

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
FACULDADE DE ENGENHARIA

**EMANUEL FERREIRA E SOUSA**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE  
POLUENTES NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Juiz de Fora

2017

**EMANUEL FERREIRA E SOUSA**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE  
POLUENTES NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à FACULDADE DE ENGENHARIA da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Washington Orlando Irrazabal Bohorquez

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SOUSA, EMANUEL FERREIRA E.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE POLU-  
ENTES NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA / EMANUEL FERREIRA E  
SOUSA. – 2017.

81 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Washington Orlando Irrazabal Bohorquez  
Bacharel em Engenharia Mecânica. – UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
JUIZ DE FORA, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
E MECÂNICA. FACULDADE DE ENGENHARIA, 2017.

1.Eficiência Energética. 2.Indústria Siderúrgica. 3. Alto Forno. 4.Redu-  
ção de Poluentes. 5.Cogeração. I. Bohorquez, Washigton Orlando Irrazabal,  
orient. II. Título.

EMANUEL FERREIRA E SOUSA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DA EMISSÃO DE  
POLUENTES NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à FACULDADE DE ENGENHARIA da Uni-  
versidade Federal de Juiz de Fora, como re-  
quisito parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Washington Orlando Irrazabal Bohorquez  
Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me possibilitar desenvolver este trabalho.

À minha família, pelo incentivo e apoio incondicional nos estudos e nas decisões da vida.

Aos professores que se dedicaram a me ensinar tudo o que sei até hoje, em especial ao meu orientador, Professor Washington.

Aos meus amigos da Engenharia Mecânica, por estarem comigo ao longo destes cinco anos de batalhas diárias.

”Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”  
(Aldo Novak)

## RESUMO

Os processos realizados para a produção de aço adotados pelas usinas siderúrgicas consistem de intensas transferências de calor que fornecem grande quantidade de energia necessária para garantir a eficiência de todo o sistema. Dentre os principais potenciais energéticos existentes na usina, os altos fornos são um setor de destaque não só pela importância de iniciar todo o processo produtivo, mas principalmente pelas intensas reações termodinâmicas que são realizadas em seu funcionamento para obter a fusão dos minérios que resultarão no gusa líquido. Entretanto, diferentemente do que se possa parecer, o processo realizado para fundir os minérios que abastecem os altos fornos passa por um complexo sistema que envolve altas temperaturas, necessárias para o pré-aquecimento dos gases de combustão, e principalmente altas pressões de entrada no equipamento. Com isso, este trabalho consiste em uma análise das condições de queima dos gases presentes neste processo, verificando os parâmetros ideais para obtenção de melhor eficiência energética. Assim, foram utilizados neste trabalho ferramentas computacionais que a partir da variação na pressão de entrada dos gases, das concentrações de cada tipo de gás no processo e da razão de equivalência adotada geram gráficos que relacionam esses valores com a temperatura adiabática e a velocidade de queima dos gases em questão. Outro ponto importante a ser ressaltado neste trabalho é a introdução ao sistema de cogeração, definido como um processo de produção de reutilização combinada de calor e eletricidade, uma vez que esta prática é bastante empregada nas usinas siderúrgicas visando reaproveitar o poder calorífico dos gases que seriam despejados na atmosfera para potencializar o aquecimento em outros setores da usina. Foi feita uma análise dos principais pontos de implantação da cogeração, destacando como esse sistema utiliza gases de escape como fonte de energia térmica e, além disso, para fim de uma contextualização geral, foi feita uma apresentação simplificada do esquema de funcionamento de uma indústria siderúrgica visando não só o conhecimento do processo produtivo do aço como um todo, mas principalmente para a identificação dos setores citados anteriormente, quais são as áreas em que a cogeração já é implantada, quais são os benefícios que ela acarreta e se há algum outro ponto que seria interessante a instalação do sistema.

Palavras-chave: Eficiência energética; Indústria siderúrgica; Alto forno; Redução de poluentes; Cogeração.

## ABSTRACT

The steelmaking processes adopted by the metallurgical plants consist of intense heat transfers that provide a large amount of energy necessary to guarantee the efficiency of the whole system. Among the main energy potentials in the plant, blast furnaces are an important sector not only because of the importance of starting the entire production process, but mainly due to the intense thermodynamic reactions that are carried out in its operation to obtain the melting of the ores that will result in the pig iron liquid. However, unlike what it may seem, the process performed to melt the ore supplying the blast furnace passes through a complex system involving high temperatures required for the preheating of the flue gases, and especially high inlet pressures in the equipment. Thus, the hot air generated by the burning of the coal added to the high rates of incoming pressure will result in the melting of the ore. Thus, this work consists of a case study that will analyze the ideal conditions for burning the gases present in this process, verifying the ideal conditions for obtaining better energy efficiency. In order to do so, computational programs will be used which, based on the variation in the gas inlet pressure, the concentrations of each type of gas in the process and the adopted equivalence ratio, will be generated graphs that relate these values to the adiabatic temperature and the burning rate of the gases in question. Another important point to be emphasized in this work is the introduction to the cogeneration system, defined as a production process of combined reuse of heat and electricity. Since this practice is widely used in steel mills, in order to reuse the calorific value of the gases that would be discharged into the atmosphere to boost heating in other sectors of the plant, an analysis will be made of the feasibility of implementing cogeneration with regard to both the reduction of pollutants for installation in systems using these gases as a source of thermal energy. In addition, for a general contextualization, a simplified presentation of the operating scheme of a steel industry will be made, aiming at not only the knowledge of the production process of the steel as a whole, but mainly for the identification of the sectors mentioned above, which are the areas where cogeneration is already in place, what are the benefits it entails and if there is any other point that would be interesting to install the system.

Key-words: Energy efficiency; Metallurgical industry; Blast furnace; Reduction of pollutants; Cogeneration.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista Aérea dos Altos Fornos [1] . . . . .	22
Figura 2 – Forno Elétrico a Arco [1] . . . . .	23
Figura 3 – Lingotamento Contínuo na Aciaria [1] . . . . .	24
Figura 4 – Passagem do tarugo pelas gaiolas ao ser laminado [1] . . . . .	25
Figura 5 – Esquema básico de funcionamento de um alto forno [1] . . . . .	27
Figura 6 – Esquema do entrada e saída de gases do alto forno, com destaque para os glendons e o soprador[1] . . . . .	28
Figura 7 – Relação da temperatura de chama com a temperatura do ar de sopro[4]	29
Figura 8 – Economia anual de oxigênio em função do aumento de temperatura do ar de sopro.[5] . . . . .	29
Figura 9 – Temperatura do ar na saída e temperatura da câmara de combustão.[6]	30
Figura 10 – Relação das reações ocorridas com as zonas de redução do Alto Forno.[1]	31
Figura 11 – Tela característica da interface gráfica do software CHEMKIM [8] . . .	35
Figura 12 – Tela característica da interface gráfica do software CANTERA [9] . . .	36
Figura 13 – Representação do comportamento da temperatura de chama adiabática em função do excesso de oxidante ( $\alpha$ )[10] . . . . .	37
Figura 14 – Combustões adiabáticas a volume e a pressão constante [27] . . . . .	40
Figura 15 – Representação de um frente de chama se deslocando com velocidade $S_L$ sobre uma massa estacionária de reagentes.[10] . . . . .	42
Figura 16 – Representação da frente de chama estabelecida e do perfil de velocidade na saída de um queimador laminar.[10] . . . . .	43
Figura 17 – Representação da velocidade de chama para aproximação de formato plano.[10] . . . . .	43
Figura 18 – Perfil de temperatura assumido para a solução da equação 4.41 [10] . .	47
Figura 19 – Temperatura do ar de sopro na saída do Glendon em função da tempe- ratura de entrada [3] . . . . .	51
Figura 20 – Tarugos sendo aquecidos no interior do forno.[19] . . . . .	59
Figura 21 – Esquema de aquecimento dos gases de entrada do alto forno [18]. . . .	61
Figura 22 – Valores médios dos custos de produção de ferro gusa.[3] . . . . .	61
Figura 23 – Temperatura adiabática de chama x Razão de equivalência. Fonte:Autor	64
Figura 24 – Fração molar de CO x Razão de equivalência. Fonte:Autor . . . . .	65
Figura 25 – Fração molar de CO <sub>2</sub> x Razão de equivalência. Fonte:Autor . . . . .	66
Figura 26 – Fração molar de NO x Razão de equivalência. Fonte:Autor . . . . .	67
Figura 27 – Fração molar de NO <sub>2</sub> x Razão de equivalência. Fonte:Autor . . . . .	67
Figura 28 – Velocidade de chama (em km/h) x Razão de equivalência. Fonte:Autor	68
Figura 29 – Velocidade de chama (em m/s) x Razão de equivalência. Fonte:Autor .	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades padrão do carvão vegetal para o processo de combustão [26]	34
Tabela 2 – Dados característicos de alguns elementos do processo.[27]	40
Tabela 3 – Razões estequiométricas $s$ e fração de massa de combustível para combustão estequiométrica [16]	54
Tabela 4 – Intervalo de razão de equivalência atingido a partir das premissas adotadas. Fonte: Autor	55
Tabela 5 – Medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa na siderurgia [17]	57
Tabela 6 – Características térmicas para cada tipo de combustível em um forno de reaquecimento[21]	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FEA	Forno Elétrico a Arco
FRT	Forno de reaquecimento de tarugos
GAF	Gás de alto forno
ICP	Injeção de Carvão Pulverizado
MLC	Máquina de lingotamento contínuo
MP	Material particulado
NA	Não se aplica
TCA	Temperatura de chama adiabática
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras latinas

A	Área de seção transversal do volume de controle
$c_p$	calor específico a pressão constante
cm/s	centímetro por segundo
C	Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
°C	Graus Celsius
D	Difusividade mássica
FeO	Monóxido de ferro
Fe	Ferro
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Tetróxido de triferro (magnetita)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro III (hematita)
FO	Relação combustível/oxidante (base molar)
HC	Hidrocarbonetos
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
$h_{f,i}^0$	Entalpia de formação
$h_{s,i}$	Entalpia sensível
$h_i$	Entalpia absoluta
$h_{L,F}$	Calor latente de vaporização de combustível
H	Variação de entalpia

$H_R$	Entalpia dos reagentes
$H_{PR}$	Entalpia de combustão
$H_P$	Entalpia dos produtos
J	Joule
$\kappa$	Condutividade térmica
K	Kelvin
Kcal	Quilocaloria
Kg	Quilograma
KJ	Quilo Joule
Le	Número de Lewis
m	Metro
mg	Miligrama
Mn	Manganês
MnO	Óxido de manganês
$M_W$	Peso atômico de um constituinte em uma mistura
$m_{fi}$	Fração mássica de cada espécie em uma mistura
$m_{ox}$	Massa de oxidante
$m_F$	Massa de combustível
$m_i$	Massa de um constituinte em uma mistura
$\dot{m}_i''$	Fluxo de massa
$\dot{m}_i'''$	Taxa volumétrica de produção de massa de determinada espécie i
N	Newton
N	Nitrogênio
NO	Óxido de nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrogênio
$N_R$	Número de mols dos reagentes

$N_P$	Número de mols dos produtos
$N_i$	Número de mols de um constituinte em uma mistura
$N_t$	Número de mols total
OF	Relação oxidante/combustível (base molar)
P	Fósforo
P2O5	Pentóxido de fósforo
PC	Poder calorífico dos combustíveis
Q	Calor trocado no processo
R	Constante universal dos gases
rpm	Rotações por minuto
S	Estequiométrico
Si	Silício
SiO2	Dióxido de silício
Sl	Velocidade de chama
Ta	Temperatura abiabática
$T_{\bar{n}}$	Temperatura dos gases não queimados
$T_q$	Temperatura dos gases queimados
t/c	Tonelada de aço por corrida
$V_u$	Velocidade unidimensional da chama
$X_i$	Fração molar de um constituinte em uma mistura
$X_{iBS}$	Fração molar a base seca
W	Watt
$Y_F$	Fração mássica de combustível

### Letras gregas

$\alpha$	Difusividade térmica
$\delta$	Espessura de chama

$\Delta$	Taxa de variação
$\lambda$	Razão relativa ar/combustível
$\nu_{\tilde{n}}$	Velocidade dos gases não queimados
$\phi$	Razão de equivalência
$\rho$	Massa específica
$\rho_{\tilde{n}}$	Densidade dos gases não queimados

### **Subscritos**

BS	Base seca
f	Formação
F	Combustível
i	Espécie qualquer constituinte de um mistura
L	Latente
$\tilde{n}$	Não queimado
ox	Oxidante
P	Produtos
p	Pressão
q	Queimado
R	Reagentes
s	Sensível
t	Total
u	Unidimensional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	16
1.2	JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO . . . . .	16
1.3	OBJETIVOS . . . . .	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>22</b>
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO - O PROCESSO PRODUTIVO DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA . . . . .	22
3.2	O ALTO FORNO . . . . .	25
3.3	ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO . . . . .	26
3.4	ANÁLISE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DO ALTO FORNO . .	26
3.5	REAÇÕES PRESENTES NO PROCESSO . . . . .	29
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO NUMÉRICA . . . . .</b>	<b>35</b>
4.1	FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA . . . . .	35
4.2	DEFINIÇÃO E APLICAÇÃO DO PROJETO . . . . .	36
4.3	FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO . . . . .	37
4.3.1	TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA . . . . .	38
4.3.2	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA CHAMA . . . . .	42
4.4	PARÂMETROS UTILIZADOS . . . . .	50
4.5	A RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA . . . . .	52
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO . . . . .</b>	<b>56</b>
5.1	REDUÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES - COGERAÇÃO . . . . .	56
5.2	A COGERAÇÃO APLICADA NA SIDERURGIA . . . . .	58
5.2.1	FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS . . . . .	58
5.2.2	AQUECIMENTO DOS GASES DE ENTRADA DO ALTO FORNO . .	60
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>63</b>
6.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .	63
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES . . . . .</b>	<b>71</b>
7.1	COMENTÁRIOS . . . . .	71
7.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	72



REFERÊNCIAS . . . . .	73
APÊNDICE A - Características Operacionais dos Altos Fornos	75
APÊNDICE B - Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas . . . . .	76
ANEXO A - Temperatura adiabática de chama - Código utilizado na linguagem PYTHON . . . . .	77
ANEXO B - Resultados obtidos para a combustão de diferentes elementos . . . . .	78
ANEXO C - Termo de Autenticidade . . . . .	80

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em meio a um processo produtivo bastante complexo como é em uma indústria siderúrgica, a análise da combustão que ocorre nos altos fornos bem como o detalhamento das reações dos gases presentes neste processo passam despercebidos em um estudo mais aprofundado sobre o assunto. Entretanto, a partir do momento que a combinação ideal entre a quantidade de gases reagentes e a pressão em que eles são admitidos passa a afetar na temperatura máxima de combustão e na velocidade em que a chama irá se propagar, essa proposta se torna cada vez mais válida. Além disso, os produtos gerados pela combustão também são de extrema importância, uma vez que, os gases provenientes do alto forno, em especial o monóxido de carbono (CO), tem um poder calorífico extremamente útil para o processo produtivo da indústria, sendo usado, inclusive, no próprio alto forno como forma de aquecimento dos gases de entrada, além de ser empregado em outras áreas, com esse mesmo princípio de potencialização térmica, uma vez que, por mais eficiente que seja um gerador térmico, a maior parte da energia contida no combustível usado para o seu acionamento é transformada em calor e perdida para o ambiente [9]. Com isso, ao introduzir a cogeração nos processos siderúrgicos, busca-se obter o aproveitamento de mais de setenta por cento do poder calorífico dos combustíveis utilizados em seu processo.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO

Estudar como a temperatura e a velocidade de propagação de cada gás presente no processo de combustão do alto forno interfere no ciclo produtivo do equipamento é de suma importância por estarem diretamente ligados com a produtividade do setor, uma vez que, o aumento de dez por cento na velocidade dos gases de combustão gera um acréscimo de 18 graus na temperatura do ar de sopro na saída dos glêndons, sugerindo que o aumento da transferência de calor por convecção pode ser uma alternativa viável para o aumento da eficiência energética[3]. Pode-se perceber também que a importância dos reagentes presentes na combustão vai além da otimização da produção, visando uma queima mais eficiente, uma vez que o reaproveitamento dos gases gerados produz uma fonte de energia confiável, com baixo custo, ficando a unidade industrial cada vez menos dependente da qualidade do fornecimento do distribuidor de energia. Assim, essa pesquisa se torna ainda mais importante no que se refere ao fato de trabalhar com o aumento da produtividade visando um ciclo de reutilização do potencial energético através da cogeração do poder calorífico dos gases envolvidos.

