Volumétrica do Componente i	[1]
W	Índice de Wobbe	kJ/Nm^3
Z	Fração Volumétrica de Inertes na Mistura	[1]

SUMÁRIO

1. Introdução	14
2. Fundamentação Teórica	17
2. 1. Conceitos de Intercambiabilidade	17
2. 2. Métodos Analíticos de Intercambiabilidade	18
2. 2. 1. Método do Índice de Wobbe	18
2. 2. 2. Método "C" da A.G.A	20
2. 2. 3. Método dos Múltiplos Índices de Weaver	21
2. 3. Conceitos de Termodinâmica e a Temperatura de Chama Adiabática	23
2. 4. Conceitos de Siderurgia	24
2. 4. 1. Coqueificação	24
2. 4. 2. Alto Forno	26
2. 4. 3. Conversor a Oxigênio - Processo LD	27
2. 5. Estudos Recentes na Área	27
3. Metodologia	29
3. 1. Planilha de Estudo de Intercambiabilidade através do Índice de Wobbee do Índice de Wobbe Alternativo	31
4. Resultados e Discussões	37
5. Conclusões	42
6. Referências Bibliográficas	43

1. Introdução

O índice de Wobbe tem sido mundialmente utilizado para realizar análises da intercambiabilidade de gases. É um índice muito eficiente pela fácil utilização e por não depender de parâmetros difíceis de serem obtidos tanto na prática quanto na teoria, como é o caso do Método dos Múltiplos Índices de Weaver. O Índice de Wobbe é calculado pela Equação 1.

$$W = \frac{PCI}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Na equação 1, W é o Índice de Wobbe, PCI é o poder calorífico inferior do gás e d é a densidade relativa do gás (adotando o valor 1 para o ar nas mesmas condições do gás). O PCS, poder calorífico superior, tem sido também utilizado na especificação do índice. O Índice de Wobbe diz que; se as pressões forem mantidas constantes, a potência fornecida pelos gases combustíveis será a mesma; logo, os gases poderão ser substituídos entre si sem alteração das condições de operação.

Todos os valores necessários para aplicação da Equação 1 são facilmente obtidos. O PCI (ou o PCS) pode ser calculado através da composição do gás, além de poder ser obtido experimentalmente com o uso de bombas calorimétricas. A massa específica pode ser igualmente calculada; no caso deste trabalho, pela equação dos gases perfeitos, conhecendo as condições do gás, que podem ser obtidas com a utilização de instrumentos simples como barômetro ou manômetros, dependendo do armazenamento do gás. Também é possível medir diretamente a massa específica do gás através de instrumentos medidores de massa específica.

Porém, como o Índice de Wobbe tem uma ampla utilização, existem instrumentos específicos para sua determinação, os Wobbímetros, que são aparelhos que unem a bomba calorimétrica com o medidor de massa específica e fornecem diretamente o seu valor.

Nas aplicações, o índice de Wobbe é calculado considerando o poder calorífico do combustível. Porém, em aplicações industriais, o poder calorífico do combustível nunca é transferido em sua totalidade para o processo. Isso ocorre porque os processos possuem uma temperatura específica de operação, T_{op} ; por exemplo, para aquecimento de placas na laminação, esta temperatura é cerca de 1200 °C. Assim, se não houver recuperação de calor dos produtos, a energia efetivamente transferida ao produto (ou ao objeto) corresponde à diferença entre o poder calorífico e a entalpia dos gases produtos da combustão à temperatura de operação. Isso indica que o índice de Wobbe mais adequado deve ser computado com esta diferença de entalpia.

No cálculo da temperatura de chama adiabática, é considerado que todo o calor da combustão é transferido para os gases de combustão. Deste cálculo, é possível obter a maior temperatura possível dos gases formados no processo. Do cálculo da entalpia dos gases é possível montar uma curva da entalpia H_c em função da temperatura dos gases no final do processo. Essa curva, apresentada na Figura 1, permite mostrar realmente a energia transferida para o produto, ou objeto, que é proporcional à potência que se quer manter constante ao trocar um gás por outro.

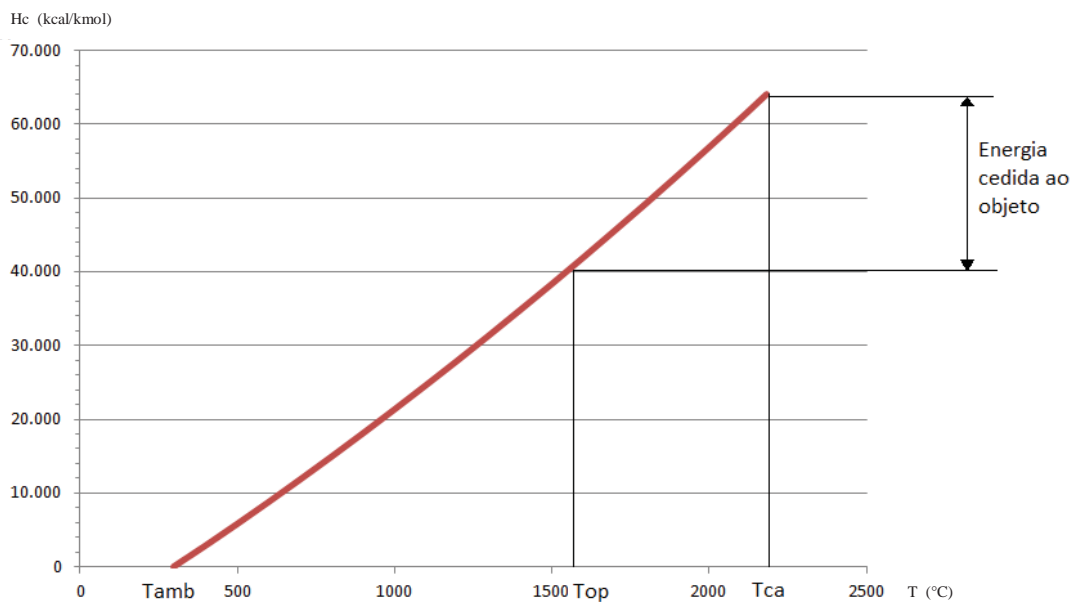


Figura 1 - Curva da energia cedida ao objeto em função da temperatura de operação.

Como as curvas da entalpia em função da temperatura dos gases de combustão variam de acordo com a composição dos gases combustíveis, a energia transferida no processo também varia, pois cada gás combustível apresenta uma curva de entalpia

diferente. Este motivo leva a realização desta análise, pois, como mostrado na Figura 2, a quantidade de calor pode variar muito de um gás para outro em função de suas composições.

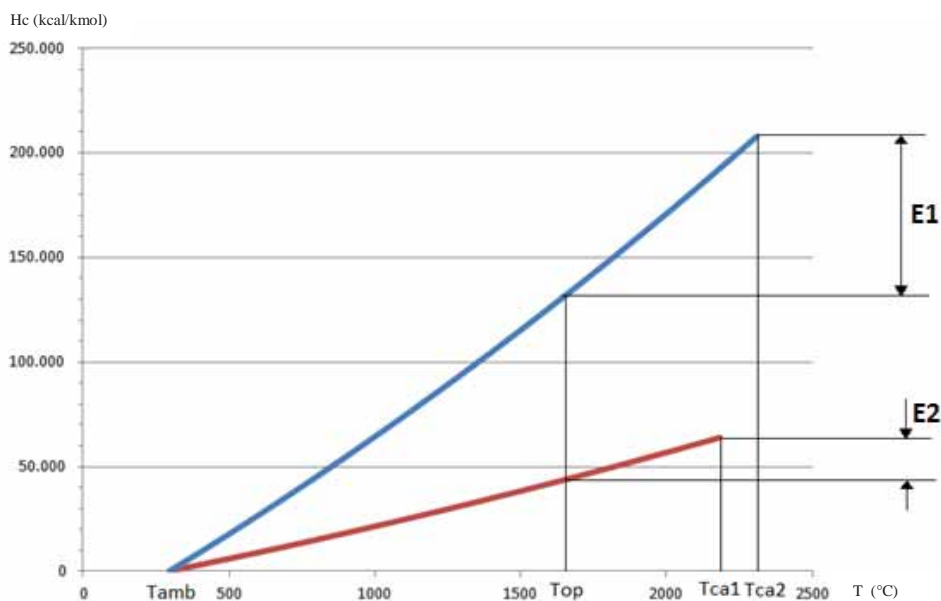


Figura 2 - Diferenças entre as curvas de entalpia em função da temperatura para dois gases combustíveis diferentes.

Neste estudo, analisa-se um Índice de Wobbe alternativo, no qual é considerada a diferença de energia de operação, chamada de PCI*, e não o PCI do gás, ou seja, foi considerado o calor transferido ao objeto e não todo calor que pode ser transferido pelo combustível. Considerando que Tca seja a temperatura de chama adiabática, o PCI* foi calculado pela Equação 2.

$$PCI^* = h(Tca) - h(Top) \quad (2)$$

Nem todos os gases que possuem sua intercambiabilidade determinada pelo método do Índice de Wobbe tiveram esse resultado confirmado na prática. O objetivo deste trabalho é aumentar o alcance da utilização do Índice de Wobbe, permitindo sua aplicação em um campo mais amplo, tornando o índice uma ferramenta ainda mais fundamental para avaliação da intercambiabilidade de gases.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Conceitos de Intercambiabilidade

Garcia (2002) explica a intercambiabilidade da seguinte forma. Ao se cogitar a substituição de um gás ou uma mistura de gases combustíveis por outros, primeiro deve-se avaliar se estes gases são intercambiáveis. Em casos negativos, haverá uma série de dificuldades de operação com o mesmo queimador ou sistema de queimadores ao realizar a troca.