### 1.3 OBJETIVOS

A proposta do presente trabalho é realizar simulações a respeito do processo de combustão de um alto forno a partir do conhecimento adquirido no período de estágio em uma usina siderúrgica. Dessa forma, é possível fazer uma verificação da eficiência do modelo computacional, verificando ainda como este processo está associado à cogeração implantada em uma usina siderúrgica. Separando os objetivos do trabalho em dois grupos tem-se:

1. Objetivos gerais:

- a) Estudar o processo de combustão de um alto forno.
- b) Analisar os principais parâmetros que estão ligados à uma melhor eficiência do processo.

2. Objetivos específicos:

- a) Realizar ensaios computacionais que simulem o funcionamento deste sistema a partir das condições impostas ao processo.
- b) Traçar curvas relacionando a temperatura adiabática de chama, a velocidade de propagação e a relação ar/combustível presente na combustão.
- c) Verificar os níveis de emissões que estão sendo gerados.
- d) Demonstrar como os gases de escape podem ser incorporados nos sistemas de cogeração da usina.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de conclusão de curso foi estruturado em 6 capítulos segundo a seguinte descrição:

**CAPÍTULO 1:** O primeiro capítulo apresenta a introdução, as justificativas e motivações deste tema, os objetivos a serem alcançados e uma breve descrição da estrutura do trabalho.

**CAPÍTULO 2:** Apresenta a revisão bibliográfica de alguns estudos teóricos a respeito dos altos fornos e de uma usina siderúrgica como um todo, destacando as premissas adotadas e as recomendações sobre a simulação numérica que será aplicada para descrever o processo de combustão inserido no equipamento.

**CAPÍTULO 3:** Neste capítulo são apresentados os princípios gerais de funcionamento de uma indústria siderúrgica relacionados com este trabalho, enfatizando principalmente o esquema de funcionamento de um alto forno. Faz-se uma descrição dos

principais conceitos empregados no sistema, assim como uma análise prévia do processo de combustão apresentando, inclusive, as principais reações envolvidas.

CAPÍTULO 4: São apresentados os aspectos gerais e fundamentos da combustão essenciais para a realização da simulação numérica, com destaque especial à termoquímica e à cinética química envolvida no processo, que se faz presente no modelo de cálculo da velocidade de propagação da chama e da temperatura adiabática da mesma. Após introduzir esses conceitos, apresenta-se a metodologia de execução, as ferramentas computacionais utilizadas para a realização do trabalho e principalmente os parâmetros reais de operação de um alto forno a carvão vegetal.

CAPÍTULO 5: Neste quarto capítulo é feito um estudo de caso das atuais condições de aplicação da cogeração numa indústria siderúrgica, destacando quais são os principais pontos da usina na qual o sistema é aplicado, assim como o método de reaproveitamento de parte dos gases de escape dos altos forno para que esse processo possa ser executado. Além disso, é feita uma análise da quantidade de emissões que é realizada por um alto forno, assim como a quantidade de emissões que se pode evitar com o emprego da cogeração, analisando a viabilidade técnica de implantação da mesma e os ganhos energéticos obtidos.

CAPÍTULO 6: Neste capítulo são discutidos e analisados os resultados obtidos da simulação numérica, avaliando como os valores obtidos para a temperatura adiabática e para a velocidade de propagação de chama podem interferir no processo, permitindo saber ainda que tipo de gás está sendo emitido, sua concentração e se está dentro do permitido por questões ambientais. Consequentemente são apresentados gráficos que descrevem toda essa análise.

CAPÍTULO 7: No capítulo sete são apresentados os comentários relacionados com o presente estudo de eficiência energética na siderurgia, assim como algumas sugestões para próximos trabalhos que possam ser realizados, relacionadas com este tema de dissertação.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão literária técnica que aborda o tema da eficiência energética na siderurgia, com ênfase em conceitos relacionados ao processo de combustão de um alto forno, pode-se observar a análise de três aspectos principais comum à maioria dos artigos e livros especializados no assunto: o estudo do esquema de funcionamento de um alto forno, uma análise aprofundada do processo de combustão que ocorre no mesmo e avaliação do menor impacto ambiental gerado pela diminuição da emissão de poluentes decorrentes do processo. A seguir apresenta-se uma visão básica resumida dos artigos e livros pesquisados para a realização do presente trabalho de conclusão de curso.

No estudo das etapas dos processos de fabricação que fazem parte de uma usina siderúrgica, além do sistema de tratamento térmico e superficial dos metais e ligas metálicas, em especial o aço, [14] faz uma descrição detalhada a respeito do sistema de produção dos altos fornos, como é o procedimento operacional no qual o aço líquido é submetido e como são os processos realizados posteriormente, sendo a laminação o de maior destaque neste caso.

Ainda com relação ao parágrafo anterior, [2] apresenta um completo estudo sobre siderurgia dando um importante destaque ao processo de obtenção do gusa líquido, o que conseqüentemente, fez com que fosse elaborado um detalhado esquema de apresentação do processo de funcionamento de um alto forno, de onde foram extraídos, dentre outras informações, quais são os gases presentes na zona de combustão e que são responsáveis pela redução do minério, parâmetro este que é de extrema importância para o desenvolvimento deste estudo.

A análise de pontos que possam influenciar em aspectos referentes à otimização do processo também merecem uma atenção especial neste estudo, com isso, [3] faz uma análise termodinâmica de alguns fatores que podem influenciar na otimização do funcionamento de um alto forno, principalmente no que se refere à temperatura adiabática de chama e velocidade de queima dos gases, fazendo uma analogia direta de como esses parâmetros estão correlacionados a equipamentos como o soprador e os glendons, essenciais para o sistema de combustão.

Outro ponto importante neste projeto refere-se ao processo termoquímico decorrente em um alto forno, principalmente devido às reações ocasionadas pelos elementos presentes no processo de combustão. [7] faz um completo estudo sobre a siderurgia especialmente no que se refere aos processos químicos presentes além de realizar um detalhamento especial do processo de combustão dos altos fornos, apresentando a sequência de reações químicas ocorridas desde o contato entre o ar quente injetado e o carvão, até a redução completa do minério de ferro, mostrando em qual setor do equipamento é realizada cada reação, sendo de extrema importância para identificação dos gases presentes no processo.

Com relação aos fundamentos de combustão a realização da simulação numérica, [16] definem os conceitos práticos e teóricos da combustão, apresentam a metodologia utilizada para a definição da razão de equivalência aplicada para o desenvolvimento das simulações gráficas, destacando ainda como este parâmetro atua, sua definição dentro do projeto e como pode influenciar na caracterização de um regime de combustão.

Com relação aos parâmetros de projeto que são utilizados, destacam-se o intervalo de temperatura em que o fenômeno ocorre e a pressão na qual a combustão é realizada. Com isso, [12] destacam a importância destes parâmetros para alcançar a máxima otimização do processo, apresentando um estudo completo dos fundamentos da combustão como um todo, desde os objetivos principais de um processo combustivo, quais são as exigências para que este processo seja o mais eficiente possível e, acima de tudo, como os parâmetros de entrada podem influenciar no desenvolvimento do processo de combustão.

Os principais resultados gerados por este trabalho passam pela análise gráfica da temperatura adiabática de chama e a velocidade de propagação de chama, entretanto, [10] faz o detalhamento das equações necessárias para a obtenção destes resultados, além de demonstrar os conceitos da termoquímica em geral. Através do balanço de massa e de energia, apresenta ainda quais são as principais aplicações de projetos que envolvem processos de combustão, especialmente no que se refere à aplicação destes dois resultados, destacando ainda qual é a metodologia necessária para encontra-los a partir das condições impostas aos reagentes, podendo descobrir, ao final do processo, a quantidade de energia térmica que está sendo liberada pelos produtos da combustão.

Com relação à eficiência energética associada à redução de poluentes [17], faz um estudo completo a respeito da análise da sustentabilidade da siderurgia brasileira, com foco em parâmetros de eficiência de produção, apresentando as principais tecnologias e processos promotores de eficiência energética e redução de emissões, bem como oportunidades e perspectivas de apoio à adoção dessas tecnologias pelas indústrias em geral.

Além da temperatura adiabática e da velocidade de propagação de chama, as simulações numéricas realizadas tem como objetivo apresentar a concentração de vários gases presentes como produtos da combustão. [20], faz uma descrição de um dos principais pontos da usina siderúrgica onde a cogeração pode ser implantada, que é o forno de reaquecimento de tarugos, na laminação, sendo que parte dos gases presentes no aquecimento deste forno é oriundo do processo de combustão do alto forno (em especial o CO). A partir daí, elabora-se uma metodologia própria para minimização do custo energético gasto neste forno, que conseqüentemente trabalha com os mesmos propósitos requeridos neste trabalho, visto que ambos buscam a maior eficiência energética possível para o sistema, mesmo que adotem metodologias diferentes para alcançá-la.

Como forma de complementação dos estudos, um ponto final a ser analisado refere-se às emissões de poluentes geradas pela siderurgia, quais são as normas de gestão ambiental

adotadas para este tipo de usina e quais os limites aceitável de emissões [22]. Dentre os gases presentes nos produtos de combustão está incluído o CO<sub>2</sub>, cuja concentração também espera-se obter no final das simulações, visando identificar se as emissões estão de acordo com os limites apresentados por [22].

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO - O PROCESSO PRODUTIVO DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

O processo de fabricação do aço é composto por uma série de transformações das matérias primas utilizadas, referente tanto ao ponto de vista térmico do material quanto do formato que este vai adquirindo no decorrer da produção, sendo necessárias temperaturas muito elevadas para que o produto possa ser trabalhado e conseqüentemente uma série de aparelhos capazes de manter certa durabilidade em tais condições. Assim, uma indústria siderúrgica se divide basicamente em três grandes áreas de produção:

- Alto forno: É um equipamento metalúrgico destinado à fusão redutora do minério de ferro. De funcionamento contínuo, é constituído de um recinto único e caracteriza-se pelo fato de que, em funcionamento, fica em contato com a carga e os gases, gerando reações entre eles.



Figura 1 – Vista Aérea dos Altos Fornos [1]

É de grande importância para o processo produtivo de uma siderúrgica por realizar a fusão inicial do minério, que será fundamental nos processos posteriores, uma vez que, na aciaria (outra área de produção que será abordada a seguir), por exemplo, o gusa líquido consegue proporcionar excelente eficiência ao processo de derretimento da sucata



simplesmente pelo fato de já estar com elevadas temperaturas conseguido transferir parte dessa energia térmica para o material que será fundido, gerando boa economia ao processo. Por isso, empresas deste ramo que não possuem um alto forno instalado em sua linha de produção fatalmente necessitam de uma maior demanda de energia elétrica no derretimento da sucata.

Em várias siderúrgicas são instalados mais de um alto forno, intensificando ainda mais a produção. Por isso, as constantes trocas de calor que devem ocorrer durante todo o processo são potencializadas pela atuação de um soprador, que tem por objetivo controlar a vazão de ar quente que entra no recinto para que possam ocorrer as reações de combustão, dando início à fusão do minério de ferro. Esse soprador é considerado por muitos como o coração do alto forno e terá grande importância neste estudo pelo fato de influenciar diretamente na pressão do aparelho, que é um parâmetro fundamental para a análise.

- **Aciaria:** Neste setor da usina, o gusa líquido descarregado pelo alto forno é transportado até outro equipamento muito importante na siderurgia, o Forno Elétrico a Arco, Figura 3, que é o grande consumidor energético da usina, sendo capaz de consumir mais energia do que a cidade de Juiz de Fora inteira. Daí explica-se a importância dos altos fornos, como foi abordado anteriormente, uma vez que a presença do gusa líquido reduz drasticamente a quantidade de energia gasta pelo FEA para o derretimento da sucata. A mistura obtida é encaminhada a outro forno, chamado forno panela, onde o principal



Figura 2 – Forno Elétrico a Arco [1]

objetivo é realizar uma pré-análise do aço para que, posteriormente, sejam inseridos os

aditivos necessários para se obter o tipo de material que se deseja. Quando esta mistura está completa, o aço líquido é encaminhado à máquina de lingotamento contínuo, Figura 4, com o intuito de dar origem aos tarugos de aço. Quando os tarugos adquirem o formato desejado, seguem pra a próxima área de produção para serem laminados.



Figura 3 – Lingotamento Contínuo na Aciaria [1]

- **Laminação:** Nesta área da empresa, os tarugos provenientes da aciaria são novamente aquecidos em um FRT (forno de reaquecimento de tarugos) que utiliza gases provenientes do alto forno para potencializar seu funcionamento. Esse aquecimento faz com que o tarugo fique “modelável” para que, assim que saia deste forno, passe por máquinas denominadas gaiolas, Figura 5, cuja função é diminuir gradativamente a espessura do tarugo até que ele fique com a espessura na dimensão desejada.

Como já foi mencionado, o aproveitamento da energia térmica acumulada no processo é de extrema importância para a eficiência da linha de produção, e na Laminação este fato não é diferente. Nesta área, esta otimização é alcançada com o chamado enforamento a quente, onde os tarugos, ao saírem da máquina de lingotamento contínuo, já são diretamente direcionados ao forno de reaquecimento proporcionando economia e principalmente agilidade na produção, uma vez que o tarugo já se encontrará numa temperatura bem próxima da desejada, diminuindo o tempo de reaquecimento e, conseqüentemente, os gastos gerados para aquecê-los. Entretanto, para que essa prática seja aplicada constantemente, é necessário que a vazão da lingoteira seja suficiente para o carregamento completo do forno, fato este que não é tão simples de acontecer, por isso, o enforamento a frio ainda é o método mais utilizado, mesmo não sendo capaz de aproveitar a alta temperatura dos tarugos.



Figura 4 – Passagem do tarugo pelas gaiolas ao ser laminado [1]

Vale ressaltar que a apresentação do processo produtivo descrito acima foi realizado de forma sucinta, apenas como forma de contextualização do que será abordado posteriormente, uma vez que os questões referentes a processos de fabricação não são o intuito principal deste projeto, mas que estão diretamente ligadas à análise do processo de combustão dos altos fornos e da eficiência energética da usina, assuntos estes que serão abordados a seguir.

### 3.2 O ALTO FORNO

O estudo da eficiência energética em uma indústria siderúrgica está diretamente ligada aos altos fornos, uma vez que, ao lado do Forno Elétrico a Arco, são os grandes geradores de potenciais térmicos da usina. Entretanto, a possibilidade de interligação da energia térmica proveniente do FEA com os demais setores produtivos é infinitamente inferior quando comparada a capacidade de cogeração do potencial energético dos altos fornos, ou seja, no forno elétrico a arco, apesar de se consumir uma quantidade de energia exorbitante, ainda não há nenhum projeto instalado que possa converter parte da energia dissipada em algum processo cogrador, podendo ser um tema a ser explorado em trabalhos futuros por profissionais da área elétrica.

Por isso, este estudo é inteiramente voltado para os altos fornos, seu processo de funcionamento no que se refere aos fundamentos da combustão empregados, as reações químicas decorrentes da redução do minério de ferro ao entrar em contato com o poder calorífico do carvão, e também a cogeração realizada com os gases provenientes desta queima.

### 3.3 ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO

O alto-forno é um trocador de calor à contracorrente. Os materiais como minério de ferro, pelotas, sinter, coque ou carvão de madeira, e fundente (calcário), são carregados alternadamente, pelo topo do alto-forno através da correia transportadora, aquecendo-se e reduzindo ao contato de uma corrente ascendente de gás redutor quente. Durante o processo de redução (retirada do oxigênio presente no minério de ferro), transformam-se nos seguintes produtos: ferro-gusa, escória, gás de alto-forno e poeira. A redução dos óxidos de ferro se processa à medida que o minério, o agente redutor (carvão ou coque) e os fundentes descem em contracorrente em relação aos gases provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras (aparelhos injetores de ar no forno)[2].

Através do sistema de carregamento, carvão vegetal e matérias primas ferrosas são distribuídas no interior do forno e, enquanto isto ocorre, os gases aquecidos pelos regeneradores (cuja descrição será feita a seguir) é soprado pelas ventaneiras no setor do equipamento, denominado zona de combustão. Neste local, o carvão pulverizado injetado entra em contato com o ar aquecido gerando gases a elevadas temperaturas. Os gases aquecidos que sobem pelo alto forno, em contato com a carga metálica que desce, entram em reação proporcionando a fusão desta carga, que se torna pastosa, originando o ferro gusa e escória, que são vazados por furos localizados na base do alto forno. O ferro gusa vazado é conduzido por materiais refratários, na região chamada “casa de corrida”, até ser levado para a aciaria, com o auxílio de pontes rolantes e máquinas próprias para o serviço. A escória é separada do gusa por diferença de densidade e conduzida por outros canais até os granuladores de escória, mas esta já não está mais ligada ao processo de produção.

Os principais pontos destacados com relação ao princípio de funcionamento de um alto forno são apresentados de conforme a Figura 6.

### 3.4 ANÁLISE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DO ALTO FORNO

Quando queremos analisar o processo de combustão decorrente de algum sistema, existe uma série de parâmetros que devem ser levados em consideração, e nos altos fornos não é diferente. Para que o modelo proposto de oxirredução do minério de ferro seja desempenhado rigorosamente como projetado, a combustão que ocorre no equipamento deve estar alinhada com a temperatura interna, a pressão de entrada dos gases pré-aquecidos, além dos combustíveis e oxidantes envolvidos. Por isso, estes quatro parâmetros serão a base da simulação numérica que será realizada posteriormente.

Assim, retomando ao processo de combustão propriamente dito de um alto forno, é necessário ressaltar a importância de dois equipamentos essenciais para a análise da temperatura e pressão desejada que são, respectivamente, os glendons e o soprador,

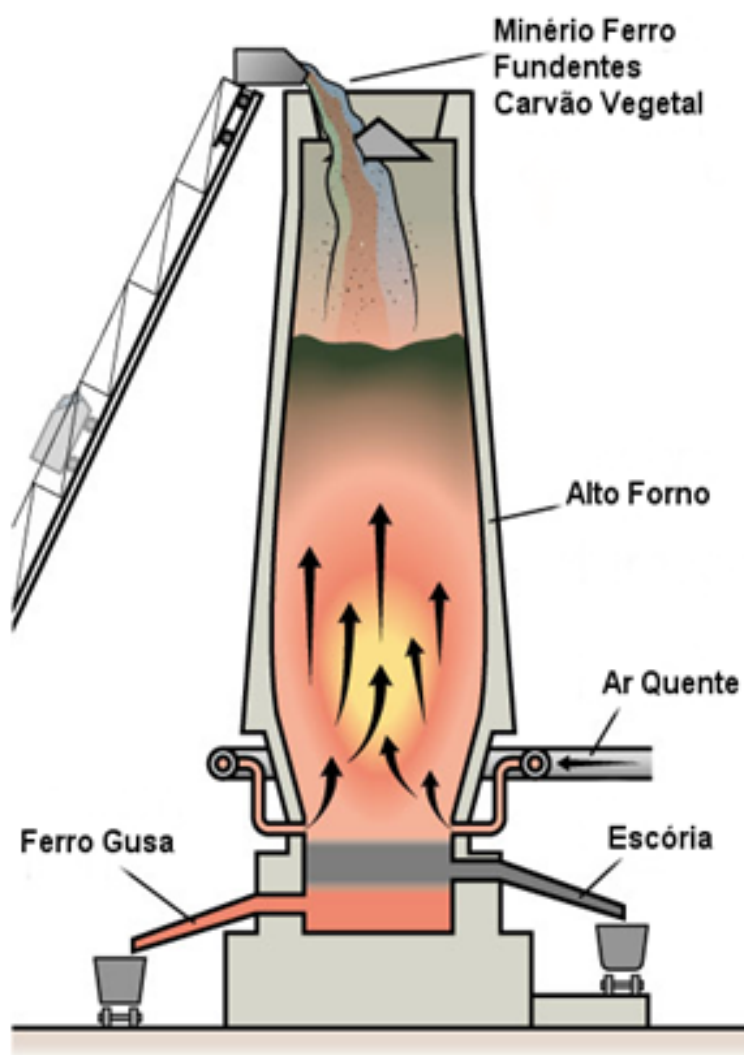


Figura 5 – Esquema básico de funcionamento de um alto forno [1]

apresentados na Figura 7.

**Glendon Siderúrgico:** é um equipamento que tem como propósito aquecer o ar que é injetado no interior do alto-forno a temperaturas requeridas pelo processo de redução do minério de ferro. É um tipo de trocador de calor que consiste em câmaras refratárias, onde ocorre a passagem de gases provenientes do topo do alto forno, num sistema de cogeração que será apresentado no decorrer deste trabalho.

É constituído basicamente de fileiras de tubulações de ferro fundido, interligadas por canais, ou de tubulações de aço inox. Na parte externa destes equipamentos, o gás de alto-forno é queimado com ar, aquecendo o sistema, fazendo com que o ar frio soprado, ao passar por dentro dessas garrafas ou tubulações, aumente enormemente sua temperatura.

No processo dos altos-fornos, quanto maior a temperatura de chama mais fácil é a injeção de combustíveis auxiliares, como finos de carvão, maior a produtividade e menores

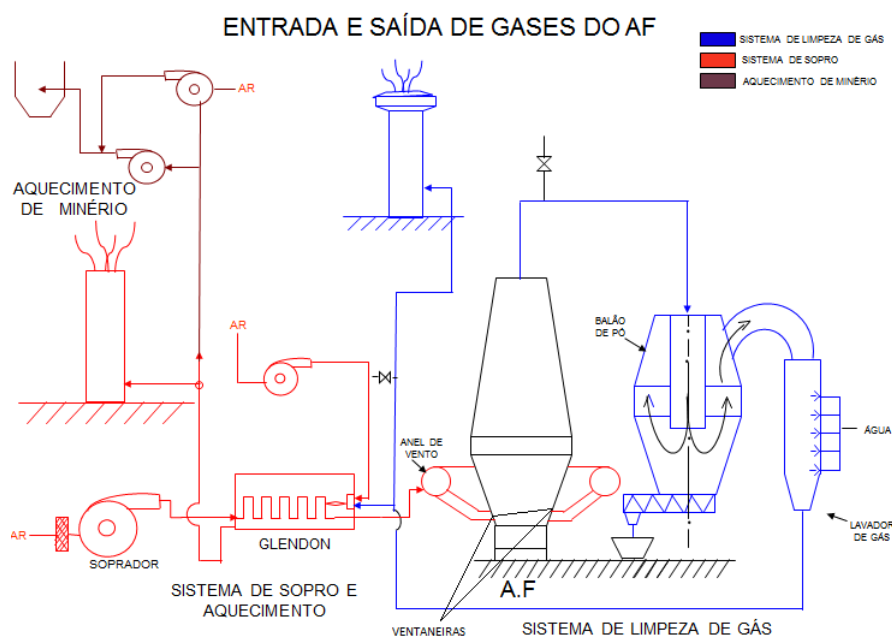


Figura 6 – Esquema do entrada e saída de gases do alto forno, com destaque para os glendons e o soprador[1]

são os consumos específicos de ar de sopro e de carvão vegetal, sendo que o custo deste último representa a maior parte dos custos totais de insumos na produção do ferro gusa nos altos fornos.[3]

**Soprador:** Se o ar necessário à combustão fosse introduzido pelas ventaneiras do alto-forno à temperatura ambiente, uma maior quantidade de combustível, neste caso carvão vegetal, seria gasta para gerar o calor necessário para que estes gases atingissem a temperatura da região de queima, conforme apresentado na Figura 8. Utilizando-se uma parte dos gases de topo do alto-forno para aquecer o ar, antes de soprá-lo pelas ventaneiras, obtém-se uma considerável economia de combustível sólido (carvão vegetal).[24]

Como já foi relatado anteriormente, as ventaneiras tem um papel fundamental na zona de combustão do alto forno, por isso, quanto maior o número deste equipamento, melhor será o recobrimento desta zona. As ventaneiras propriamente ditas são aparelhos de cobre eletrolítico de formato cônico e refrigerada a água recirculada, podendo avançar alguns centímetros para o interior do forno, entretanto, o grande responsável por impor uma alta pressão ao ar de entrada é o soprador; este nada mais é que um motor elétrico que trabalha a rotações superiores a 3500 rpm fazendo com que os gases pré aquecidos nos glendons, a temperaturas da ordem de 500°C a 1200 °C, sejam introduzidos no alto forno com o auxílio das ventaneiras. Por isso, devido à sua importância no sistema de produção e pelo fato de controlar um parâmetro essencial para o processo, o soprador é considerado por muitos como o coração do alto forno.

As Figuras 9 e 10 apresentam alguns dados de como estes equipamentos podem



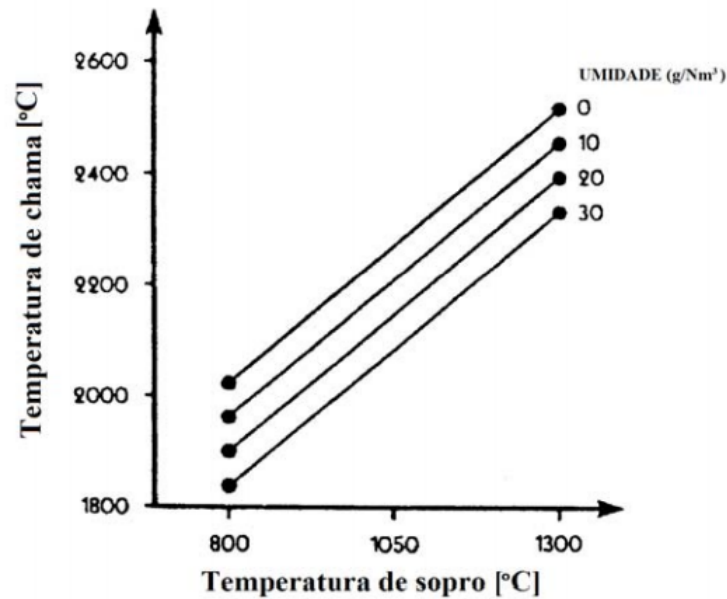


Figura 7 – Relação da temperatura de chama com a temperatura do ar de sopro[4]

influenciar na eficiência do processo:

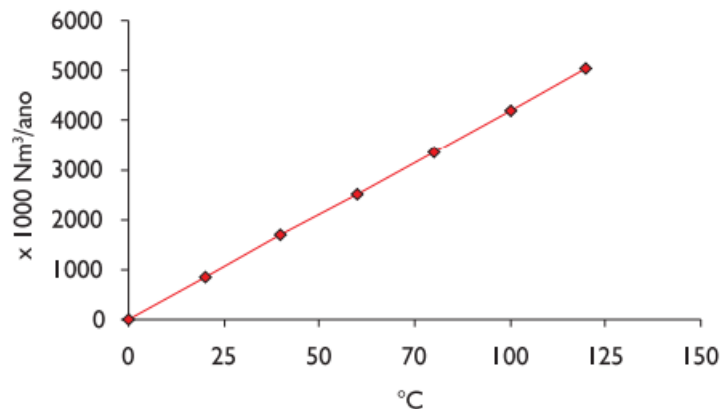


Figura 8 – Economia anual de oxigênio em função do aumento de temperatura do ar de sopro.[5]

### 3.5 REAÇÕES PRESENTES NO PROCESSO

Como já foi ressaltado, é necessário um intenso processo de oxirredução para a completa fusão do minério de ferro, sendo que este processo já se inicia imediatamente a partir do momento em que o material entra no topo do alto forno, passando pela “zona granular”, onde as reações começam a ocorrer. Posteriormente, ao atingir a “zona de amolecimento e fusão”, já é possível notar o começo de uma mudança de fase do material, uma vez que, ao entrar nessa fase, ele rapidamente alcança temperaturas em torno de 1000°C e estas prevalecem por toda a etapa, mas sem ocorrer redução de minério. Com isso, somente ao atingir o último estágio, chamado de zona de combustão, é que o material

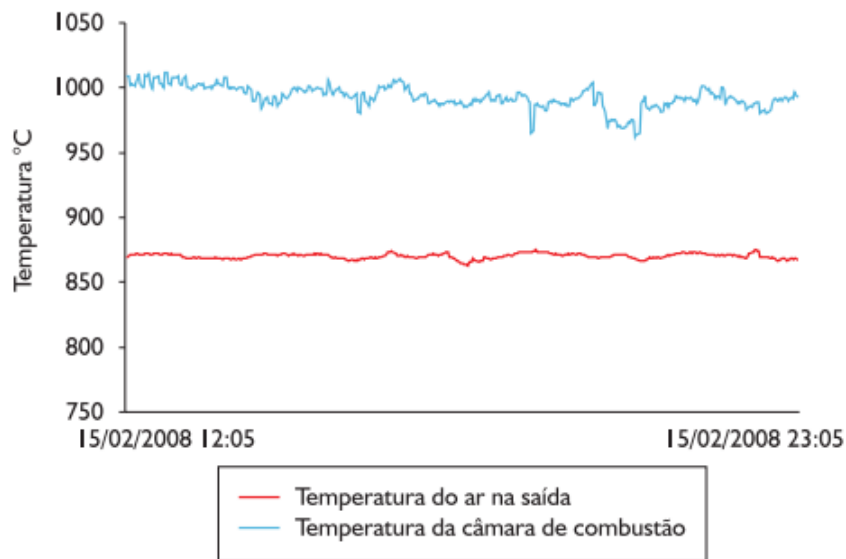


Figura 9 – Temperatura do ar na saída e temperatura da câmara de combustão.[6]

sofrerá uma redução direta, ficando em torno dos 1400 °C, ocasionando a fusão do mesmo e gerando gusa líquido e escória. Um resumo deste processo é descrito pela Figura 11.