A necessidade de estudos de previsão de intercambiabilidade surgiu quando se iniciou a substituição do gás de rua, gerado a partir de carvão mineral, para o gás natural ou os gases derivados de petróleo. Essa necessidade veio principalmente do fato dos queimadores possuírem uma pequena flexibilidade à variação da composição de seu combustível. Posteriormente, foi necessário avaliar o desempenho dos queimadores com diferentes composições de gás natural.

Dois gases são considerados intercambiáveis quando as características da chama são satisfatórias após a substituição de um pelo outro, usando-se o mesmo queimador, sem que este tenha sofrido alterações. Por características satisfatórias de chama, entende-se que os seguintes quesitos devem ser atendidos:

- A chama deve ser estável, sem apresentar descolamento, retorno ou pontas amarelas;
- A combustão deve manter inalterado os níveis de emissões de monóxido de carbono e fuligem;
- Os fluxos de energia térmica proporcionados pelo queimador devem ser próximos para ambos os gases;
- O sistema de ignição e de controle da queima deve operar bem com os dois gases.

Em outros termos, pode-se dizer que um ponto dentro da zona de chama estável, como função da aeração primária e da taxa de alimentação de gás, pode ser estabelecido para um dado queimador. Estes limites de chama irão variar em função da composição do gás suprido.

Assim, tanto o gás de referência, para o qual o queimador foi projetado, quanto o gás substituto devem ter as vazões de ar primário e de gás dentro dos limites de chama do queimador, para que os dois gases em pauta sejam considerados intercambiáveis.

2.2. Métodos Analíticos de Intercambiabilidade

Existe na literatura vários métodos analíticos para o cálculo da intercambiabilidade de gases. Cada método se baseou em uma série de pesquisas práticas, feitas para determinados tipos de gases e para alguns queimadores padronizados. Assim, deve-se procurar escolher o método mais adequado para os tipos de gases que se quer estudar a cada momento, sendo o ideal utilizar mais de um tipo de método para cada estudo.

2.2.1. Método do Índice de Wobbe

Este método é muito usado na prática européia, em conjunto com um fator de velocidade de chama medido, ou calculado, é considerado como um índice geral básico que deve sempre ser cavaliado, até mesmo como base para qualquer gás antes de se partir para qualquer outro método analítico mais complexo.

Wobbe desenvolveu seu índice em 1926, ao estudar o fenômeno da combustão de gases injetados através de um orifício. Este número mede a taxa de transferência de calor supondo-se inalteradas as condições de pressão de suprimentos do gás e o diâmetro do orifício através do qual flue o gás. O índice de Wobbe é obtido da equação 3.

$$Q = H a k \left(\frac{P}{d} \right)^{0,5} \quad (3)$$

A Equação 3 representa a taxa de transferência de calor, sendo esta igual ao poder calorífico do gás multiplicado pela vazão volumétrica deste. Os símbolos representam o seguinte; Q é a taxa de transferência de calor, H o poder calorífico do gás, a a área da seção transversal do orifício do queimador, k é o coeficiente de descarga do orifício, P o

pressão manométrica de suprimento do gás, e d é a densidade do gás relativa ao ar. Reagrupando os termos desta equação, tem-se a Equação 4.

$$Q = akP^{0,5} \frac{H}{d^{0,5}} \quad (4)$$

Na Equação 4, $H/d^{0,5}$ é o número de Wobbe, e $akP^{0,5}$ é um índice função da configuração do queimador e das condições de suprimento do gás.

O critério adotado para que dois gases sejam intercambiáveis é que seus números de Wobbe não difiram de $\pm 5\%$.

É também muito usada a conjunção do número de Wobbe com o fator de velocidade de chama de Weaver. Neste caso, como apresentado na Figura 3, o número de Wobbe é expresso graficamente em função da velocidade de chama de Weaver. Se os dois gases considerados estiverem próximos, isto é, dentro da faixa de números de Wobbe de $\pm 5\%$, eles são intercambiáveis. Caso o gás substituto esteja à esquerda do gás de referência, existirá a tendência ao deslocamento de chama na substituição. Se o gás substituto estiver à direita, a velocidade de chama maior tenderá a causar o retorno da chama.

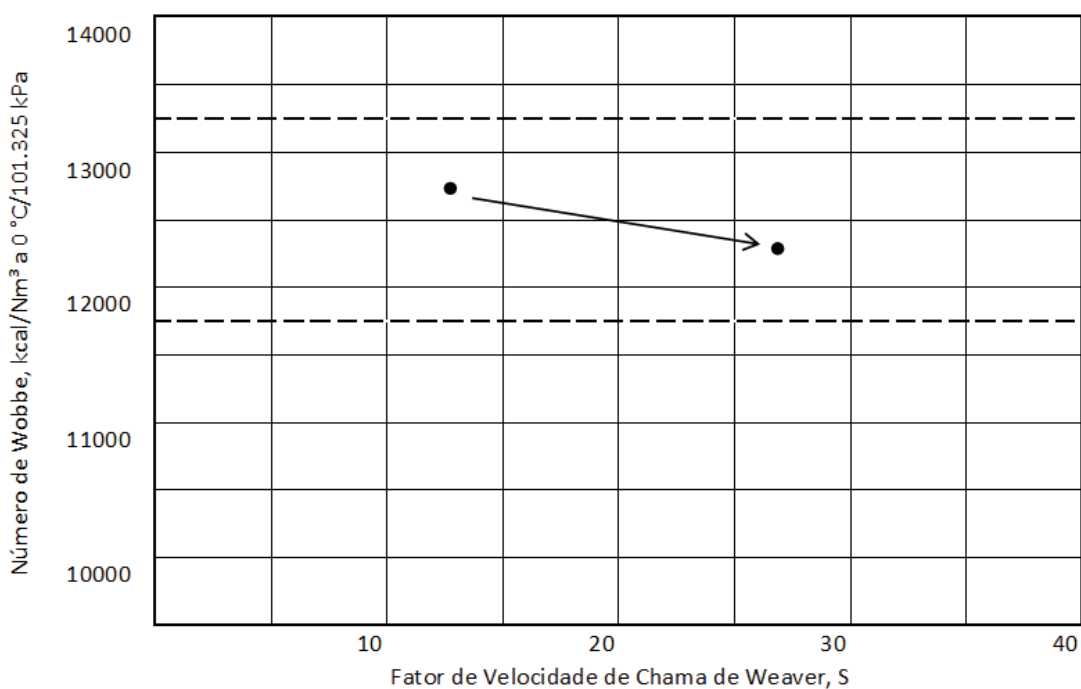


Figura 3 - Gráfico do número de Wobbe versus velocidade de chama de Weaver

2.2.2. Método "C" da A. G. A.

Este método foi desenvolvido pelos engenheiros da A. G. A. (*American Gas Association*) para cálculos de intercambiabilidade a partir de experiências com queimadores atmosféricos aerados, queimando gases cujos poderes caloríficos superiores situavam-se abaixo de 29.502 kJ/Nm³ (7.058 kcal/Nm³). Esta experiência envolveu cerca de 250 misturas de gases e, portanto, este método apresenta-se muito eficiente para misturas com PCS inferior a 29.502 kJ/Nm³ (7058 kcal/Nm³).

A Equação 5 foi desenvolvida para calcular o chamado índice de mudança no desempenho do queimador, C.

$$C = \frac{Hs.As.dr}{Hr.Ar.ds} + \frac{Hr.Ar}{5000.Er.Fr} - \frac{Hs.As}{5000.Es.Fs} \quad (5)$$

Na Equação 5, *H* é o poder calorífico do gás, *A* a quantidade de ar necessário para a combustão estequiométrica, em base molar, *d* a densidade do gás relativa ao ar, *E* a entalpia dos produtos teóricos da combustão de 15 a 871 °C (60 a 1600 °F), e *F* é a soma dos produtos das frações molares e uma constante que converte cada componente do combustível numa base comum expressa em hidrogênio livre equivalente. Os índices *r* e *s* que representam, respectivamente, o gás de referência e o gás substituto.

Deste experimento tem-se para que um resultado do queimador com o gás substituto seja satisfatório, C deve ficar na faixa de 0,85 a 1,15. Valores de C maiores que a unidade implicam em combustão incompleta, ao passo que valores de C menores que a unidade indicam a tendência a retorno de chama.

Este método apresenta resultados menos confiáveis quando as composições químicas dos gases forem muito diferentes. Assim, ele não serve para avaliar a intercambiabilidade entre misturas GLP-ar para substituir gás de cidade, este é o gás distribuído nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, antes ele era obtido do carvão mineral, hoje sua produção é obtida a partir do NAFTA.

2.2.3. Método dos Múltiplos Índices de Weaver

Segundo Garcia (2002) esse método foi desenvolvido por Weaver em 1951 com o intuito de aumentar o escopo de validade do Método de Múltiplos Índices da A.G.A., de forma a abranger gases de poderes caloríficos menores que os dos gases naturais. São 6 índices dos quais 5 para aferir o grau de intercambiabilidade. O método foi desenvolvido a partir de ensaios com misturas de metano, hidrogênio, monóxido de carbono, etano, propano, butano, eteno, propeno, acetileno, benzeno, nitrogênio e dióxido de carbono de forma a simular gases manufacturados e naturais. Nos ensaios foram preparados 6 gases de ajuste, todos com poderes caloríficos superiores a 21.402 kJ/Nm³ (5.034 kcal/Nm³) e densidades relativas no intervalo 0,41 a 0,73. Os índices são obtidos das Equações 6 a 11.