O principal método de redução é através de reações entre o minério e os gases provenientes da queima do carvão. Os minérios mais ricos podem ser adicionados diretamente ao forno em forma de caroço enquanto os minérios mais magros geralmente requerem maior concentração. A aglomeração dos minérios ou concentrações produzirá taxas de produção mais eficientes.[7].

O oxigênio do ar que é injetado preaquecido pelas ventaneiras reage com o carbono do combustível (carvão ou coque), gerando uma grande quantidade de calor para o processo e ainda, gases compostos principalmente por CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>.

As reações entre estes componentes são descritas a seguir:



Aproximadamente a 1 metro do nível das ventaneiras já não haverá mais oxigênio, e o gás estará formado integralmente de CO<sub>2</sub> que, em contato com o carbono incandescente, forma o CO. Assim:



Em resumo, a reação que ocorre frente às ventaneiras pode ser representada pela reação:





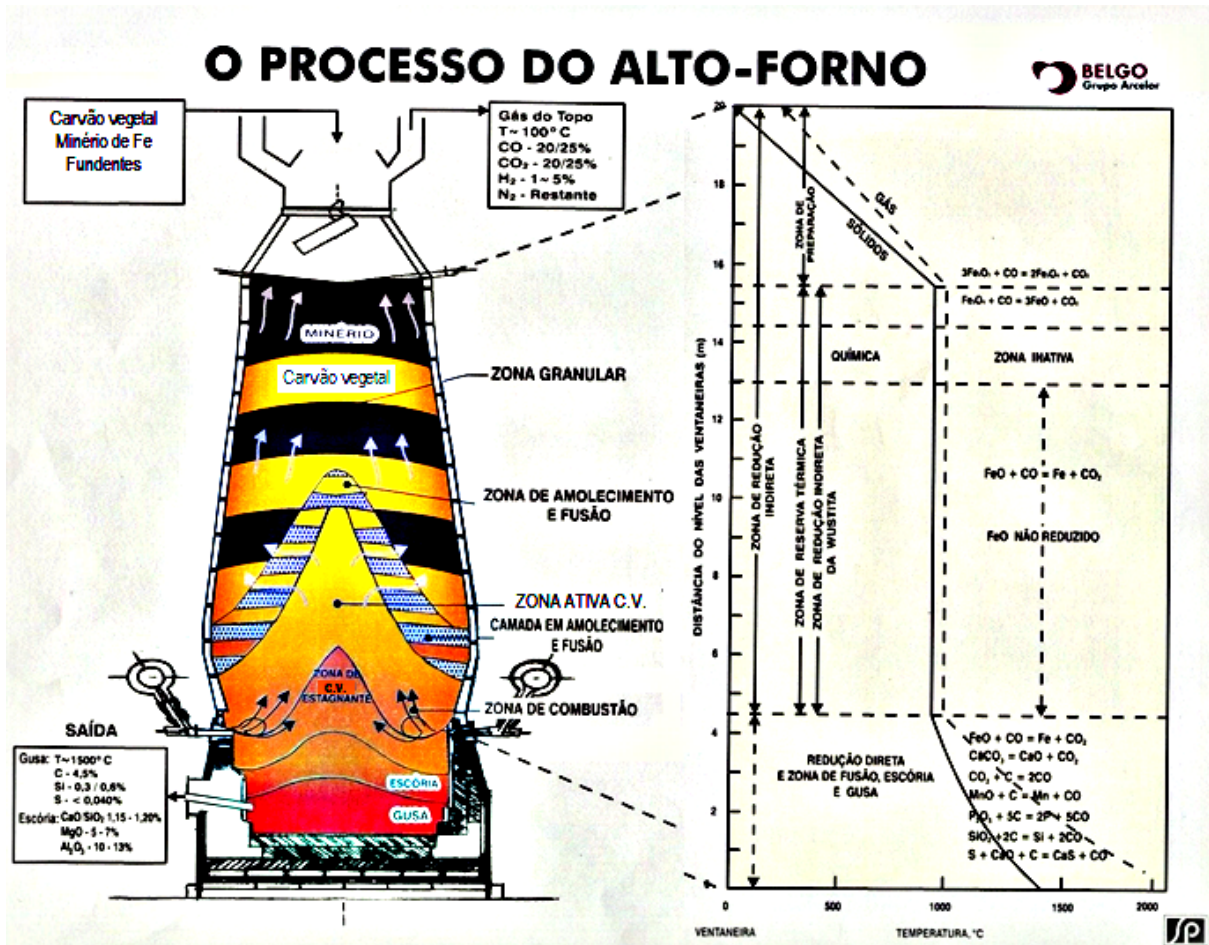
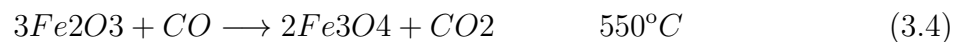


Figura 10 – Relação das reações ocorridas com as zonas de redução do Alto Forno.[1]

Em sua marcha ascendente através do forno o (CO) reage com os óxidos de ferro segundo as reações indiretas:



Acima de  $1070^\circ C$  a redução dos óxidos de ferro é concluída pelo carbono sólido incandescente, segundo as reações: [7]





A 800°C começa a decomposição do calcário, segundo a reação:



A cal reage com a pequena parte dos óxidos de ferro e manganês não reduzidos para começar a formar a escória; o ferro reduzido absorve carbono, baixando seu ponto de fusão.[2]

A partir de 1200° C inicia-se a redução dos óxidos de manganês, de silício e de fósforo, reagindo com o carbono:



Acima de 1260° C, os óxidos de cálcio, de alumínio e de silício, unem-se para formar a escória. Em temperaturas superiores a 1350° C, tem início a fusão de todos os compostos da carga, com exceção do carvão vegetal. A 1550° C, já na zona de combustão, o oxigênio e o vapor de água do ar soprado combinam-se com o C do carvão vegetal para formar hidrogênio e monóxido de carbono:



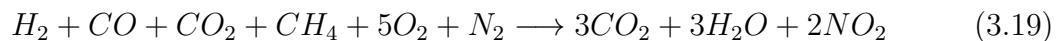
Além disso, outro ponto de destaque são as reações formadoras de metano, decorrentes quando o processo atinge altas pressões, porém com temperaturas ainda não tão elevadas. São reações a parte, chamadas de reação de metanação, transformando gás em metano, gerando gás com alto poder calorífico.





Esta última é uma reação catalítica de formação do metano (a partir do CO e do H<sub>2</sub>), e por ser a reação entre os dois gases a cinética química da reação é muito lenta, sendo necessário, em alguns casos, a adição de compostos de níquel e ferro para que a velocidade da reação seja aumentada. É uma reação exotérmica, ao contrário da reação  $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$ , que é endotérmica.

De acordo das reações descritas anteriormente e partindo do princípio que o processo é regido por uma combustão completa, tem-se que o fenômeno é descrito pela seguinte reação, que será a equação geral do sistema:



É importante destacar que para que essa sequência de reações seja desenvolvida da maneira mais eficiente possível, é imprescindível que o carvão vegetal utilizado no processo seja de boa qualidade, para que, além de manter suas propriedades físicas, possa ter o menor índice de umidade possível, uma vez que este fato interfere fortemente na operação. Algumas propriedades do carvão vegetal são listadas de acordo com a Tabela 1.

Além disso, um carvão de boa qualidade deve [24]:

- Ser inodoro;
- Ser duro;
- Apresentar ruído metálico ao ser quebrado;
- Ser resistente à abrasão, não se transformando em finos de carvão vegetal;
- Possuir a superfície de quebra com formato curvo, ser lisa, mostrar a estrutura da madeira e não deixar aderências;
- Queimar sem desprendimento de fumaça, cheiro ou fagulhas;
- Estar isento de pedras, terra, cinzas e outras impurezas.

Outras propriedades do carvão vegetal são listadas de acordo com a Tabela 1.

Ainda com relação a este parâmetro, uma atividade que vem sendo cada vez mais difundida nas siderúrgicas pelo fato de proporcionar um aumento considerável no poder calorífico do carvão é a "Injeção de Carvão Pulverizado"(ICP). Entretanto, se não houver uma adaptação do processo como um todo, esse sistema pode causar efeitos indesejáveis, como a má distribuição da carga no interior do alto forno, fazendo com que haja um aumento do fluxo periférico dos gases gerando uma queima ineficiente do carvão.

<b>PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL</b>	
Carbono fixo	68 - 75 %
Matérias Voláteis	14 - 16%
Cinzas	3 - 5 %
Umidade média (varia entre 10 e 30 %)	10%
Densidade aparente: (base seca)	150 - 300 kg/m <sup>3</sup>
Poder calorífico inferior	28.469 - 30.144 kJ/kg (6.800 - 7.200 kcal/kg)
Resistência à compressão	30 - 40 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura de ignição	240 - 250°C
Porosidade	70 - 75 %
Tamanho médio	43 mm

Tabela 1 – Propriedades padrão do carvão vegetal para o processo de combustão [26]

Entretanto, conhecendo os fatores que influenciam nessa queda de produtividade, a injeção do carvão pulverizado passa a funcionar como o esperado e os efeitos imediatos disso são o aumento da temperatura dos gases de topo e o aumento do nível térmico do alto-forno, elevando a taxa de gotejamento de material líquido.

Outro ponto de destaque está relacionado a formação de H<sub>2</sub>, importante gás do processo, onde o carvão pulverizado, pelo fato de possuir uma grande quantidade de materiais voláteis, é rico em H<sub>2</sub>. Esse gás participa, portanto, das reações de redução da carga metálica e o efeito dessa participação está relacionado com um menor consumo específico de carbono.

## 4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A temperatura adiabática de chama e a velocidade de queima constituem dois dos parâmetros mais importantes no processo de liberação de energia térmica na queima de um combustível. Com base nos fundamentos da cinética química, nas equações de conservação e chamas pré-misturadas pode-se observar que a variação da temperatura adiabática ( $T_a$ ) e da velocidade de queima ( $SL$ ) estão diretamente ligadas a pressão e a temperatura dos reagentes envolvidos. Além disso, outro parâmetro que será importante na elaboração das curvas características dos gases presentes no processo é a razão de equivalência, sendo este um parâmetro que merece um destaque especial e será detalhado posteriormente.

### 4.1 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Como ferramentas principais na elaboração das curvas desejadas serão utilizados dois softwares especializados em desenvolver questões que envolvem problemas relacionados à cinética química, termoquímica e termodinâmica, sendo estes: CHEMKIM e CANTERA.

1) CHEMKIM : Até 5 vezes mais rápido do que os códigos comerciais e acadêmicos competitivos, CHEMKIN, Figura 12, é uma ferramenta de simulação química robusta e madura que tem sido amplamente utilizada para uma impressionante gama de aplicações. CHEMKIN é uma solução econômica para simulações cinéticas básicas que usam mecanismos de reação reduzidos e detalhados[8]. Neste estudo, será utilizado como software padrão para geração, exclusivamente, dos resultados relacionados à velocidade de propagação da chama.

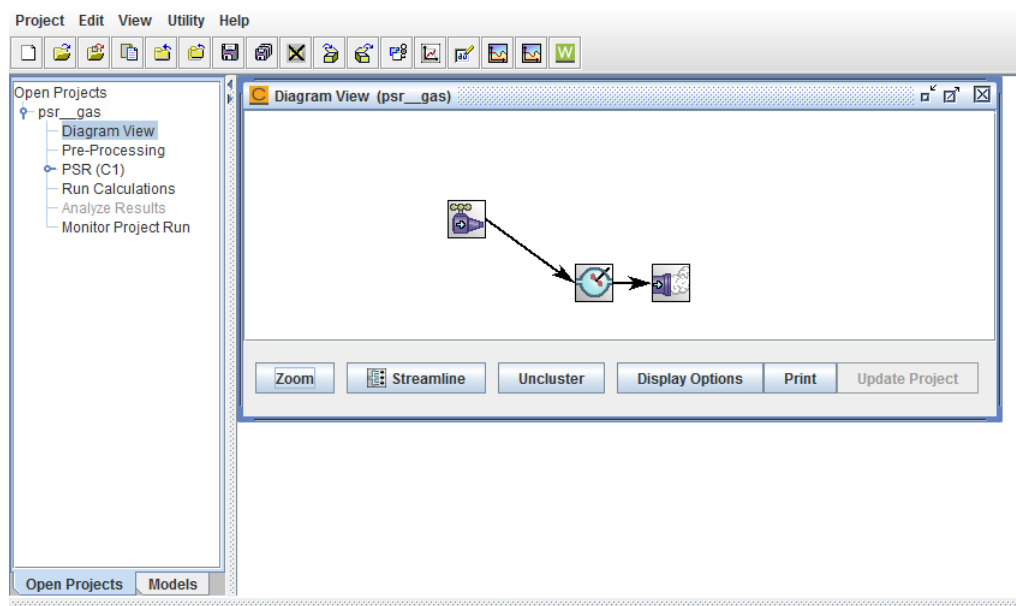


Figura 11 – Tela característica da interface gráfica do software CHEMKIM [8]

2) CANTERA : é um conjunto de ferramentas de software orientadas a objetos para problemas envolvendo cinética química, termodinâmica e/ou processos de transporte. Cantera, Figura 13, fornece tipos (ou classes) de objetos que representam fases da matéria, interfaces entre essas fases, gerentes de reação, redes de reator dependentes do tempo e fluxos de reação unidimensionais estáveis. É atualmente usado para aplicações que incluem combustão, detonações, conversão e armazenamento de energia eletroquímica, células de combustível, baterias, soluções aquosas de eletrólitos, plasmas e deposição de filmes finos [9], podendo ser usado na linguagem Python e Matlab, ou em aplicações escritas em C++ e Fortran. Utilizando a linguagem Python, neste trabalho estará exclusivamente ligado a geração de curvas características da temperatura adiabática de chama e a concentração dos gases presentes como produtos da combustão.



Figura 12 – Tela característica da interface gráfica do software CANTERA [9]

## 4.2 DEFINIÇÃO E APLICAÇÃO DO PROJETO

Ao analisar graficamente o comportamento dos gases presentes na combustão de um alto forno, pretende-se verificar quais são as condições de queima na qual o processo é submetido no que se refere à temperatura adiabática da chama e a velocidade de queima desses gases. A partir daí será analisada a possibilidade de otimização dos resultados ou a constatação de que os parâmetros empregados são realmente os pontos ótimos do processo e qual o significado destes resultados perante o sistema de operação do alto forno. Tudo isso sem deixar de lado as questões envolvidas na eficiência energética do sistema, assim como a análise de como o emprego adequado destes parâmetros podem influenciar nos custos de produção.

Uma das maiores aplicações do estudo de conservação de energia na termoquímica, ou seja, a aplicação da primeira e da segunda lei da termodinâmica para o processo de combustão, é a obtenção da temperatura de chama adiabática. Nessa situação considera-se que toda energia liberada pelas reações exotérmicas está contida nos produtos de combustão; sendo assim, não há troca de calor com o ambiente ou com a parede da câmara de combustão do alto forno. Portanto, a temperatura de chama adiabática corresponde a maior temperatura que pode ser alcançada nos produtos de combustão, para uma dada condição dos reagentes [10]. A Figura 14 mostra como este parâmetro está correlacionado com a quantidade de combustível presente na reação.

Já o conhecimento de parâmetros de velocidade de chama é útil para a intercambiabilidade dos gases, no sentido de se garantir a estabilidade de combustão em queimadores. Dois fenômenos podem ocorrer em queimadores de gás: o descolamento da chama, quando a velocidade da mistura não queimada é maior que a velocidade de chama, e o retorno de chama, quando a velocidade de chama é maior que a velocidade da mistura ar/combustível. Ambos podem trazer consequências desastrosas aos equipamentos [11].

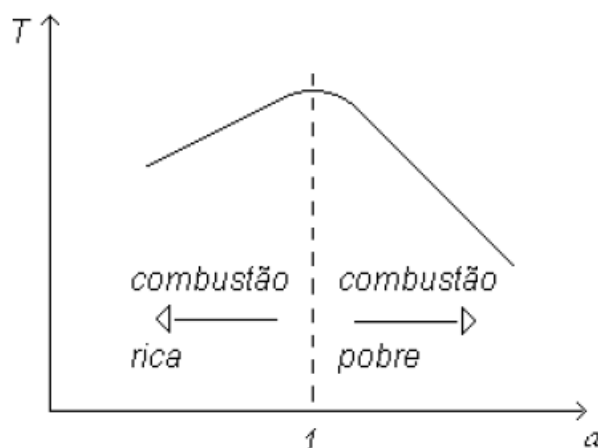


Figura 13 – Representação do comportamento da temperatura de chama adiabática em função do excesso de oxidante ( $\alpha$ )[10]

Além disso, outra aplicação prática do projeto está diretamente ligada ao conhecimento das características dos gases envolvidos no processo, uma vez que, além de poder influenciar nos aspectos relatados anteriormente, ainda poderão ser úteis no projeto de cogeração, ao realizar o reaproveitamento desses gases em outros setores da usina e até mesmo no próprio alto forno, como forma de pré-aquecimento dos gases de entrada.

#### 4.3 FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO

O objetivo principal da combustão é aumentar a temperatura do fluxo de ar através de uma queima eficiente de combustível. Do ponto de vista do design, uma importante exigência é um meio de relacionar a eficiência da combustão com as variáveis de pressão de ar, temperatura, vazão de massa e dimensões do combustor.[12]

No que se refere ao processo de combustão de um alto forno, a vazão de massa de ar está diretamente ligada à pressão de entrada devido ao fato de estarem correlacionados com um único equipamento responsável pelo controle desta variável, que é o soprador (como já foi explicitado anteriormente). Já os aspectos referentes às dimensões do combustor não serão considerados nesse trabalho, uma vez que tange outras áreas da mecânica que não serão abordadas neste momento e, além disso, parte-se do princípio que quanto maior o número de ventaneiras, mais eficiente é a combustão do alto forno, sendo que, para aumentar esse número, é necessário um aumento no diâmetro do equipamento como um

todo e, conseqüentemente, dos aparelhos relacionados aos combustores, ou seja, sabe-se que quanto maior o diâmetro do combustor maior serão os resultados provenientes do processo combustivo. Entretanto, uma análise mais detalhada do projeto de elaboração da dimensão desses equipamentos deverá ser considerada em trabalhos futuros.

Tomados esses parâmetros, o processo de combustão é analisado através da termodinâmica e termoquímica, realizando balanços de massa e energia, estando interessado em conhecer o estado inicial e final de um processo além de definir o estado dos reagentes e produtos de condição de equilíbrio [15]. Com isso, os softwares empregados atuarão a partir dos princípios de combustão apresentados levando em consideração todo o processo de cinética química, equações de conservação e equilíbrio químico e termoquímico.

#### 4.3.1 TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA

Basicamente, a temperatura de chama adiabática depende das condições iniciais dos reagentes (pressão e temperatura), da composição dos reagentes, do tipo de processo envolvido (se a pressão ou a volume constante) e da razão de equivalência. Em geral, a máxima temperatura ocorre nas proximidades da condição estequiométrica. Para os processos com excesso de oxidante, utiliza-se parte da energia liberada pelas reações para aquecer o oxidante excedente e, conseqüentemente, a temperatura é mais baixa. Já para a situação com a quantidade de oxidante menor que a estequiométrica, parte das reações exotérmicas, como, por exemplo, a conversão do CO em CO<sub>2</sub>, acaba não ocorrendo e menos energia é liberada, resultando em uma temperatura mais baixa para os produtos de combustão. [10]

A Temperatura Adiabática de Chama é uma abstração, pois nenhum processo real pode ser adiabático, e tanto mais difícil em altas temperaturas, geralmente produzidas em condições de chama. Além disso, a dissociação começa a se fazer sentir em temperaturas acima de 2000 K, e o calor despreendido tende a ser menor que o calculado. De qualquer maneira, o cálculo pode ser útil para efeito de comparação de potenciais de combustíveis para uma dada necessidade de calor e temperatura. Observa-se que, no cálculo da massa de gases produzidos está implícito a relação ar/combustível, pois os produtos de combustão é a soma das massas do ar de combustão e do combustível consumido no processo. A temperatura adiabática de chama pode ser então calculada para uma massa unitária de combustível desde que se estabeleça a relação ar/combustível.[25]

Para o cálculo da temperatura de chama adiabática, será usado, inicialmente, a primeira lei da termodinâmica, descrita na equação a seguir de forma simplificada, onde o calor trocado (Q) através da fronteira de um volume de controle é igual ao trabalho realizado (W) mais a variação de energia interna ( $\Delta U$ ). [10]

$$Q = W + \Delta U = P.\Delta V + \Delta U \quad (4.1)$$



Onde  $\Delta V$  é a variação de volume. Escrevendo a entalpia em função da energia interna, tem-se:

$$H = U + P.V \quad (4.2)$$

Com isso:

$$\Delta H = \Delta U + P.\Delta V + V.\Delta P \quad (4.3)$$

Considerando agora um processo a pressão constante:

$$\Delta H = \Delta U + P.\Delta V \quad (4.4)$$

Neste caso, a primeira lei da termodinâmica é dada por:

$$Q = \Delta H \quad (4.5)$$

Escrevendo agora a equação de estado para os reagentes e os produtos envolvidos em uma reação:

$$Pr.V = R.Tr. \sum_{R=1}^k Nr \quad (4.6)$$

$$Pp.V = R.Tp. \sum_{P=1}^k Np \quad (4.7)$$

Passando a avaliar a participação da entalpia no processo, tem-se que, a entalpia em base molar de um composto a uma dada temperatura pode ser calculada como [10]:

$$*hi = *hf, i^0 + *\Delta h_{s,1} \Big|_{298}^T \quad (4.8)$$

Alguns dados dos elementos presentes no processo são apresentados de acordo com a Tabela 2.

Sendo que a pressão no final do processo pode ser encontrada através da relação:

$$\frac{Pr}{Tr} = \frac{Pp}{Tp} \quad (4.9)$$

Para análise do processo de combustão neste caso, devem ser feitas algumas considerações para aplicação da 1<sup>o</sup> lei da termodinâmica:

- os reagentes entram na câmara de combustão com temperatura T1;

	M (kg/kmol)	$h_f^\circ$ (kJ/kmol)	$c_p$ (kJ/kmol/K)
O <sub>2</sub> (gás)	31,999	0	29,37
O (gás)	15,9995	249.190	21,91
H <sub>2</sub> (gás)	2,016	0	28,84
H <sub>2</sub> O (liq.)	18,015	-285.820	75,30
H <sub>2</sub> O (vap.)	18,015	-241.830	33,58
C (grafite)	12,011	0	8,53
C (diamante)	12,011	1.900	2,44
C (gás)	12,011	714.990	20,84
CO (gás)	28,011	-110.530	29,14
CO <sub>2</sub> (gás)	44,010	-393.520	37,13
CH <sub>4</sub> (gás)	16,043	-74.870	35,64

Tabela 2 – Dados característicos de alguns elementos do processo.[27]

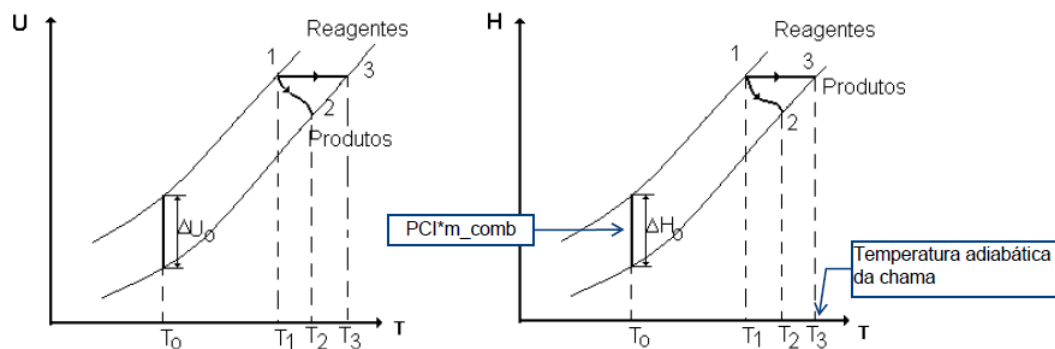
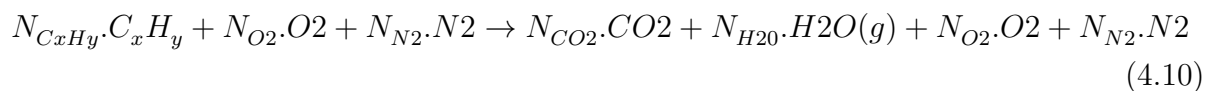


Figura 14 – Combustões adiabáticas a volume e a pressão constante [27]

- esta temperatura deve ser diferente da temperatura para condição padrão (298K);
- os reagentes sofrem um processo de combustão a pressão constante;
- os produtos deixam a câmara com temperatura T2;

Para a situação onde  $N_{C_xH_y}$  mols de um hidrocarboneto qualquer reage com ar, a reação global de combustão, considerando que a água se encontra no estado de vapor, pode ser escrita como[10]:



Escrevendo a primeira lei da termodinâmica para um processo adiabático:

$$HR = HP \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} N_{CxHy} \cdot \left[ *h_{f,CxHy}^0 + *\Delta h_{s,CxHy} \Big|_{298}^{T1} \right] + N_{O2} \left[ *\Delta h_{s,O2} \Big|_{298}^{T1} \right] + N_{N2} \cdot \left[ *\Delta h_{s,N2} \Big|_{298}^{T1} \right] = \\ N_{CO2} \cdot \left[ h_{f,CO2}^0 + *\Delta h_{s,CO2} \Big|_{298}^{T2} \right] + N_{H2Og} \cdot \left[ *h_{f,H2O}^0 + *\Delta h_{s,H2O} \Big|_{298}^{T2} \right] \\ + N_{O2g} \cdot \left[ *\Delta h_{s,O2} \Big|_{298}^{T2} \right] + N_{N2} \cdot \left[ *\Delta h_{s,N2} \Big|_{298}^{T2} \right] \end{aligned} \quad (4.12)$$

Reagrupando a equação anterior:

$$\begin{aligned} N_{CxHy} \cdot *h_{f,CxHy}^0 - N_{CO2} \cdot *h_{f,CO2}^0 - N_{H2Og} \cdot *h_{f,H2Og}^0 = N_{CO2} \cdot h_{s,CO2} \Big|_{298}^{T2} + \\ N_{H2Og} \cdot *\Delta h_{s,H2O} \Big|_{298}^{T2} + N_{N2} \cdot *\Delta h_{s,N2} \Big|_{298}^{T2} + N_{O2g} \cdot *\Delta h_{s,O2} \Big|_{298}^{T2} - N_{CxHy} \cdot *\Delta h_{s,CxHy} \Big|_{298}^{T1} \\ - N_{O2} \cdot *\Delta h_{s,O2} \Big|_{298}^{T1} - N_{N2} \cdot *\Delta h_{s,N2} \Big|_{298}^{T1} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Utilizando-se da relação  $PC = *h_{f,CxHy}^0 - N_{CO2} \cdot *h_{f,CO2}^0 - N_{H2O} \cdot *h_{f,CxHy}^0$  para o lado esquerdo da equação anterior, pode-se escrever a primeira lei da termodinâmica para um processo a pressão constante na forma:

$$N_{CxHy} \cdot PCI_{CxHy} = \sum_{P=1}^K Np \cdot *\Delta h_{s,P} \Big|_{298}^{T2} - \sum_{R=1}^K Nr \cdot *\Delta h_{s,R} \Big|_{298}^{T1} \quad (4.14)$$

Para um processo não adiabático deve-se levar em conta o calor trocado através da fronteira do volume de controle. Para o caso onde os reagentes entram a 298K, sofrem o processo de combustão a pressão constante e os gases trocam calor com a parede da câmara, sendo assim, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita como:

$$N_{CxHy} \cdot PCI_{CxHy} = \sum_{P=1}^K Np \cdot *\Delta h_{s,P} \Big|_{298}^{T2} + Q_W, \quad (4.15)$$

onde  $Q_W$  é o calor trocado com a parede da câmara.

Seguindo o mesmo raciocínio, mas considerando que 10 % da energia liberada pelas reações de combustão é perdida para parede, pode-se escrever:

$$0,9 \cdot N_{CxHy} \cdot PCI_{CxHy} = \sum_{P=1}^K Np \cdot *\Delta h_{s,P} \Big|_{298}^{T2} \quad (4.16)$$

O desprendimento de calor proveniente da reação de combustão pode ser calculado conhecidos o Poder Calorífico do combustível e a taxa de consumo de combustível no

combustor. Se for assumido que todo o calor gerado é transformado em entalpia dos produtos de combustão, sem nenhuma perda de calor por radiação ao ambiente externo (uma situação, na prática, impossível) ou perda de temperatura por dissociação, é possível calcular a Temperatura Adiabática de Chama.[25]

#### 4.3.2 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA CHAMA

A velocidade de deslocamento da chama sobre uma massa de reagentes não queimados é denominada de velocidade de chama ( $S_L$ ), Figura 16. O mesmo raciocínio pode ser empregado para uma chama estabilizada em um queimador; neste caso, a velocidade de chama pode ser definida como a velocidade com que os reagentes entram na zona de reação[10].