Aporte de calor:

$$Jh = \frac{Hs}{Hr} (dr/ds)^{0,5} \quad (6)$$

Aeração primária:

$$Ja = \frac{As}{Ar} (dr/ds)^{0,5} \quad (7)$$

Deslocamento de chama:

$$Jl = Ja \frac{Ss (1-Qs)}{Sr (1-Qr)} \quad (8)$$

Retorno de chama

$$Jf = \frac{Ss}{Sr} - 1,4, Ja + 0,4 \quad (9)$$

Pontas amarelas

$$Jy = Ja + \frac{Ns-Nr}{110} - 1,0 \quad (10)$$

Combustão incompleta

$$Ji = Ja - 0,366 \frac{Rs}{Rr} - 0,634 \quad (11)$$

O valor de S usado nas equações é o fator de velocidade de chama de Weaver e este é calculado pela Equação 12.

$$S = \frac{\sum xi.Bi}{A+1+5Z-18,8O} \quad (12)$$

As equações utilizam as seguintes propriedades xi é a fração volumétrica do componente i , A a quantidade de ar necessário para a combustão estequiométrica em base molar, Bi é o coeficiente de velocidade de chama de Weaver para o componente i , H o poder calorífico do gás em BTU/ft³, O é a fração volumétrica de oxigênio na mistura, d a densidade relativa ao ar, Z a fração volumétrica de inertes na mistura, 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 e hidrocarbonetos saturados menos um por molécula, são considerados facilmente liberados), R é a proporção de número de átomos de hidrogênio para o número de átomos de carbono considerando somente os hidrocarbonetos. Os índices s e r representam as propriedades do gás substituto e do gás de referência.

Os limites propostos por Weaver são:

J_h entre 0,95 e 1,05

J_l maior ou igual a 0,64

J_f menor ou igual a 0,08

J_l menor ou igual a zero

J_y menor ou igual a 0,14

Este método é utilizado em análises de intercambiabilidade de gases manufaturados, naturais, misturas propano-ar e gases de refinaria. Este método é mais confiável que o da A.G.A. de múltiplos índices, especialmente nos casos de gases manufaturados e fases de baixos poderes caloríficos.

Os valores de ar estequiométrico e o coeficiente de velocidade de Weaver podem ser obtidos em Garcia (2002).

2.3. Conceitos de Termodinâmica e a Temperatura de Chama Adiabática

Quando trabalha-se com projetos de equipamentos com troca de calor deve-se sempre avaliar a perda de temperatura oriunda da troca de calor entre os gases de combustão com os objetos que se deseja aquecer. Por exemplo, ao realizar o projeto de uma câmara de incineração na qual se deseja manter temperaturas médias de 1000°C, não pode-se considerar temperaturas de gases saindo desta câmara, ou permanecendo dentro desta, inferiores a esta temperatura. A temperatura de operação é a temperatura no interior da câmara de combustão, que é a mesma temperatura de saída dos gases.

Para entrar nos conceitos de temperatura de chama adiabática, antes é necessário inserir alguns dos conceitos da conservação de energia para as aplicações de combustão, como os fornecidos por Carvalho e McQuay (2007). Em qualquer reação química, os produtos possuem um valor de entalpia e os reagentes possuem outro valor de entalpia.

A entalpia é uma propriedade extensiva obtida através da soma da energia interna com o produto da pressão e do volume, esta propriedade tem grande aplicação pois, para casos de transferência de calor em processo quasi-estático à pressão constante, esta é igual à variação de entalpia (VAN WYLLLEN et al., 2003). Como este é o caso da maioria dos processos na natureza, será utilizado o termo entalpia ao longo deste desenvolvimento. A entalpia das substâncias varia de acordo com a temperatura. Para um gás perfeito, a entalpia é função da temperatura apenas (e não da pressão). Quanto maior a temperatura do gás, maior é a sua entalpia.

Este fenômeno permite analisar que, se o processo for adiabático, sem troca com o meio, então o estado final dos produtos deve estar no mesmo nível de entalpia dos reagentes. Isto significa dizer, que o estado final dos produtos, se não houver perda de energia para fora do sistema e se não houver transferência de energia para o produto, estará na mesma reta horizontal que passa pelo estado inicial dos reagentes. A temperatura correspondente a este nível é bem maior que a temperatura inicial dos reagentes.

Esta temperatura dos produtos, que fornece o mesmo nível de entalpia dos produtos é chamada de temperatura de chama adiabática e é chamada neste estudo de Tca. Ela é a maior temperatura que se pode obter para os produtos de combustão. Se houver perda através de paredes da fornalha ou transferência de calor em razão de

algum processo industrial, então a entalpia final dos produtos de combustão será inferior àquela correspondente à T_{ca} .

Para se calcular a temperatura de chama adiabática, precisa-se conhecer o calor específico a pressão constante, c_p , da mistura gasosa que constitui os produtos da combustão. Se este calor específico correspondesse a uma única mistura de gases, a temperatura de chama adiabática é calculada pela Equação 13.

$$\Delta H_c = \int_{T_i}^{T_f} c_p \cdot dT \quad (13)$$

Os valores de c_p em função da temperatura são normalmente fornecidos em manuais de química. Realizando-se este cálculo é possível montar as curvas de entalpia em função da temperatura que serão de grande utilidade neste trabalho.

2.4. Conceitos de siderurgia

Neste trabalho serão analisados gases siderúrgicos como possíveis substitutos aos gases comerciais, pois estes são obtidos em grande volume na indústria siderúrgica e, em muitos casos, não possuem uma aplicação própria, sendo realmente utilizados como fonte de energia nos processos das plantas industriais. Neste estudo, serão utilizados o COG (*Coke Oven Gas*, ou gás de coqueria), o BFG (*Blast Furnace Gas*, ou gás de alto forno) e o LDG (*LD Gas*, ou gás de aciaria). Apresenta-se uma breve explicação sobre os processos siderúrgicos que dão origem a estes subprodutos, com base em Mourão et al. (2011).

2.4.1. Coqueificação

O coque metalúrgico é utilizado como agente redutor nos altos fornos, e é o produto da destilação de carvão mineral à temperatura de 1000 °C. Embora haja uma grande disponibilidade do mesmo, principalmente no hemisfério norte, nem todo carvão mineral apresenta propriedades de coqueificação. O carvão mineral metalúrgico deve ter a propriedade de, durante o aquecimento sem a presença de ar, tornar-se plástico e, a

medida que vai eliminando as matérias voláteis, pode voltar a solidificar-se numa nova estrutura.

A coqueificação é feita numa bateria contendo retortas (longas, altas e estreitas) e com aquecimento entre elas. Após o descarregamento, o coque é resfriado bruscamente (extinção) com água ou nitrogênio.

A produção de coque metalúrgico gera importantes subprodutos, que são os diferentes hidrocarbonetos (materiais voláteis) derivados da destilação do carvão. O gás combustível (gás de coqueria) é um importante combustível, pois a sua composição é principalmente de metano, hidrogênio e monóxido de carbono. Seu poder calorífico inferior é praticamente metade daquele do gás natural e cinco vezes maior que o do gás de alto forno, tendo o valor de 18.710 kJ/Nm^3 (4.476 kcal/Nm^3). Nas usinas integradas este gás é utilizado para aquecimento na própria coqueria, no pré-aquecimento de ar no alto forno e nos fornos de aquecimento. A composição deste gás, e dos demais gases, foi obtida de Caputo (2009) seguindo os valores médios obtidos em uma grande empresa siderúrgica do estado do Espírito Santo. Assim, a composição volumétrica do COG utilizada neste trabalho é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição volumétrica do COG

COG	Fração Volumétrica (%)
H ₂	62,29
CO ₂	1,78
C ₂ H ₄	1,96
C ₂ H ₆	0,55
C ₂ H ₂	0,10
H ₂ S	0,11
C ₃ H ₈	0,10
C ₄ H ₁₀	0,03
C ₅ H ₁₂	0,02
C ₆ H ₆	0,96
C ₇ H ₈	0,09
C ₈ H ₁₀	0,01
O ₂	0,14
N ₂	2,95
CH ₄	21,88
CO	7,02
Total	100,00

2.4.2. Alto forno

O processo de alto forno domina o cenário mundial de produção de ferro-gusa líquido para a produção de aço. Este predomínio tem se mantido principalmente devido aos contínuos desenvolvimentos ocorridos a partir da década de 1970, no projeto e na tecnologia operacional e de manutenção. Esses desenvolvimentos levaram a aumentos significativos de produtividade, operação contínua por longo tempo, acentuada redução do consumo de combustíveis e aumento do uso de outros redutores, tais como gás natural e o carvão pulverizado.

O alto forno é um equipamento destinado a produzir ferro-gusa em estado líquido a uma temperatura de 1500 °C, com a quantidade e em quantidades necessárias para o bom andamento dos processos produtivos subsequentes. Para isso, o alto forno utiliza como matérias-primas básicas a carga metálica (sínter, pelotas, minério granulado) e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal), além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado, etc).

Os gases de alto forno são obtidos na parte superior deste reator metalúrgico. O gás sujo de partículas desce até o coletor de pó, onde as partículas mais grosseiras são depositadas, acumuladas e são descarregadas em um vagão. O gás então flui para lavagem em um equipamento tipo Venturi, onde são removidas as partículas mais finas na forma de lama. O estágio final de tratamento do gás consiste da passagem pelo desumidificador. Após todo este procedimento o gás de alto forno é levado aos regeneradores. A composição deste gás é apresentada na Tabela 2 (CAPUTO, 2009), esta composição leva ao poder calorífico inferior deste gás que tem o valor de 3.360 kJ/Nm³ (804 kcal/Nm³).