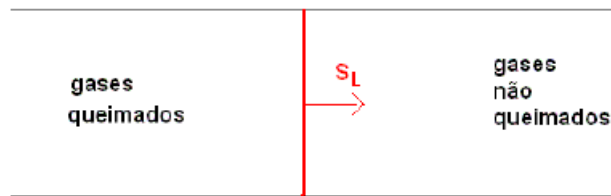


Figura 15 – Representação de um frente de chama se deslocando com velocidade  $S_L$  sobre uma massa estacionária de reagentes.[10]

Para um queimador laminar, a velocidade de saída do gás é baixa próxima à parede e aumenta conforme se aproxima do centro, em um perfil aproximadamente parabólico. Em geral, nos pontos mais internos próximos à saída do queimador, a velocidade do escoamento excede a velocidade de chama. Desta forma, a chama vai se ajustar em um perfil cônico a medida que o jato de gás reduz sua velocidade, onde a velocidade da chama é igual à componente da velocidade do escoamento normal à zona de reação, conforme a Figura 17.

Assumindo um formato plano para frente de chama estabilizada em um queimador, conforme a figura a seguir, a velocidade de chama pode ser descrita de acordo com a Figura 18 [10]:

$$S_l = V_u \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (4.17)$$

A velocidade total do escoamento sobre uma mudança de direção em função do aquecimento dos gases, após a região de chama é descrita por:

$$\frac{\text{tang}\beta}{\text{tang}\alpha} \cong \frac{\rho_{\tilde{n}}}{\rho_q} \quad (4.18)$$

onde os subscritos  $\tilde{n}$  e  $q$  se referem aos gases não queimados (reagentes) e aos queimados (produtos), respectivamente.

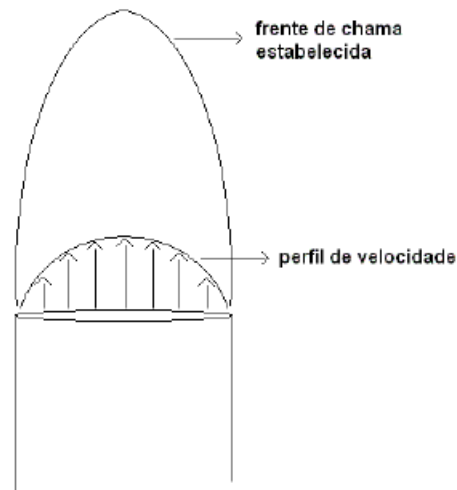


Figura 16 – Representação da frente de chama estabelecida e do perfil de velocidade na saída de um queimador laminar.[10]

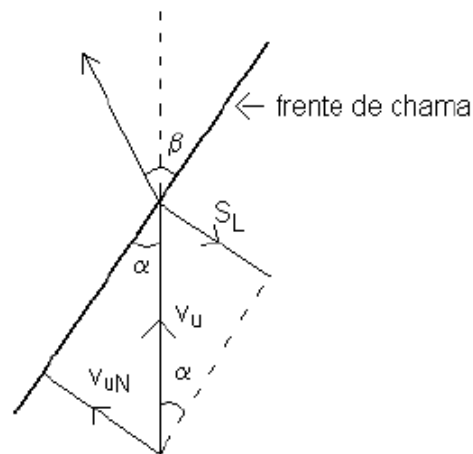


Figura 17 – Representação da velocidade de chama para aproximação de formato plano.[10]

### Cálculo da Velocidade de Chama

O objetivo é encontrar uma equação que seja capaz de estimar a magnitude da velocidade de chama e que possa expressar como cada parâmetro influencia seu valor através de um modelo simplificado de velocidade de chama baseado nas equações de conservação e quantidade de movimento para escoamento unidimensional e considerações sobre as propriedades termodinâmicas e de transporte, tais quais são descritas a seguir [10]:

- Escoamento unidimensional;
- Participação da energia cinética, potencial, forças viscosas e radiação térmica;
- Pressão constante;

- Difusões de calor e de massa controladas.
- Número de Lewis igual à unidade.

$$Le = \alpha/D = k/(\rho.Cp.D) = 1 \quad (4.19)$$

ou:

$$k/Cp = \rho.D \quad (4.20)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica [ $m^2/s$ ],  $D$  é a difusividade [ $m^2/s$ ],  $k$  é a condutividade térmica [ $W/m.K$ ],  $\rho$  é a massa específica [ $kg/m^3$ ] e  $Cp$  o calor específico a pressão constante [ $J/kg.K$ ].

- O calor específico ( $Cp$ ) não depende da temperatura ou da composição da mistura;

- O processo químico é resumido em uma reação global;

- O Oxidante é suficiente para oxidar todo o combustível ( $\phi > 1$ ).

#### Conservação de Massa:

$$\frac{d\dot{m}}{dx} = 0 \rightarrow \frac{d\rho A v_x}{dx} = 0 \quad (4.21)$$

Sendo  $A$  (área da seção transversal do volume de controle) constante:

$$A \frac{d\rho v_x}{dx} = 0 \rightarrow \frac{d\rho v_x}{dx} = 0 \quad (4.22)$$

ou:

$$\rho v \times m'' \text{ constante} \quad (4.23)$$

onde  $m''$  representa o fluxo de massa, ou seja, a vazão mássica por unidade de área [ $kg.s^{-1}.m^{-2}$ ].

#### Conservação de Espécie:

$$\frac{\dot{m}_i''}{dx} = \dot{m}_i''' \quad (4.24)$$

sendo  $m''$  a taxa volumétrica de produção de massa da espécie  $i$  [ $kg.s^{-1}.m^{-3}$ ].  
Escrevendo a “Lei de Fick” para difusão de massa [10]:

$$\dot{m}_i'' = m f_i \cdot \dot{m}'' - \rho.D \cdot \frac{dm f_i}{dx} \quad (4.25)$$

onde o primeiro e o segundo termo do lado direito da equação anterior representam os fluxos de massa convectivo e difusivo, respectivamente. Substituindo (4.25) em (4.24), tem-se:

$$\frac{d\left(mf_i \cdot \dot{m}'' - \rho \cdot D \cdot \frac{dmf_i}{dx}\right)}{dx} = \dot{m}''' \quad (4.26)$$

A equação anterior pode ser escrita para o combustível, oxidante ou produto. Para uma reação global, a conservação de massa pode ser escrita como [10]:

$$1\text{kg de combustível} + \eta \cdot \text{kg de oxidante} \longrightarrow (1 + \eta) \cdot \text{kg de produto} \quad (4.27)$$

Assim:

$$\dot{m}''' = \frac{1}{\eta} \dot{m}_{ox}''' = -\frac{1}{(1 + \eta)} \dot{m}_{pr}''' \quad (4.28)$$

Substituindo a relação anterior na equação (4.26), a expressão da conservação de espécie fica:

- combustível:

$$\dot{m}''' = \frac{1}{\eta} \dot{m}_{ox}''' = -\frac{1}{(1 + \eta)} \dot{m}_{pr}''' \quad (4.29)$$

- oxidante:

$$\dot{m}'' \frac{dmf_{ox}}{dx} - \frac{d\left(\rho D \frac{dmf_{ox}}{dx}\right)}{dx} = \eta \cdot \dot{m}_F''' \quad (4.30)$$

- produto:

$$\dot{m}'' \frac{dmf_{pr}}{dx} - \frac{d\left(\rho D \frac{dmf_{pr}}{dx}\right)}{dx} = -(1 + \eta) \cdot \dot{m}_F''' \quad (4.31)$$

### Conservação de Energia:

A equação da energia será apresentada como [10]:

$$\dot{m}'' \cdot Cp \frac{dT}{dx} + \frac{d\left(-\rho \cdot D \cdot Cp \frac{dT}{dx}\right)}{dx} = -\sum_{i=1}^k h_{f,i}^0 \cdot \dot{m}_i''' \quad (4.32)$$

Os termos desta equação representam:

$\dot{m}'' \cdot Cp \frac{dT}{dx}$  - taxa de transporte de entalpia por convecção por unidade de volume;

$\frac{d(-\rho \cdot D \cdot Cp \frac{dT}{dx})}{dx}$  - taxa de transporte de entalpia por difusão por unidade de volume;

$-\sum_{i=1}^k h_{f,i}^0 \cdot \dot{m}_i'''$  - taxa de produção de entalpia através da reação química por unidade de volume.

Introduzindo as relações apresentadas nas equações (4.27) e (4.28) no termo  $-\sum_{i=1}^k h_{f,i}^0 \cdot \dot{m}_i'''$  da equação anterior temos [10]:

$$-\sum_{i=1}^k h_{f,i}^0 \cdot \dot{m}_i''' = -\left[ h_{f,F}^0 \cdot \dot{m}_i''' + h_{f,ox}^0 \cdot \eta \cdot \dot{m}_i''' - h_{f,pr}^0 \cdot (\eta + 1) \cdot \dot{m}_F''' \right] \quad (4.33)$$

Esta mesma equação pode ainda ser descrita utilizando as seguintes relações:

$$H_{PR} = \sum_{P=1}^k N_P (*h_{f,P}^0 + *\Delta h_{s,P}) - \sum_{R=1}^k N_R (*h_{f,R}^0 + *\Delta h_{s,R}) \quad (4.34)$$

$$H_{PR} = Q_{VC} = \sum_{P=1}^k N_P \cdot *h_{f,P}^0 - \sum_{R=1}^k N_R \cdot *h_{f,R}^0 \quad (4.35)$$

$$-\sum_{i=1}^k N_P h_{f,i}^0 \cdot \dot{m}_i''' = \dot{m}_F''' \cdot PC \quad (4.36)$$

onde PC é poder calorífico do combustível. Como  $Le = 1$ , pode-se substituir  $D \cdot \rho \cdot Cp$  por  $k$ , e a equação da energia assume a forma:

$$\dot{m}'' \frac{dT}{dx} + \frac{1}{Cp} \frac{d\left(-k \frac{dT}{dx}\right)}{dx} = -\frac{\dot{m}_F''' \cdot PC}{Cp} \quad (4.37)$$

A velocidade de chama laminar aparece na equação anterior de forma implícita, através do parâmetro  $\dot{m}''$ . O fluxo de massa através da frente de chama é dado por:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{m}}{A} = \rho_{\bar{n}} \cdot \nu_{\bar{n}} \quad (4.38)$$

onde  $\rho_{\bar{n}}$  e  $\nu_{\bar{n}}$  são a densidade e a velocidade dos gases não queimados (reagentes), respectivamente.

Como a chama estabiliza onde a velocidade de chama é igual a velocidade na qual os gases não queimados entram na frente de chama ( $\nu_{\bar{n}} = S_L$ ), tem-se que:

$$\dot{m}_i'' = \rho_{\bar{n}} \cdot S_L \quad (4.39)$$



As condições de contorno para equação (4.37) são:

em  $-\infty$  :

$$T = T_{\tilde{n}} \text{ e } dT/dx = 0$$

em  $+\infty$  :

$$T = T_q \text{ e } dT/dx = 0$$

Para simplificar a resolução do problema, vamos assumir um perfil de temperatura linear entre  $T_{\tilde{n}}$  e  $T_q$  através da distância  $\delta$ , definida como a espessura da chama, conforme a Figura 19:

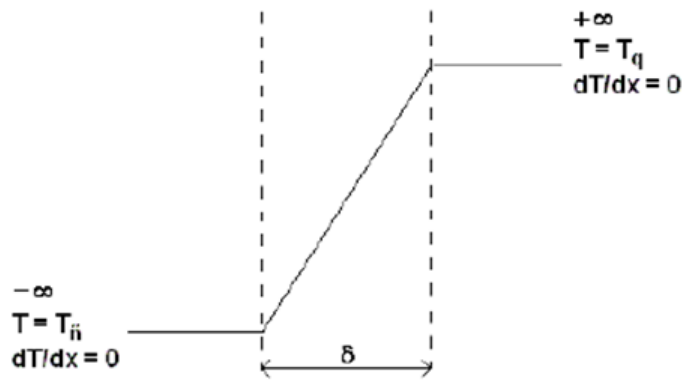


Figura 18 – Perfil de temperatura assumido para a solução da equação 4.41 [10]

Matematicamente a equação (4.37) representa uma equação diferencial ordinária de segunda ordem, com dois parâmetros desconhecidos,  $m''$  e  $\delta$ . Integrando essa equação através do intervalo  $-\infty$  a  $+\infty$  temos [10]:

$$\dot{m}'' \cdot T \Big|_{T=T_{\tilde{n}}}^{T=T_q} - \frac{k}{C_p} \left[ \frac{dT}{dx} \right]_{dT/dx=0}^{dT/dx=0} = -\frac{PC}{C_p} \int_{-\infty}^{+\infty} m_F'' \cdot dx \quad (4.40)$$

ou:

$$\dot{m}'' \cdot (T_q - T_{\tilde{n}}) = -\frac{PC}{C_p} \int_{-\infty}^{+\infty} m_F'' \cdot dx \quad (4.41)$$

Para facilitar a integração, a seguinte mudança de variável é feita:

$$\frac{dT}{dx} = \left( \frac{T_q - T_{\tilde{n}}}{\delta} \right) \quad (4.42)$$

ou:

$$dx = \left( \frac{\delta}{T_q - T_{\tilde{n}}} \right) \cdot dT \quad (4.43)$$

Assim, a equação (4.41) fica:

$$\dot{m}''.(T_q - T_{\bar{n}}) = -\frac{PC}{Cp} \cdot \frac{\delta}{T_q - T_{\bar{n}}} \int_{T_{\bar{n}}}^{T_q} \dot{m}_F''' .dT \quad (4.44)$$

Definindo uma taxa de reação média por unidade de volume como sendo:

$$\bar{\dot{m}}''' = -\frac{1}{T_q - T_{\bar{n}}} \int_{T_{\bar{n}}}^{T_q} \dot{m}_F''' .dT \quad (4.45)$$

Sendo assim, temos:

$$\dot{m}''.(T_q - T_{\bar{n}}) = -\frac{PC}{Cp} .\delta. \bar{\dot{m}}''' \quad (4.46)$$

Ainda assim, a equação (4.46) é uma equação algébrica com duas incógnitas,  $\dot{m}''$  e  $\delta$ , ou seja, necessitamos de mais uma equação. Essa segunda equação é obtida estabelecendo um intervalo de integração entre  $-\infty$  e  $\delta/2$  na equação (4.37). Para  $x=\delta/2$ , as condições de contorno serão [10]:

$$T = \left(\frac{T_q + T_{\bar{n}}}{2}\right) \quad (4.47)$$

e

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T - T_{\bar{n}}}{\delta/2} = \frac{(T_q/2) + (T_{\bar{n}}/2) - T_{\bar{n}}}{\delta/2} = \frac{(T_q/2) - (T_{\bar{n}}/2)}{\delta/2} = \frac{T_q - T_{\bar{n}}}{\delta} \quad (4.48)$$