Tabela 2 – Composição volumétrica do BFG

BFG	Fração Volumétrica (%)
H ₂	3,81
CO ₂	22,57
N ₂	50,27
CO	23,36
Total	100,00

2.4.3. Conversor a oxigênio - processo LD

Segundo Mourão et al. (2007) o processo LD foi, até 2005, utilizado em 77% da produção brasileira de aço. O rápido crescimento desse processo na produção brasileira e mundial deve-se à suas características de alta produtividade, custos adequados e grande flexibilidade metalúrgica, podendo fabricar economicamente a maior parte dos tipos de aços.

Este processo consiste do uso de um sopro de oxigênio praticamente puro. Este sopro de oxigênio fornece a energia e a quantidade de gás suficiente para que o processo de redução ocorra. Algumas empresas já possuem sistemas para captar o gás produto deste processo, que contém um poder calorífico inferior aos gases de coqueria e de alto forno, mas que ainda assim possui um poder significativo e que diferente dos outros dois, não possui nenhuma aplicação na planta siderúrgica.

A composição do gás oriundo deste processo é apresentada na Tabela 3 (CAPUTO, 2009) e o seu poder calorífico inferior é igual a 7.440 kJ/Nm³ (1.780 kcal/Nm³).

Tabela 3 - Composição volumétrica do LDG

LDG	Fração Volumétrica (%)
H ₂	1,35
CO ₂	16,59
C ₂ H ₆	0,01
C ₆ H ₆	0,02
C ₇ H ₈	0,01
O ₂	0,49
N ₂	24,18
CO	57,35
Total	100,00

2.5. Estudos Recentes na Área

Há também os resultados de pesquisas recentes 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 ou *dimethyl-*

ether em inglês) 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 ou *landfill gas* 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 esteja ajustado para 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 àquela 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, em inglês). 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.

Loubar 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.

Jensen et al. (2000) realizaram um estudo sobre o uso de biogás na Dinamarca e constataram um aumento na produção de biogás e conseqüentemente de sua utilização. Foram realizados diversos estudos sobre este uso e seu uso em parceria com o gás natural.

Slater et al. (2010) desenvolveram um aparelho portátil capaz de realizar a medição do Índice de Wobbe. Eles desenvolveram um sistema que utiliza *low temperature co-fired ceramic* (LTCC) que torna o produto compacto e barato. Eles obtiveram resultados positivos, obtendo medições estáveis.

Muller et al. (2011) desenvolveram um modelo para analisar o processo de combustão de uma planta que pode queimar até 6 tipos diferentes de gases. As variáveis a serem controladas neste modelo foram o calor específico, o número de Wobbe, o índice da velocidade de chama e a pressão. Obtiveram como resultado que ao utilizarem iterações lineares e otimizações em tempo real controlando as variáveis o sistema real tornou-se confiável e otimizado.

3. Metodologia

Para se realizar a análise teórica foi criada uma planilha no programa Microsoft Excel, que realiza o cálculo do Índice de Wobbe de uma mistura de gases a partir da composição dos gases combustíveis. Ela utiliza esta composição para calcular o PCI e a densidade do gás, fornecendo, assim, o Índice de Wobbe.

Em adição, foi implementada na planilha o cálculo do Índice de Wobbe Alternativo. Para isso, foi necessário fornecer dois dados adicionais, a temperatura de operação do processo e o excesso de ar. A temperatura de chama adiabática e a curva da entalpia do gás de combustão em função da temperatura dos gases também são fornecidos pela planilha, auxiliando na análise do estudo.

Com os dois índices, calculados pela planilha, é possível avaliá-los e calcular a diferença do Índice de Wobbe e do Índice de Wobbe Alternativo.

Como este estudo tem grande aplicação na indústria siderúrgica, os gases que serão avaliados são os gases normalmente obtidos como subprodutos dos processos siderúrgicos e que são de grande utilidade como combustíveis nos processos industriais. Foram testadas misturas que podem ser usadas para substituir estes gases utilizados nos processos destas plantas, que são gás de coqueria (COG) e o gás misto (GM). Este segundo é uma mistura de gás de coqueria (COG) com gás de alto forno (BFG).

O substituto principal que será avaliado é o gás natural (GN), cuja composição foi assumida como (CARVALHO, 2009): CH₄: 89,89%; CO₂: 0,42%; C₂H₆: 4,94%; C₃H₈: 2,04%; C₄H₁₀: 1,09%; C₅H₁₂: 0,14%; C₆H₁₄: 0,07%; N₂: 1,41%. A partir do GN, estudaram-se misturas com gases inertes (N₂), com o próprio ar (O₂ + N₂) e com outros gases combustíveis presentes na planta. Estes gases foram escolhidos pois, como o PCI do GN é maior do que o PCI do COG e do GM, precisa-se utilizar gases que irão absorver esta energia, por isso o uso de ar ou gás inerte, também são usados gases com PCI inferiores aos do COG e GM. O aumento da oferta de gás natural devido ao descobrimento de novos poços fez com que este gás fosse uma oportunidade muito vantajosa para se ter de back-up devido ao seu elevado poder calorífico aliado agora a um preço mais acessível e de fácil possibilidade de armazenamento, sendo que hoje já está disponível no mercado o Gás Natural Liquefeito (GNL), que permite o armazenamento de uma grande massa de gás em um pequeno volume.

Neste estudo foi avaliada a diferença entre os Índices de Wobbe Alternativos para gases ou mistura de gases que possuem o mesmo valor do Índice de Wobbe tradicional do gás de referência. Para isso construiu-se gráficos da diferença dos Índices de Wobbe Alternativos em função da temperatura de operação do processo. Definiu-se o intervalo de temperatura de operação de 1000 a 1800 K. O excesso de ar foi fixado em 5%, pois este valor é usual em processos de combustão com gases combustíveis.

3.1. Planilha de estudo de intercambiabilidade através do Índice de Wobbe e do Índice de Wobbe alternativo

O estudo teórico será baseado em uma planilha criada com a intenção de calcular o índice de Wobbe e o Índice de Wobbe alternativo de um gás, ou uma mistura de dois ou mais gases.

Para realização dos cálculos dos índices, primeiramente a planilha permite aos usuários fornecer como dado de entrada a composição dos gases que desejam trabalhar, é fornecida uma extensa lista de gases puros que constituem os gases manufaturados e naturais encontrados nos mais diversos processos industriais. Neste estudo decidiu-se usar os gases siderúrgicos pela ideia do fácil uso da intercambiabilidade para estes gases. A Figura 4 mostra este primeiro detalhe da planilha. Todos os valores em vermelho são valores fornecidos pelo usuário.

Em seguida é realizado o acerto da composição dos gases fornecidos, como pode ser visto na Figura 4, nem sempre as composições possuem uma soma igual a 100%, pois muitas destas são obtidas com instrumentos e eles não fornecem valores exatos. Para evitar problemas na continuidade da planilha, foi decidido que deve ser feito o acerto da composição. A planilha já faz isso automaticamente. O resultado é mostrado na Figura 5.

Na continuação, são fornecidas as composições dos gases que formam a mistura a ser estudada, ou se for um único gás, coloca-se sua composição de 100%. Com a informação das composições dos gases industriais e suas frações na mistura final, a planilha fornece as informações do gás misto. Ela ainda fornece algumas informações como o PCI do gás misto e a massa molecular. Esta seção é mostrada na Figura 6.

Com esta informação já é possível calcular o Índice de Wobbe, porém ainda não é suficiente para o cálculo do Índice de Wobbe Alternativo. Para esse cálculo é necessário o estudo da entalpia do ar e do gás produzido pela combustão. Por isso a planilha solicita ao usuário que forneça o valor da temperatura de operação do processo e assim possibilite o cálculo do valor da energia transferida ao objeto no processo. O detalhe que mostra a solicitação da temperatura de operação juntamente com os resultados do Índice de Wobbe e do Índice de Wobbe Alternativo é apresentada na Figura 7.

Gases de grande aplicação industrial		Dados a serem fornecidos - Composição volumétrica dos gases									
COG	Comp. Vol.(%)	BFG	Comp. Vol.(%)	LDG	Comp. Vol.(%)	GN	Comp. Vol.(%)	GLP	Comp. Vol.(%)	AR	Comp. Vol.(%)
H2	62,29	H2	3,81	H2	1,35	H2	0,00	H2	0,00	H2	0,00
H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00	H2O	0,00
CO2	1,78	CO2	22,57	CO2	16,59	CO2	0,42	CO2	0,00	CO2	0,00
C2H4	1,96	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00	C2H4	0,00
C2H6	0,55	C2H6	0,00	C2H6	0,01	C2H6	4,96	C2H6	0,00	C2H6	0,00
C2H2	0,10	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00	C2H2	0,00
H2S	0,11	H2S	0,00	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	HCN	0,00
C3H8	0,10	C3H8	0,00	C3H8	0,00	C3H8	2,05	C3H8	26,06	C3H8	0,00
C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	0,00	C3H6	31,25	C3H6	0,00
C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	0,00	C3H4	5,00	C3H4	0,00
C4H10	0,03	C4H10	0,00	C4H10	0,00	C4H10	1,09	C4H10	19,83	C4H10	0,00
C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	0,00	C4H8	10,03	C4H8	0,00
C5H12	0,02	C5H12	0,00	C5H12	0,00	C5H12	0,14	C5H12	7,07	C5H12	0,00
C6H14	0,00	C6H14	0,00	C6H14	0,00	C6H14	0,07	C6H14	0,00	C6H14	0,00
C6H6	0,96	C6H6	0,00	C6H6	0,02	C6H6	0,00	C6H6	0,00	C6H6	0,00
C7H8	0,09	C7H8	0,00	C7H8	0,01	C7H8	0,00	C7H8	0,00	C7H8	0,00
C8H10	0,01	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00	C8H10	0,00
O2	0,14	O2	0,00	O2	0,49	O2	0,00	O2	0,00	O2	21,00
N2	2,95	N2	50,27	N2	24,18	N2	1,42	N2	0,00	N2	79,00
CH4	21,88	CH4	0,00	CH4	0,01	CH4	90,23	CH4	0,77	CH4	0,00
CO	7,02	CO	23,36	CO	57,35	CO	0,00	CO	0,00	CO	0,00
NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00	NH3	0,00
Total	99,99	Total	100,01	Total	100,01	Total	100,38	Total	100,01	Total	100,00

Figura 4 – Composição dos gases fornecida pelo usuário

Composição corrigida		COG		BFG		LDG		Comp. Vol.(%)		GN		Comp. Vol.(%)		GLP		Comp. Vol.(%)		AR		Comp. Vol.(%)	
H2	62,30								1,35												
H2O	0,00								0,00												
CO2	1,78								16,59												
C2H4	1,96								0,00												
C2H6	0,55								0,01												
C2H2	0,10								0,00												
H2S	0,11								0,00												
HCN	0,00								0,00												
C3H8	0,10								0,00												
C3H6	0,00								0,00												
C3H4	0,00								0,00												
C4H10	0,03								0,00												
C4H8	0,00								0,00												
C5H12	0,02								0,00												
C6H14	0,00								0,00												
C6H6	0,96								0,02												
C7H8	0,09								0,01												
C8H10	0,01								0,00												
O2	0,14								0,49												
N2	2,95								24,18												
CH4	21,88								0,01												
CO	7,02								57,34												
NH3	0,00								0,00												
Total	100,00								100,00												
Proporção de cada gás na mistura																					
COG	(%)								(%)												
Proporção	100,00								0,00												
A soma das composições deve dar 100%																					
Total																					
100,00																					
BFG																					
Proporção																					
100,00																					
LDG																					
Proporção																					
0,00																					
GN																					
Proporção																					
0,00																					
GLP																					
Proporção																					
0,00																					
AR																					
Proporção																					
0,00																					

Figura 5 – Correção das composições dos gases

Composição do gás misto										
	Comp. Vol.(%)	C	H	O	S	N	PCI(kcal/kmol)	M		
H2	62,2962	0,0000	1,2459	0,0000	0,0000	0,0000	36.006	1,25		
H2O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
CO2	1,7802	0,0178	0,0000	0,0356	0,0000	0,0000	0	0,78		
C2H4	1,9602	0,0392	0,0784	0,0000	0,0000	0,0000	6.198	0,55		
C2H6	0,5501	0,0110	0,0330	0,0000	0,0000	0,0000	1.877	0,17		
C2H2	0,1000	0,0020	0,0020	0,0000	0,0000	0,0000	300	0,03		
H2S	0,1100	0,0000	0,0022	0,0000	0,0011	0,0000	147	0,04		
HCN	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
C3H8	0,1000	0,0030	0,0080	0,0000	0,0000	0,0000	489	0,04		
C3H6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
C3H4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
C4H10	0,0300	0,0012	0,0030	0,0000	0,0000	0,0000	191	0,02		
C4H8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
C5H12	0,0200	0,0010	0,0024	0,0000	0,0000	0,0000	156	0,01		
C6H14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
C6H6	0,9601	0,0576	0,0576	0,0000	0,0000	0,0000	7.273	0,75		
C7H8	0,0900	0,0063	0,0072	0,0000	0,0000	0,0000	811	0,08		
C8H10	0,0100	0,0008	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	105	0,01		
O2	0,1400	0,0000	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000	0	0,04		
N2	2,9503	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0590	0	0,83		
CH4	21,8822	0,2188	0,8753	0,0000	0,0000	0,0000	41.961	3,50		
CO	7,0207	0,0702	0,0000	0,0702	0,0000	0,0000	4.749	1,97		
NH3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00		
Total	100,0000	0,4289	2,3160	0,1086	0,0011	0,0590	PCI(kcal/kmol)	100,263	Mgas	10,06
							PCI(kcal/Nm3)	4,476		
AR									Mar	28,84

Figura 6 – Informações do gás misto

Pré - aquecimento do ar						
Taq (K)	O2 (kcal/kmol)	N2 (kcal/kmol)	Total (kcal/kmol)			
298	0,30	0,01	0,31			
Alternativo						
Top (K)	CO2 (kcal/kmol)	H2O (kcal/kmol)	SO2 (kcal/kmol)	O2 (kcal/kmol)	N2 (kcal/kmol)	Total (kcal/kmol)
1500	6.320,61	13.361,56	15,46	485,73	33.861,01	54.044,37
PCI* (kcal/kmol)						
46.219						
Índice de Wobbe Alternativo (kcal/kmol)			78.246	78.246		
Índice de Wobbe Alternativo (kcal/Nm3)			3.493	3.493		
Tradicional						
Indice de Wobbe (kcal/kmol)			169.741	169.741		
Indice de Wobbe (kcal/Nm3)			7.578	7.578		
				Dif(%)		
				0,00		

Figura 7 – Detalhe da apresentação dos resultados dos índices com a solicitação de dados de entrada adicionais.

Neste último detalhe é possível visualizar um outro dado que foi solicitado para otimizar ainda mais a capacidade do Índice de Wobbe Alternativo através da consideração do pré aquecimento de ar. Considerando o pré-aquecimento de ar e a temperatura de operação tem-se a real energia transferida no processo.

A planilha ainda dá ao usuário a oportunidade de variar o excesso de ar, conforme demonstrado na Figura 8. Dessa forma pode-se analisar a combustão na sua visão real e não apenas na situação estequiométrica ideal.

AR					
St	e	coef.	O2	N2	Total
0,9547	0,05	1,0047	1,0047	3,7778	4,7826
PRODUTOS					
CO2	H2O	SO2	O2	N2	Total
0,4289	1,1580	0,0011	0,0500	3,8073	5,4454

Figura 8 – Dado de entrada do excesso de ar e dados de saída do gás produto da combustão

Nesta planilha foi criada uma forma de calcular a temperatura de chama adiabática utilizando umas das ferramentas do programa, a função Atingir Meta. Com os dados da composição do Gás Misto é possível calcular o PCI, como apresentado na Figura 6 e a composição dos gases produtos da combustão, como apresentado na Figura 8. Com estes dados e as curvas de entalpia de cada substância calculado pela Equação 13, ao realizar a iteração pela ferramenta Atingir Meta temos a Temperatura de Chama Adiabática. Esta seção é apresentada na Figura 9.

Temperatura de chama adiabática					
Tca(K)	2349,85				
PCI(kcal/kmol)	100.263				
Qge(kcal/kmol)	CO2	H2O	SO2	O2	N2
	11.555	26.701	29	856	61.121
Total(kcal/kmol)	100.263				

Figura 9 – Cálculo da temperatura de chama adiabática

Finalizando a planilha são fornecidas as curvas da entalpia dos gases formados em função das temperaturas e da porcentagem da energia perdida no processo, que será chamada de % do PCI, em função da temperatura. Esta foi criada para facilitar a análise das misturas, com a proposta de, a partir delas, encontrar a tendência para distinguir onde deixa de ser possível o uso do Índice de Wobbe. A tabela que fornece os dados de entalpia para a construção das curvas é apresentada na Figura 10. As duas curvas são apresentadas nas Figuras 11 e 12.

Curva entalpia x T							
T (K)	CO2 (kcal/kmol)	H2O (kcal/kmol)	SO2 (kcal/kmol)	O2 (kcal/kmol)	N2 (kcal/kmol)	Total (kcal/kmol)	%PCI
298	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	2,3969E-05
400	410,22	996,53	1,06	34,62	2.659,81	4.102,24	4,09148948
500	851,34	1.987,79	2,15	71,85	5.305,92	8.219,05	8,19751256
600	1.323,05	2.996,30	3,29	110,78	7.990,10	12.423,53	12,3909633
700	1.819,68	4.025,18	4,48	150,74	10.712,35	16.712,42	16,6686139
800	2.336,94	5.077,52	5,71	191,38	13.472,67	21.084,22	21,0289555
900	2.871,49	6.156,42	6,99	232,52	16.271,07	25.538,49	25,4715586
1000	3.420,66	7.265,00	8,31	274,05	19.107,55	30.075,56	29,9967303
1100	3.982,24	8.406,35	9,67	315,90	21.982,09	34.696,25	34,6053088
1200	4.554,43	9.583,57	11,06	358,02	24.894,71	39.401,80	39,2985316
1300	5.135,71	10.799,78	12,50	400,38	27.845,41	44.193,78	44,0779461
1400	5.724,80	12.058,08	13,96	442,96	30.834,17	49.073,97	48,9453461
1500	6.320,61	13.361,56	15,46	485,73	33.861,01	54.044,37	53,9027257
1600	6.922,22	14.713,34	16,99	528,69	36.925,93	59.107,16	58,9522438
1700	7.528,83	16.116,51	18,55	571,82	40.028,91	64.264,63	64,0961977
1800	8.139,79	17.574,18	20,14	615,13	43.169,97	69.519,21	69,3370019
1900	8.754,51	19.089,46	21,76	658,59	46.349,11	74.873,41	74,6771713
2000	9.372,50	20.665,44	23,39	702,21	49.566,31	80.329,85	80,1193075
2100	9.993,35	22.305,24	25,05	745,98	52.821,59	85.891,21	85,6660876
2200	10.616,71	24.011,95	26,73	789,90	56.114,95	91.560,23	91,3202553
2300	11.242,30	25.788,67	28,43	833,96	59.446,38	97.339,74	97,0846128
2349,85	11.554,91	26.701,49	29,28	855,99	61.121,31	100.262,97	100,000187

Figura 10 – Cálculo das curvas de entalpia e energia perdida em função da temperatura.