Como a taxa da reação química depende da temperatura, pode-se admitir que  $\dot{m}_f'''$  é zero na metade de menor temperatura do intervalo, ou seja, entre  $-\infty$  e  $\delta/2$ . Desta forma, o resultado da integração da equação (4.37) para esse intervalo fica:

$$\dot{m}''.(T - T_{\bar{n}}) - \frac{k}{Cp} \cdot \frac{(T_q - T_{\bar{n}})}{\delta} = 0 \quad (4.49)$$

Substituindo a condição de contorno (4.47):

$$\dot{m}'' [(T_q/2)(T_{\bar{n}}/2) - T_{\bar{n}}] - \frac{k}{Cp} \cdot \frac{(T_q - T_{\bar{n}})}{\delta} = \frac{\delta.\dot{m}''}{2} (T_q - T_{\bar{n}}) - \frac{k}{Cp} (T_q - T_{\bar{n}}) = 0 \quad (4.50)$$

ou

$$\frac{\delta.\dot{m}''}{2} - \frac{k}{Cp} = 0 \quad (4.51)$$

Resolvendo as equações (4.46) e (4.51) simultaneamente, encontra-se:

$$\dot{m}'' = [2 \cdot \frac{k}{Cp^2} \cdot \frac{(-PC)}{(T_q - T_{\bar{n}})} \cdot \bar{\eta}''']^{1/2} \quad (4.52)$$

e

$$\delta = \frac{2k}{Cp \cdot \dot{m}''} \quad (4.53)$$

Retomando a equação:

$$N_{CxHy} \cdot PCI_{CxHy} = \sum_{P=1}^k N_P \cdot \Delta h_{s,P} \Big|_{298}^{T_2} - \sum_{R=1}^k N_R \cdot \Delta h_{s,R} \Big|_{298}^{T_1}, \quad (4.54)$$

tem-se que:

$$PC = (\eta + 1) \cdot Cp \cdot (T_q - T_{\bar{n}}). \quad (4.55)$$

Substituindo a equação (4.55) e as relações  $S_L = \frac{\dot{m}''}{\rho_{\bar{n}}}$  e  $\alpha = \frac{k}{(\rho_{\bar{n}} \cdot Cp)}$  na equação (4.52) e (4.53), encontra-se:

$$S_L = \left[ -2\alpha(\eta + 1) \frac{\bar{\eta}'''}{\rho_{\bar{n}}} \right]^{1/2} \quad (4.56)$$

$$\delta = \left[ \frac{-2\rho_{\bar{n}} \cdot \alpha}{(\eta + 1) \cdot \bar{\eta}'''} \right]^{1/2} \quad (4.57)$$

ou

$$\delta = 2 \cdot \alpha / S_L \quad (4.58)$$

As equações (4.46) e (4.47) avaliam teoricamente como as propriedades da mistura combustível/oxidante afetam a velocidade de propagação da chama e sua espessura. A taxa de reação média por unidade de volume  $\bar{m}_F'''$  pode ser [10]:

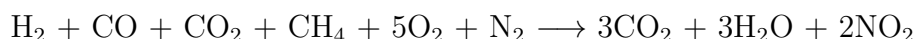
$$\bar{m}_F''' = \bar{\omega}_F \cdot Mw_F \quad (4.59)$$

onde  $\omega_F$  é a taxa de consumo de combustível utilizando valores médios para as concentrações de combustível e oxidante.

#### 4.4 PARÂMETROS UTILIZADOS

Para a construção dos resultados gráficos obtidos pelas simulações numéricas que serão realizadas a partir dos softwares já apresentados é necessário levar em consideração uma série de fatores que interferem em um processo de combustão. No caso dos altos fornos, além dos aspectos gerais mais importantes que serão abordados neste trabalho, questões como preparação da matéria prima (com inserção de minério de ferro pelotizado), injeção de carvão pulverizado (com o intuito de aumentar o poder calorífico do mesmo) e o número de ventaneiras instaladas no equipamento são alguns pontos específicos do processo que não serão parâmetros utilizados nessa simulação numérica mas que, com certeza, são temas de intensos estudos nas indústrias siderúrgicas, podendo vir a ser questões importantes a serem analisadas em trabalhos futuros.

Assim, a partir do modelo de funcionamento do CHEMKIM e do CANTERA, os cinco parâmetros que serão levados em consideração no processo de combustão do alto forno são definidos a seguir, tomando como base a reação global de combustão que governa o processo:



- Combustível: é uma substância que reage com o oxigênio (ou outro comburente) liberando energia, usualmente de modo vigoroso, na forma de energia térmica, chamas e gases. A liberação da energia nele contida em forma de energia potencial é uma forma extremamente utilizável no meio em que vivemos, existindo várias substâncias que são ou podem ser usadas como combustível. Entre os combustíveis gasosos, estão o gás natural ou os GLP (Gases Liquefeitos de Petróleo), representados pelo propano e o butano, além do gás de síntese ("gás pobre") historicamente empregado como alternativa em momentos de escassez de combustíveis convencionais, sendo produzido a partir de matéria-prima líquida/sólida de origem fóssil ou biomassa.

Segundo José Nazareno Santos Silva [2], o oxigênio do ar que é injetado preaquecido pelas ventaneiras reage com o carbono do combustível (carvão ou coque), gerando uma grande quantidade de calor para o processo e ainda um gás composto principalmente por CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Tomando esse processo como base e analisando as reações químicas decorrentes nos altos fornos, apresentadas na seção 3.5, o combustível considerado será formado pelos gases citados, evidentemente que metano e hidrogênio terão maior influência no processo, mesmo que elementos provenientes do carbono estejam presente em maiores proporções. A princípio pode não parecer condizente a entrada do CO nesta etapa, uma vez que, de acordo com as reações citadas este elemento está incluído nos produtos gerados pelo processo, entretanto, o CO apresenta um elevado poder calorífico e por isso os processos de cogeração aplicados na siderurgia estão diretamente ligados com

o reaproveitamento deste gás. Este processo receberá uma atenção especial em seções posteriores deste trabalho.

- Oxidante: Um oxidante é um material que libera oxigênio rapidamente para sustentar a combustão dos materiais orgânicos. Outra definição semelhante afirma que o oxidante é um material que gera oxigênio à temperatura ambiente, ou quando levemente aquecido. Devido a facilidade de liberação do oxigênio, estas substâncias são relativamente instáveis e reagem quimicamente com uma grande variedade de produtos. Apesar da grande maioria das substâncias oxidantes não ser inflamável, o simples contato delas com produtos combustíveis pode gerar um incêndio, mesmo sem a presença de fontes de ignição. Assim, como já era esperado, pela análise detalhada no item 3.5 e pelo fato de ser o principal oxidante nos processos que envolvem a combustão, o oxidante a ser considerado no processo é o Ar (Nitrogênio + Oxigênio);

- Temperatura de entrada no combustor: é outro importante parâmetro pelo fato de haver um intervalo de temperatura a ser analisado, uma vez que os gases pré-aquecidos nos glendons, Figura 20, como já foi detalhado anteriormente, são injetados no interior do equipamento a uma temperatura de aproximadamente 800°C (Apêndice A – Características dos Altos Fornos). Entretanto, de acordo com as equações apresentadas na seção 3.5, a partir de 500°C os gases presentes no processo já começam a atuar na redução do minério, sendo que a partir do instante em que essa temperatura se aproxima de 1000°C já é possível observar o início da fusão do material. Logo, adotando a escala Kelvin como padrão, o intervalo de temperatura a ser analisado está compreendido entre 500K e 1000K, aproximadamente, que compreende o intervalo entre o início das reações de combustão até o ponto em que se inicia a obtenção do gusa líquido.

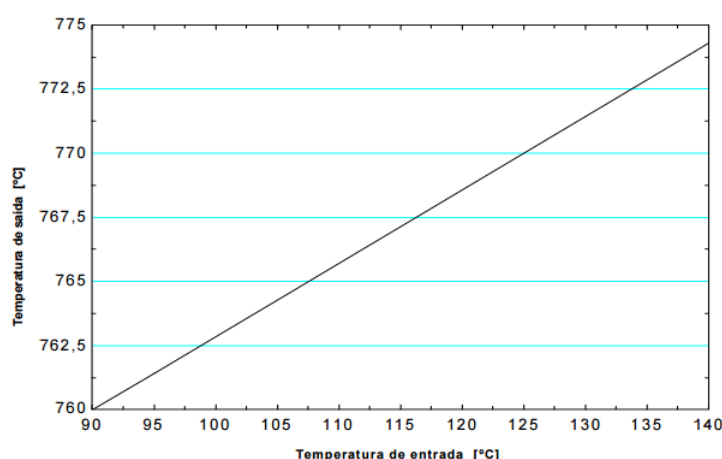


Figura 19 – Temperatura do ar de sopro na saída do Glendon em função da temperatura de entrada [3]

- Pressão: é outro parâmetro importante e diretamente ligado com a eficiência do processo combustivo, uma vez que parte-se do princípio que quanto maior a pressão

menor serão os esforços termoquímicos necessários no processo de oxirredução do minério. De acordo com o Apêndice A, a pressão de entrada dos gases no topo do alto forno é de 0,35 bar, entretanto, esta não é a pressão imposta no alto forno quando o mesmo está sendo carregado, ou seja, este não é o valor real da pressão quando a combustão está no seu ponto mais intenso. Além disso, outro fator que pode influenciar neste parâmetro é a umidade relativa do ar fazendo com que a pressão alcance valores próximos a 5 bar. Assim, de acordo com a modelagem matemática adotada pelos softwares empregados na simulação numérica, onde o valor da pressão adotado deve ser constante para todo o processo, e pelo fato da região onde está situada a AMJF possuir umidades relativas consideráveis, será adotado um valor de pressão de 4 bar (400 KPa, unidade padrão dos softwares utilizados), que é a pressão na qual ocorre a reação de Boudouard ( $C + CO_2 = 2CO$ ), gerando os primeiros produtos da queima.

Em temperaturas elevadas e na pressão considerada acima, o vapor de água (H<sub>2</sub>O) presente no ar é convertido em H<sub>2</sub>, sendo este um excelente combustível. Por este motivo, mesmo que sua concentração no processo não seja tão intensa quanto a dos demais elementos, este será considerado na simulação realizada, uma vez que terá sua importância ressaltada na definição do intervalo de abrangência da razão de equivalência, parâmetro que receberá uma abordagem especial, que será feita a seguir.

#### 4.5 A RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA

A definição do tipo de mistura ar/combustível que está sendo aplicada em um processo de combustão é um parâmetro essencial para o desenvolvimento ideal do projeto, bem como o acompanhamento das condições de queima, para identificar se essa relação está realmente seguindo o que foi pré-estabelecido. Mesmo que vários radicais possam estar envolvidos em uma chama, certas espécies são mais importantes para caracterizar o regime de combustão, onde frações de massa de combustível e de oxidante são obviamente quantidades significativas e a sua proporção é comumente utilizada para caracterizar a chama [16] Quanto ao tipo de mistura, tem-se:

- Mistura estequiométrica: é a proporção quimicamente ideal entre o ar e o combustível, conhecida como mistura perfeita, significando que todo o combustível e todo o oxidante presente na zona de combustão serão completamente queimados. Entretanto, esse fato só ocorre sob condições controladas, o que é algo relativamente incomum de ocorrer, uma vez que há casos em que a prioridade é a economia de combustível e em outros é necessário a potência máxima do sistema, como é o caso dos altos fornos. Assim sendo, a relação estequiométrica é apenas um valor de referência para estudos em geral.

- Mistura rica: Ocorre quando há grande quantidade de combustível envolvido no sistema e a proporção de oxidante não é suficiente para proporcionar a queima completa;

- Mistura pobre: Neste tipo de mistura ocorre o inverso da mistura rica, havendo excesso de oxidante com relação ao combustível.

Com isso, com os conceitos acima já estabelecidos, pode-se definir que a razão de equivalência é a razão entre a relação combustível/ar que realmente está sendo empregada no processo e a relação combustível/ar estequiométrica, definido pela seguinte equação:

$$\phi = \frac{(\frac{F}{A})_{real}}{(\frac{F}{A})_s}$$

Além disso tem-se que o inverso de  $\phi$  gera outro parâmetro chamado razão relativa ar/combustível,  $\lambda$ :

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{(\frac{F}{A})_{real}}{(\frac{F}{A})_s}$$

Onde:

[  $\phi$  ]: razão de equivalência;

F (fuel): combustível;

A (air): oxidante

A partir destas relações pode-se concluir que:

Para mistura pobre:  $\phi < 1$ ;  $\lambda > 1$

Para mistura estequiométrica:  $\phi = 1$ ;  $\lambda = 1$

Para mistura rica:  $\phi > 1$ ;  $\lambda < 1$

Segundo Thierry Poinot e Denis Veynante [16], os queimadores mais práticos operam no ponto estequiométrico ou abaixo deste. Em chamas de hidrocarbonetos/ar, os gases reagentes contêm combustível, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> com tipicamente 3,76 moles para 1 mol de oxigênio. Uma vez que a soma das frações de massa deve ser unitária, a fração de massa do combustível é dada por:

$$Y_F = \frac{1}{1 + \frac{s}{\phi} \cdot \left(1 + 3,76 \cdot \frac{W_{N_2}}{W_{O_2}}\right)} \quad (4.60)$$

A partir de então, a razão de equivalência (representada por  $s$  neste caso, seguindo a notação dos autores) para uma combustão estequiométrica é regida pela Tabela 3:

Entretanto, pelo fato das reações que ocorrem nos altos fornos não serem exatamente estas apresentadas, ainda não se pode definir o intervalo de razão de equivalência que será utilizado a partir dos dados gerados por Poinot e Veynante, mas o fato dos gases apresentados serem os mesmos presentes na combustão nos altos fornos faz com que os esses resultados sejam um parâmetro inicial.

Global reaction	$s$	$Y_F^{st}$
$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2$	4.00	0.055
$C_3H_8 + 5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 18.8N_2$	3.63	0.060
$2C_8H_{18} + 25(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 16CO_2 + 18H_2O + 94N_2$	3.51	0.062
$2H_2 + (O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2H_2O + 3.76N_2$	8.00	0.028

Tabela 3 – Razões estequiométricas  $s$  e fração de massa de combustível para combustão estequiométrica [16]

Assim, a equação  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ , será a reação que será tomada como base para geração deste parâmetro, uma vez que é a reação inicial e por isso, fundamental para o processo de combustão, sendo responsável pela geração dos gases redutores apresentados. A partir de então, o modelo de determinação da razão de equivalência a ser seguido será descrito a seguir:

Sabendo que :

$$OF = m_{ox}/m_F$$

$$FO = m_F/m_{ox}$$

Em base molar:

$$*OF = N_{ox}/N_F \quad (4.61)$$

$$*FO = N_F/N_{ox} \quad (4.62)$$

Além disso, tem-se que:

$$OF = m_{ox}/m_F = m_{f_{ox}} \cdot m_{tot} / m_{f_F} \cdot m_{tot} \quad (4.63)$$

$$*OF = N_{ox}/N_F = x_{ox} \cdot N_{tot} / x_F \cdot N_{tot} \quad (4.64)$$

Sendo  $x_i$  a fração molar dos combustíveis/oxidantes, e  $m$  a fração mássica dada por:

$$mf_i = \frac{x_i \cdot Mw_i}{\sum_{i=1}^k x_i \cdot Mw_i} \quad (4.65)$$



Conclui-se que:

$$\phi = \frac{(*FO)_{\text{operação}}}{(*FO)_{\text{estequiometria}}} = \frac{\left(\frac{1}{*OF}\right)_{\text{operação}}}{\left(\frac{N_F}{N_{ox}}\right)_{\text{estequiometria}}} \quad (4.66)$$

A partir de então, como se deseja trabalhar com um intervalo de razão de equivalência, e não com um valor em si, serão utilizadas duas situações extremas do processo: considerando que a reação  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  ocorre com um excesso de combustível (combustão rica), fato este que pode ocorrer em situações em que o alto forno se encontra em plena carga com picos máximos de produção; e posteriormente considerando uma combustão pobre, com um excesso de oxidante, o que pode ocorrer em intervalos de abastecimento, por exemplo.