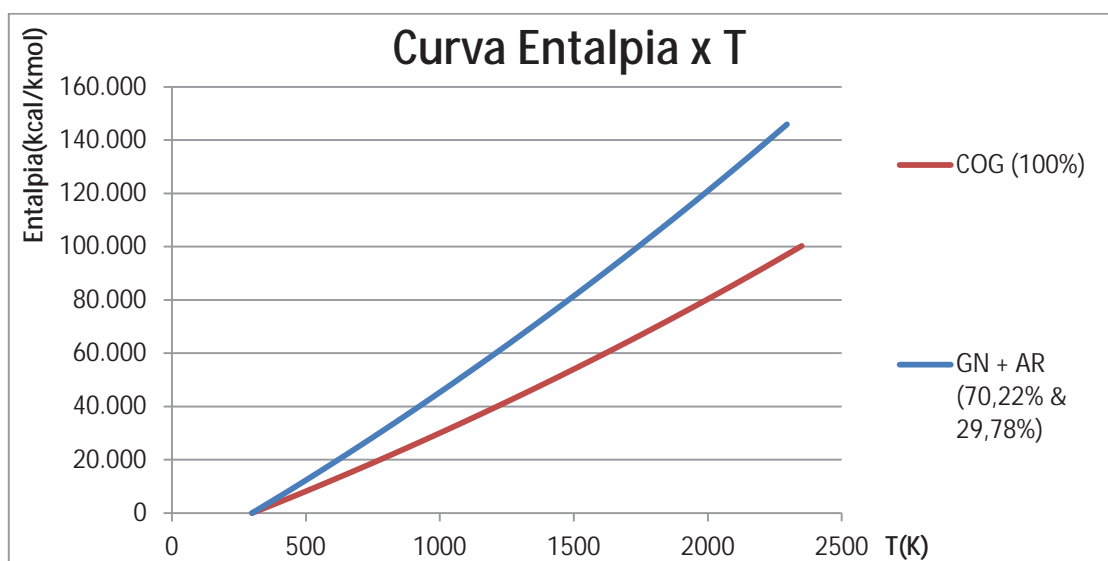


Figura 11 – Curva entalpia x temperatura do gás de combustão.

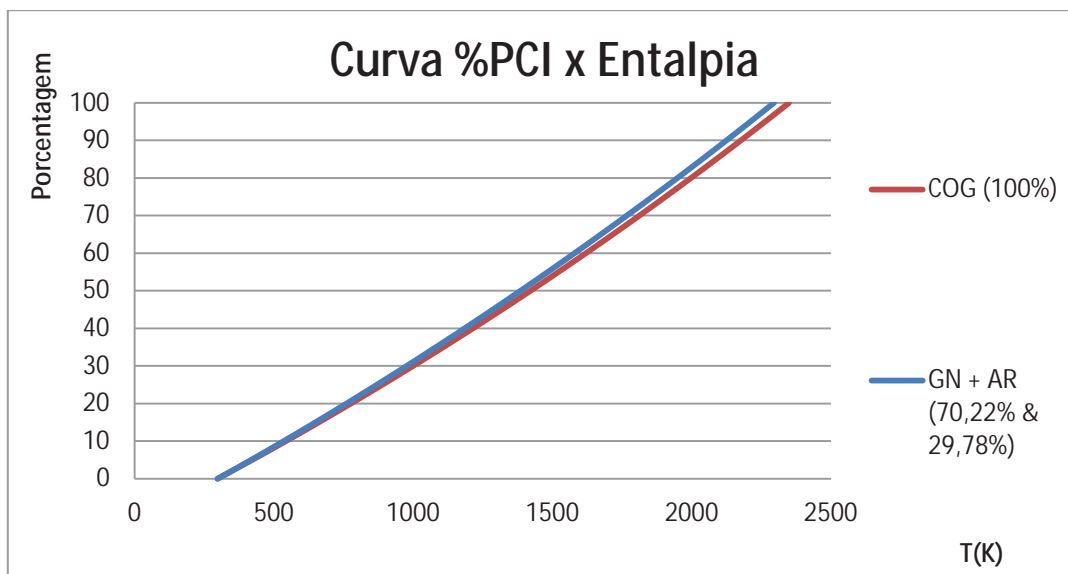


Figura 12 - Curva porcentagem do PCI x temperatura do gás de combustão

Esta planilha foi criada usando os cálculos químicos (balanços de massa e molares), termodinâmicos (entalpia) e combustão (temperatura de chama adiabática, índice de Wobbe). Ela tenta sintetizar o estudo do índice de Wobbe fornecendo ao usuário a possibilidade de explorar as misturas de gases a sua escolha e nas condições que tiver em seus processos, ou que deseja usar em futuros processos.

A partir dela serão realizados os cálculos deste estudo. Para garantir o resultado desta planilha foi realizado a verificação de resultados apresentados por ela com resultados conhecidos da teoria e também com resultados de outras planilhas que haviam sido elaboradas pelo orientador e os alunos do projeto, que já haviam trabalhado com intercambiabilidade em outras situações.

4. Resultados e Discussões

A primeira análise foi realizada considerando a substituição do gás de coqueria (COG) pelas seguintes misturas: gás natural e ar; gás natural e nitrogênio; gás natural e gás de alto forno. O COG possui um PCI de 18.710 kJ/Nm^3 (4.476 kcal/Nm^3) e o seu valor do Índice de Wobbe é de 31.676 kcal/Nm^3 (7.578 kcal/Nm^3). A partir desta análise foi realizada a proporção das misturas e foram obtidos os seguintes valores: gás natural (70,22%) e ar (29,78%); gás natural (69,87%) e nitrogênio (30,13%); gás natural

(68,69%) e BFG (31,31%). Estas composições fornecem as curvas de entalpia versus temperatura da Figura 13. A Figura 14 apresenta as mesmas curvas da Figura 13, porém em termos de porcentagem do poder calorífico perdido no processo.

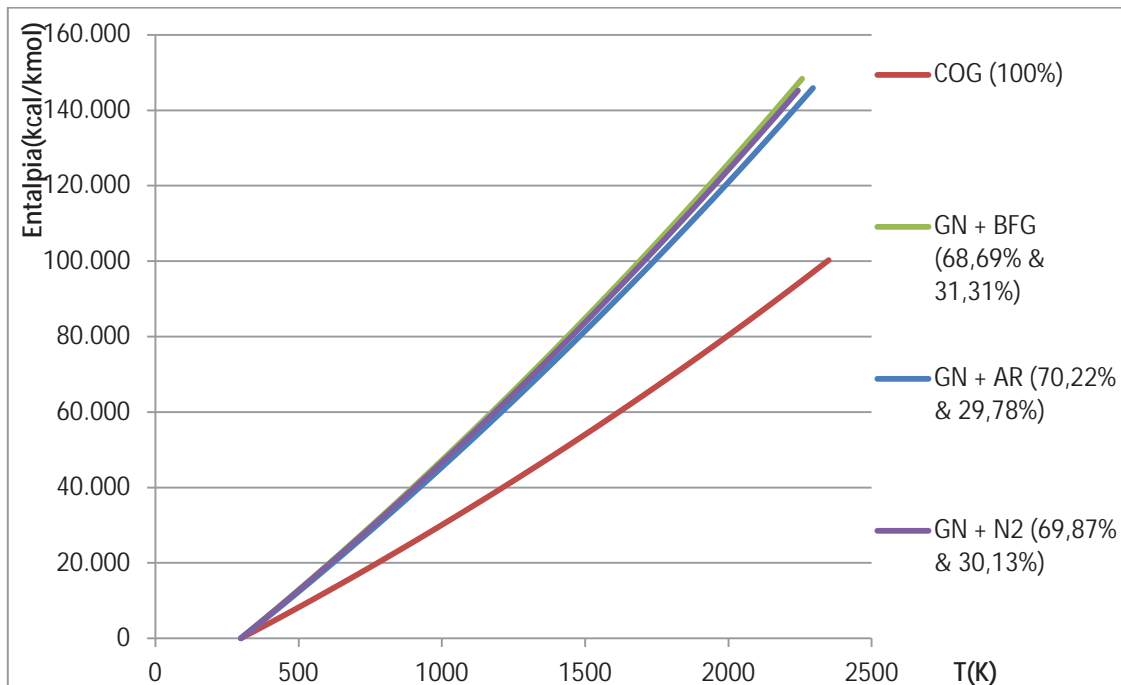


Figura 13 - Curva da entalpia dos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência COG.

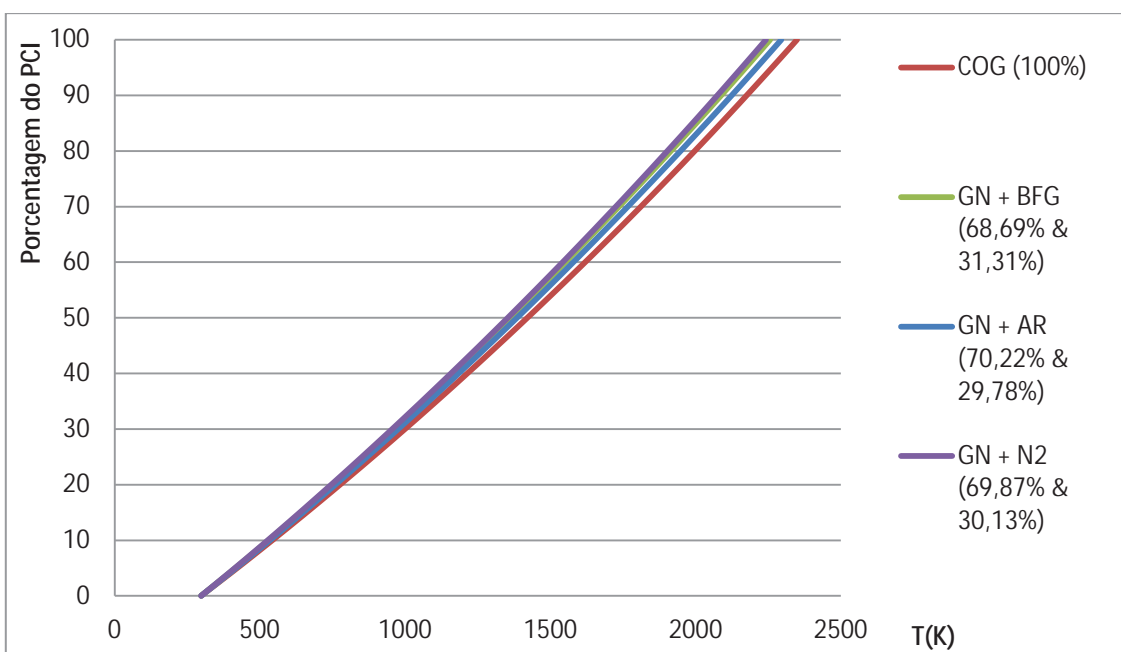


Figura 14 - Curva da porcentagem do PCI cedido aos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência COG.

Variando a temperatura de operação, avaliam-se as diferenças entre os Índices de Wobbes alternativos, os resultados são apresentados na Figura 15.

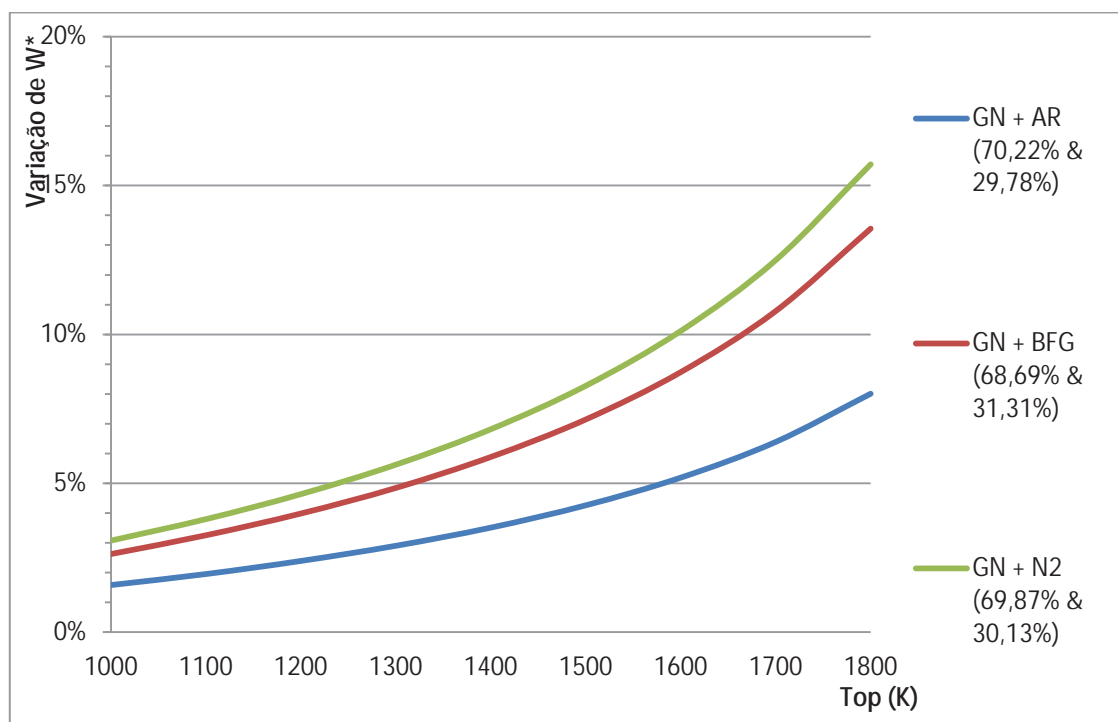


Figura 15 - Diferenças dos Índices de Wobbe Alternativo em função da temperatura de operação, gás de referência COG.

Na segunda análise, foi considerado o gás misto como gás de referência. Este gás é comumente utilizado em fornos de reaquecimento de placas (CAPUTO, 2009). A composição deste gás é 56% de COG e 44% de BFG, ele possui um poder calorífico de 11.955 kJ/Nm^3 (2.860 kcal/Nm^3) e um Índice de Wobbe de 14.689 kJ/Nm^3 (3.514 kcal/Nm^3). No presente estudo, considerou-se a substituição do gás misto pelas seguintes misturas: GN (34,30%) + AR (64,70%); GN (34,94%) + N₂ (65,06%); GN (22,14%) + LDG (77,86%); GN (30,50%) + BFG (69,50%). Assim, como foi feito para as misturas para o COG, apresentam-se as curvas de entalpia em função da temperatura de operação e da porcentagem do PCI em função da temperatura de operação nas Figura 16 e Figura 17.

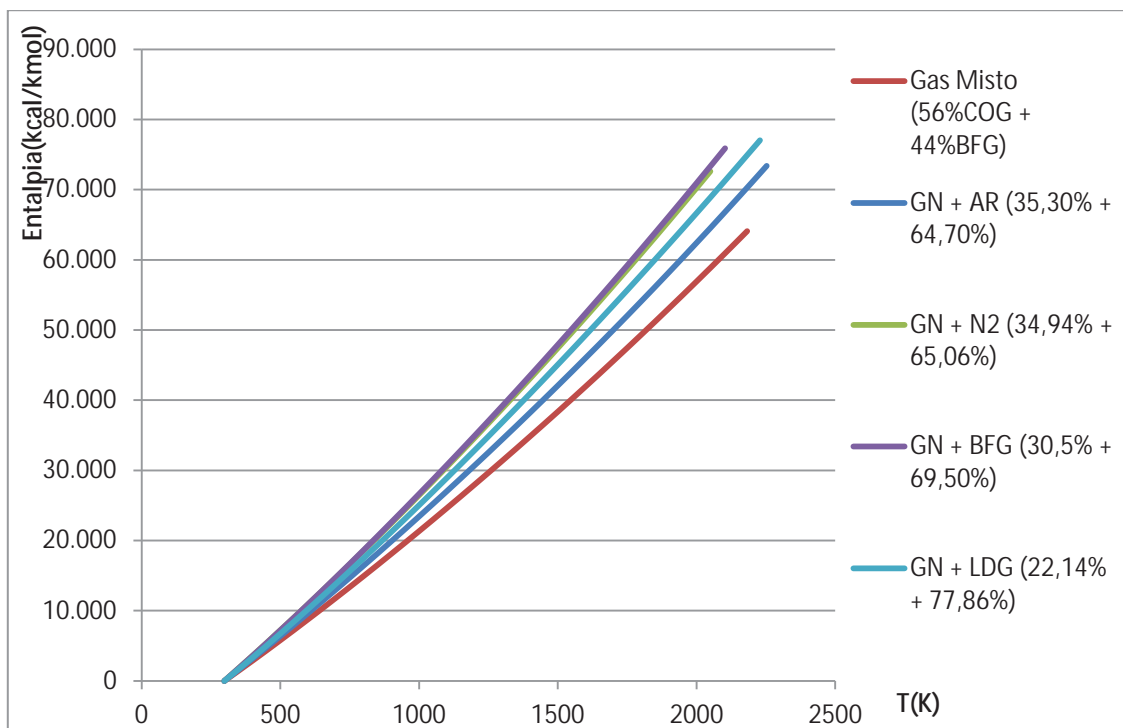


Figura 16 - Curva da entalpia dos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência Gás Misto.

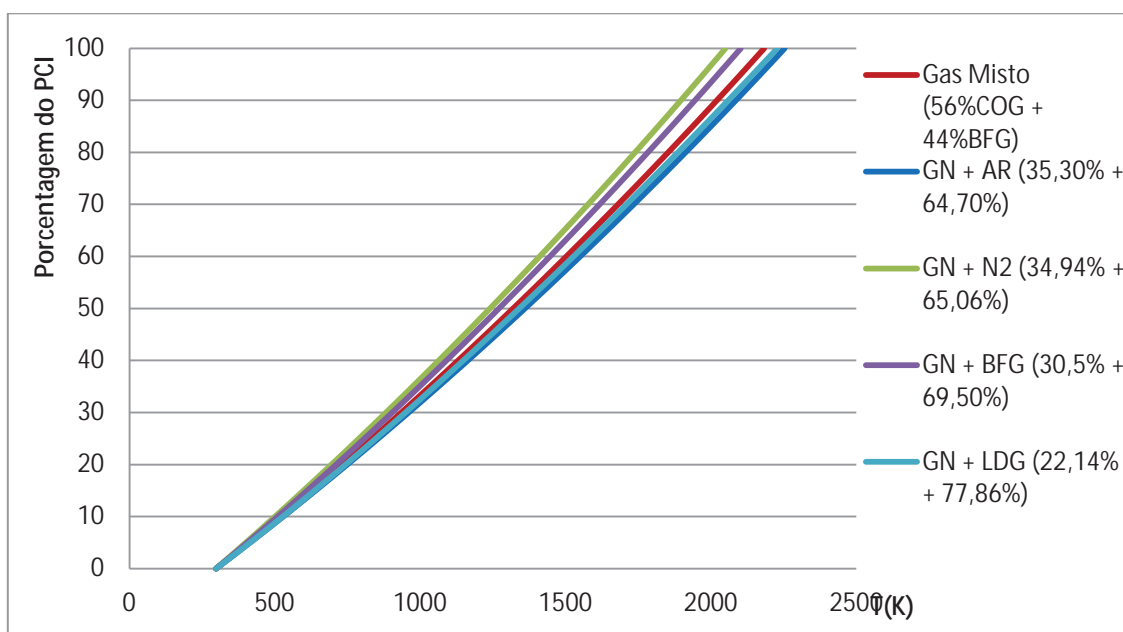


Figura 17 - Curva da porcentagem do PCI cedido aos gases de combustão em função da temperatura de operação, gás de referência Gás Misto.

Ao variar a temperatura, avaliam-se as diferenças entre os valores do Índice de Wobbe Alternativo das misturas para o Índice de Wobbe Alternativo do gás de referência, o que é apresentado na Figura 18.

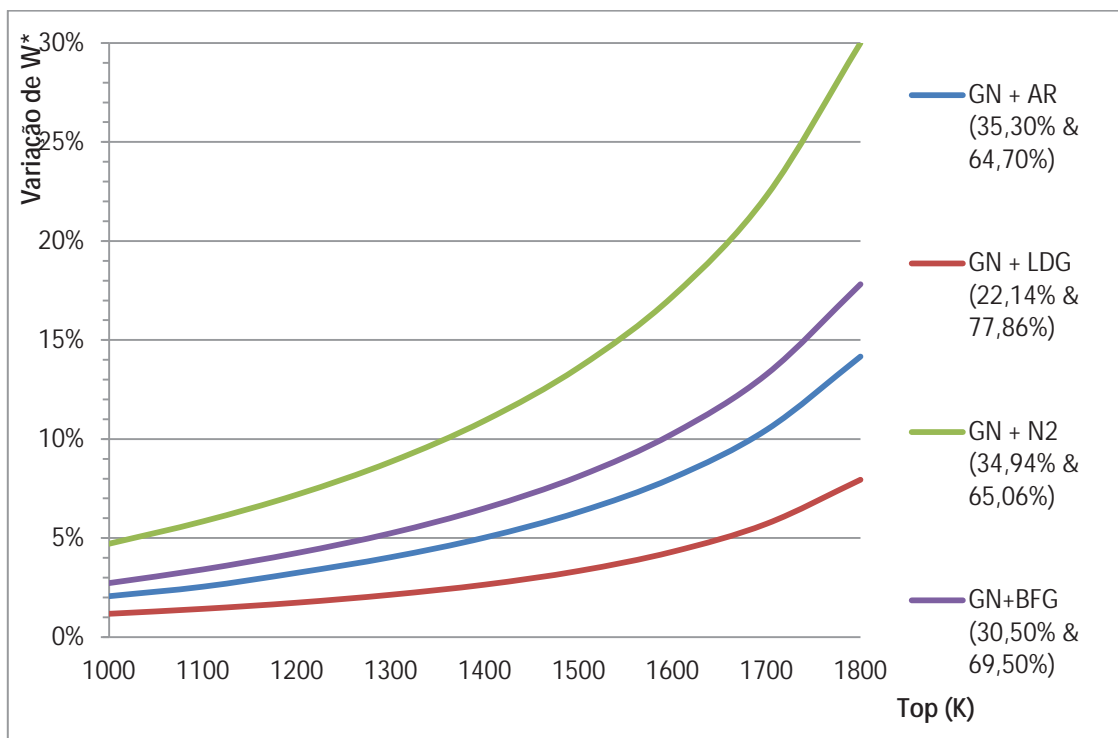


Figura 18 - Diferenças dos Índice de Wobbe Alternativo em função da temperatura de operação, gás de referência Gás Misto.

As Figuras 13 e 16 apresentam diferenças nas curvas de entalpia dos gases formados no processo de combustão, muito embora as diferenças entre as temperaturas de chama adiabática não sejam significativas. As Figuras 14 e 17 possuem um caráter diferente: o objetivo delas foi avaliar a porcentagem do poder calorífico que é perdida em função da temperatura de operação do processo. O intuito dessas figuras foi observar o quanto as curvas se distanciam quando normalizadas pelo PCI.

Por fim, as Figuras 15 e 18 tem o objetivo de mostrar no detalhe as diferenças das energias deixadas no processo. Nelas é observado claramente que tem-se desde pequenas diferenças para os Índices de Wobbe Alternativos, da ordem de 3% a 5%, que fornecem resultados satisfatórios, até diferenças consideráveis, da ordem de 16 a 30%, que são inaceitáveis.

Outra diferença entre o Índice de Wobbe tradicional e esta nova formulação é com relação ao excesso de ar. Quando se emprega PCIs (ou PCSs, dependendo da região do

estudo) retirado de tabelas termodinâmicas não há consideração do excesso de ar, pois este é calculado considerando a situação estequiométrica sem excesso de ar. Já no estudo presente, como ocorre a necessidade de estudar a composição do gás da combustão, o excesso de ar torna-se indispensável. Logo, revela-se uma outra vantagem do uso dessa nova formulação.

Ao verificar pequenas diferenças no Índice de Wobbe, é possível reverter esta diferença pelo ajuste fino do processo de combustão. O Método do Índice de Wobbe permite uma variação de $\pm 5\%$ para que a intercambiabilidade seja possível.

Porém, para situações em que a diferença é muito grande, a intercambiabilidade não é possível. Este trabalho foi motivado pela reclamação de operadores de fornos que não conseguiam ajustar o forno para gases de mesmo Índice de Wobbe, se as diferenças nos PCI's desses gases forem consideráveis.

Com o novo Índice de Wobbe, há um direcionamento mais correto ao valor da mistura desejada e, assim, pode-se aumentar drasticamente o alcance dos estudos de intercambiabilidade, vetando misturas originalmente permitidas, modificando a composição do gás substituto de maneira que a substituição seja a ideal.

5. Conclusões

Este estudo teve a finalidade de apresentar uma nova proposta para o Índice de Wobbe, alterando um conceito do mesmo, no qual se deixa de utilizar o PCI (ou o PCS) dos combustíveis, passando a utilizar a energia fornecida no processo.

Nas análises foram consideradas diversas misturas com mesmo Índice de Wobbe, e, a partir destas, foram realizadas variações nas temperaturas de operação, obtendo, assim, as diferenças entre os Índices de Wobbe Alternativos. Para baixas temperaturas, da ordem de 1000 K, foram obtidos valores próximos entre si. Porém, para altas temperaturas, 1500 a 1800 K, estes valores já divergiram, chegando a 30% de diferença.

Esta análise permite concluir que este novo conceito para o Índice de Wobbe tem forte evidência de que apresentará resultados melhores na prática do que o Índice de Wobbe tradicional. Desta forma, aumentará o entendimento do que vem a ser intercambiabilidade dos gases.

A partir deste novo conceito, sugere-se que, sempre que ao realizar um estudo de intercambiabilidade, que além do Índice de Wobbe Tradicional seja também considerado o Índice de Wobbe Alternativo, especialmente em aplicações com temperaturas de operação superiores a 1500 K.

O presente estudo pode ser estendido para os casos de pré-aquecimento do ar de combustão. Sugere-se também a continuação do estudo para duas novas vertentes. A primeira delas refere-se ao estudo do equipamento como um todo, levando em conta o transporte do fluido no qual exige a avaliação das diferentes perdas de carga. A segunda refere-se a um novo índice de Wobbe, o índice que trabalha com exergias. Deste modo passa-se a considerar outras perdas de energia que até o presente estudo eram desprezadas.

6. Referências Bibliográficas

CAPUTO, P.D.; **Utilização de Syngas em Substituição a Combustíveis Gasosos em Processos Siderúrgicos**, *Dissertação de Mestrado*, UNESP, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Campus de Guaratinguetá, 2009.

CARVALHO, J.A.; **Estudo da Substituição de Gás de Coqueria (COG) por Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) ou por Gás Natural (GN) na Composição do Gás Misto para Queima em Fornos de Reaquecimento de Placas da USIMINAS**, *Relatório*, 2009.

CARVALHO, J.A.; MCQUAY, M.Q., **Princípios de Combustão Aplicada**, Editora da UFSC, Florianópolis, 2007.

GARCIA, R., **Combustíveis e Combustão Industrial**, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.

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*, 87, 3687-3693, 2008a.

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*, 87, 297-303, 2008b.

LEE, C-H; HWANG, C-H, **An Experimental study on the Flame Stability of LFG and LFG-mixed Fuels**, *Fuel*, 86, 649-655, 2007.

LOUBAR, K.; RAHMOUNI, C.; LE CORRE, O.; TAZEROUT, M., **A Combustionless Determination Method for Combustion Properties of Natural Gases**, *Fuel*, 86, 2535-2544, 2007.

MALENSHEK, M.; OLSEN, D.B., **Methane Number Testing of Alternative Gaseous Fuels**, *Fuel*, doi:10.1016/j.fuel.2008.08.020, in press, 2008.

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*, 89, 1255-1261, 2008.

MOURÃO, M.B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C.A.S.; TAKANO, C.; QUITES, E.E.C.Q.; GENTILE, E.F.; SILVA, G.F.B.L.; BOLOTA, J.R.; GONÇALVES, M.; FACO, R.J.; **Introdução à Siderurgia**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007.

MULLER, C.J.; CRAIG, I. K.; RICKER, N. L.; **Modelling, validation, and control of an industrial fuel gas blending system**, *Journal of Process Control*, 852-860, 2011.

SLATER, C.; MAEDER, T.; RYSER, P.; **Portable LTCC gas viscosimeter for determining Wobbe Number**, *Procedia Engineering*, 307-310, 2010.

VAN WYLLEN, G.J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.E.; **Fundamentos da Termodinâmica**, Tradução da sexta edição inglesa, Blucher, São Paulo, 2003.

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*, 32, 1235-1245, 2007.