Assim, tomando como um intervalo de valores gerados desde um excesso de combustível de 45% (situação extrema para fins de simulação) até um excesso de oxidante de 30%, obtem-se os resultados descritos na Tabela 4, alcançando um intervalo de abrangência da razão de equivalência compreendido aproximadamente entre 0,6 e 3,3.

REAÇÃO C + O2 → CO2	SITUAÇÃO	xc	mfo2	OF	*OF	1/OF	φ
	EXCESSO 45 % COMBUSTÍVEL	0,645161	0,594595	1,466667	0,55	1,818182	3,305785
	EXCESSO 40 % COMBUSTÍVEL	0,625	0,615385	1,6	0,6	1,666667	2,777778
	EXCESSO 35% COMBUSTÍVEL	0,606061	0,634146	1,733333	0,65	1,538462	2,366864
	EXCESSO 30 % COMBUSTÍVEL	0,588235	0,651163	1,866667	0,7	1,428571	2,040816
	EXCESSO 25 % COMBUSTÍVEL	0,571429	0,666667	2	0,75	1,333333	1,777778
	EXCESSO 20 % COMBUSTÍVEL	0,555556	0,680851	2,133333	0,8	1,25	1,5625
	EXCESSO 15 % COMBUSTÍVEL	0,540541	0,693878	2,266667	0,85	1,176471	1,384083
	EXCESSO 10 % COMBUSTÍVEL	0,526316	0,705882	2,4	0,9	1,111111	1,234568
	EXCESSO 5 % COMBUSTÍVEL	0,512821	0,716981	2,533333	0,95	1,052632	1,108033
	<b>COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA</b>	<b>0,5</b>	<b>0,727273</b>	<b>2,666667</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	EXCESSO 5 % OXIDANTE	0,487805	0,736842	2,8	1,05	0,952381	0,907029
	EXCESSO 10 % OXIDANTE	0,47619	0,745763	2,933333	1,1	0,909091	0,826446
EXCESSO 15 % OXIDANTE	0,465116	0,754098	3,066667	1,15	0,869565	0,756144	
EXCESSO 20 % OXIDANTE	0,454545	0,761905	3,2	1,2	0,833333	0,694444	
EXCESSO 25 % OXIDANTE	0,444444	0,769231	3,333333	1,25	0,8	0,64	
EXCESSO 30 % OXIDANTE	0,434783	0,776119	3,466667	1,3	0,769231	0,591716	

Tabela 4 – Intervalo de razão de equivalência atingido a partir das premissas adotadas. Fonte: Autor

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 REDUÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES - COGERAÇÃO

Como foi amplamente apresentado nas seções anteriores, o processo de combustão de um alto forno é uma grande fonte de energia térmica, sendo que os grandes responsáveis por esse poder calorífico são os gases envolvidos no processo. Em usinas de grande porte e que trabalham com intensos processos de redução, como é o caso de um siderúrgica, é comum a geração de gases indesejáveis para o processo no que se refere a questões ambientais, porém, a criação de um novo modelo de produção capaz de alcançar os mesmos rendimentos do modelo tradicional mas sem que ocorra emissões de poluentes para a atmosfera é algo praticamente fora das realidades industriais.

Por outro lado, sabe-se que os dois principais gases de escape do alto forno são o CO e o CO<sub>2</sub>, ambos provenientes do processo de redução do minério de ferro ao entrar em contato com o gás redutor gerado pela queima do carvão. Grande parte desse CO<sub>2</sub> é realmente liberado para a atmosfera fazendo com que as usinas siderúrgicas sejam impostas a leis ambientais e se responsabilizem por tais emissões, entretanto, há alguns sistemas que vem sendo implantado para o reaproveitamento especialmente do CO, como apresentado na Tabela 5.

São quatro as principais alternativas que têm sido usadas pelas empresas brasileiras para reduzir as emissões de gases de efeito estufa na siderurgia: a cogeração de energia elétrica por meio do reaproveitamento de calor e de gases do processo; a substituição de insumos/combustíveis; a otimização do controle de processos com automação; e os programas de sensibilização/treinamento de fornecedores. No mundo, reduções significativas nas emissões de carbono somente são esperadas a partir da disseminação de novas tecnologias. Entre as inovações destacam-se aquelas voltadas para reduzir o consumo de energia e gerar menores emissões na etapa de redução, ou seja, de processos alternativos ao alto-forno, como a redução sólida; a autorredução; e a fusão redutora [17]

A primeira opção descrita é com certeza a mais abordada e a que está sendo amplamente utilizada atualmente. Estas questões só são válidas pelo fato de que por mais eficiente que seja um gerador térmico, a maior parte da energia contida no combustível usado para seu acionamento é transformada em calor e perdida para o meio ambiente. Trata-se de uma limitação física que independe do tipo de combustível (diesel, gás natural, carvão, etc.) ou do motor (a explosão, turbina a gás ou a vapor etc.), abrangendo, portanto, sistemas que envolvem processos combustivos. Como muitos necessitam de calor (vapor ou água quente), foi desenvolvida uma tecnologia denominada cogeração, em que o calor produzido na geração térmica é usado no processo produtivo sob novas condições, sendo importante ressaltar que além dos benefícios gerados quanto a otimização da produção e redução da emissão de poluentes, há ainda as questões econômicas da utilização do

processo que serão discutidas posteriormente.

AÇÃO DE REDUÇÃO	POTENCIAL DE REDUÇÃO EMISSÕES	BARREIRAS	INVESTIMENTO NECESSÁRIO	VIABILIDADE
Eficiência energética no processo de sinterização – uso de tecnologia de <i>heat recovery</i>	Alto	Investimentos necessários são relativamente elevados.	Médio	Alta
Eficiência energética no processo de sinterização – melhorias incrementais variadas	Médio	São diversas as melhorias que, se adotadas em conjunto, têm um potencial de redução de emissão médio.	Baixo	Alta
Eficiência energética no processo de coqueificação – uso de sistemas para controle de mistura de carvão	Médio	Uso de sistemas, embora tenha impacto médio sobre a redução de emissões, apresenta impacto elevado sobre o consumo de coque, o que torna a sua viabilidade alta.	Alto	Alta
Eficiência energética no processo de coqueificação – apagamento a seco e outras	Médio	Diversas tecnologias incluídas nessa ação têm potenciais diversos no que diz respeito à redução de emissões.	Alto	Baixa
Eficiência no alto-forno – aumento de injeção de <i>pulverized coal injection (PCI)</i> e de gás natural	Alto	Essas duas tecnologias permitem uma economia de energia significativa, com impacto sobre a redução de emissões e médio custo de capital.	Médio	Alta
Cogeração a partir do gás de alto-forno	Médio	Essa tecnologia somente é viável para novos investimentos.	Alto	Baixa
Melhorias dos sistemas de automação e controle do alto-forno	Médio	Custo relativamente baixo do investimento, associado à redução do consumo de energia, torna alta a viabilidade desses investimentos. A maior barreira identificada é a necessidade de qualificação da mão de obra.	Baixo	Alta
Tecnologias mais eficientes para recuperação de gás de aciaria	Alto	Investimento relativamente elevado, com retorno a médio prazo.	Alto	Média

Tabela 5 – Medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa na siderurgia [17]

Além disso, sabe-se também que os gases de alto forno contêm, tipicamente, em torno de 20% de CO<sub>2</sub> e 21% de CO por volume, sendo o restante praticamente composto por N<sub>2</sub> (nitrogênio), porém, dependendo da quantidade de oxigênio presente no processo os gases de exaustão podem ser constituídos por até 70% de CO. A pressão desses gases é baixa, em torno de 2 a 3 bar, por isso, o CO<sub>2</sub> pode ser capturado antes ou após a combustão, sendo que na segunda opção apresenta-se uma concentração por volume superior à dos gases de exaustão de centrais geradoras termelétricas. Por sua vez, a composição dos gases de alto forno vem mudando, em virtude da crescente injeção de carvão, gás natural

e resíduos plásticos. Como estes combustíveis tendem a aumentar a temperatura no alto forno, esse efeito é compensado pela injeção de 50kg a 75 Kg de oxigênio por tonelada de aço. O enriquecimento com a injeção de oxigênio diminui a concentração de N<sub>2</sub> nos gases de exaustão e aumenta a concentração de CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. [22]

Assim, será trabalhado o fato de que as questões referentes à redução da emissão de poluentes na siderurgia estão relacionadas com o reaproveitamento da grande quantidade de CO que seria liberado pelo alto forno, fazendo deste a matéria-prima para a implantação do sistema de cogeração. Partindo deste princípio, veremos a seguir o esquema detalhado de funcionamento desse sistema em outras atividades e em outros setores da usina.

## 5.2 A COGERAÇÃO APLICADA NA SIDERURGIA

Outra definição de cogeração está relacionada com a reutilização combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento de mais de 70 % da energia térmica provenientes dos combustíveis utilizados no processo. Além disso, os avanços tecnológicos desenvolvidos na indústria siderúrgica brasileira, desde a década de noventa, vem ajudando nessa questão de consumo energético e da redução dos insumos gerados na produção. Há, no entanto, ganhos substanciais adicionais a serem constatados, com a adoção de novas tecnologias e novos programas de eficiência energética, que podem ajudar a otimizar ainda mais esse processo.

Na siderurgia, os dois sistemas principais de implantação da cogeração são aplicados no forno de reaquecimento de tarugos, na laminação, e no sistema de aquecimento dos gases injetados no alto forno pelos glendons, ou seja, a cogeração que usa como matéria-prima gases do alto forno pode ser empregada para a otimização do sistema de funcionamento do próprio equipamento. Esses dois sistemas serão detalhados a seguir:

### 5.2.1 FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS

Nas indústrias siderúrgicas, diversos produtos como perfis e vergalhões são produzidos em processos de laminação a quente a partir de tarugos de aço. Para que se possam atingir as propriedades metalúrgicas, mecânicas e dimensionais do produto final, é necessário que esses tarugos estejam à temperatura adequada ao serem laminados. Nesse contexto, os fornos de reaquecimento de tarugos, Figura 21, têm o objetivo de aquecer o aço da temperatura, em geral, ambiente até a desejada. A operação racional e econômica dos fornos de reaquecimento exige que o processo seja conduzido de forma a minimizar o consumo de combustíveis sem, contudo, afetar a homogeneidade de encharque térmico do material e respeitando as restrições do processo. Por esse ângulo, a operação dos fornos de reaquecimento se transforma em um problema de otimização, cujo objetivo é minimizar o custo com combustíveis, atendendo as restrições do processo (capacidades e temperatura desejada). [20]

Sabe-se que os fornos de reaquecimento têm como principais objetivos aquecer o tarugo até a temperatura desejada, garantindo a homogeneização da temperatura, utilizando o menor tempo e menor custo possível. Pensando nisso, há um sistema de captação de monóxido de carbono liberado nos altos fornos que leva este gás até a laminação através de grandes dutos que percorrem uma distância considerável, desde a saída dos altos fornos até a entrada do forno de reaquecimento, para que o CO, devido à facilidade que tem em inflamar-se, possa ser queimado, elevando a temperatura dos tarugos do interior do forno até que fiquem em condições de serem laminados.



Figura 20 – Tarugos sendo aquecidos no interior do forno.[19]

Além disso, os fornos de reaquecimento podem utilizar combustíveis líquidos e gasosos, dependendo do seu projeto e da disponibilidade. Dentre os combustíveis gasosos, além do gás de alto-forno (GAF), destacam-se:

- Gás de coqueria (GCO);
- Gás de aciaria (GAC);
- Gás natural (GN);
- Gás liquefeito de petróleo (GLP);
- Gás misto (Mistura dos outros tipos de gás).

A participação que cada gás pode ter no processo com relação às questões térmicas do projeto são descritas na tabela a seguir, sendo possível notar que os gases de alto forno possuem um poder calorífico inferior consideravelmente menor que os demais combustíveis, entretanto, como já foi esclarecido, o emprego desses gases, em especial o CO, se torna viável por ser um produto extremamente abundante no processo e que se não possuísse essa

importante função de cogeração em sistemas paralelos, seria descartado para o ambiente. Além disso, é importante ressaltar também, conforme a Tabela 6, que os gases de alto forno possuem um dos maiores intervalos de temperatura de ignição, permitindo um melhor aproveitamento térmico dos produtos até que a queima desses gases seja realizada completamente, possibilitando ao tarugo uma melhor absorção da energia térmica gerada, fazendo com que alcance as temperaturas de laminação mais rapidamente.

<b>COMBUSTÍVEL</b>	<b>PCI PADRÃO (kcal/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>FAIXA DE VARIAÇÃO (kcal/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>TEMPERATURA DE IGNIÇÃO (°C)</b>
GAF	770	700 a 1100	700 a 800
GLP	27300	24000 a 30000	440 a 550
ÓLEO	9000	-	530 a 580
GN	9000	8700 a 9050	600 a 650

Tabela 6 – Características térmicas para cada tipo de combustível em um forno de reaquecimento[21]

Além disso, com relação aos resultados, simultaneamente às curvas de temperatura adiabática de chama são geradas curvas que demonstram a quantidade dos principais gases de escape do alto forno, e com a análise gráfica especificamente da concentração molar de CO gerado na queima poderá ser constatado que esse gás representa uma parte considerável dos produtos de combustão, garantindo uma estabilidade e uma auto-suficiência ainda maior ao processo.

### 5.2.2 AQUECIMENTO DOS GASES DE ENTRADA DO ALTO FORNO

Os Glendons possuem um regime de trabalho contínuo e consistem em câmaras de paredes refratárias, onde ocorre a combustão do gás efluente do topo do alto-forno. O calor gerado pela combustão aquece o ar que passa em tubulações de aço e, com isso, o ar quente é então conduzido ao anel de vento e injetado no alto-forno através das ventaneiras. No interior do alto-forno, o ar quente injetado reage com o carvão produzindo uma chama contínua naquela região.[3] Uma ilustração do funcionamento do aparelho é apresentada na Figura 22.

Assim como no forno de reaquecimento, o gás de alto forno, constituído basicamente por CO, é reutilizado no próprio sistema gerador. Uma vez que se trata de um fluxo contínuo de produção o processo passa a se tornar um ciclo produtivo, onde os próprios gases gerados na combustão são reutilizados para aquecer o ar de entrada.

Com relação à economia gerada pela aplicação deste sistema, pode ser feito, primeiramente, uma análise indireta dos benefícios alcançados, no que se refere ao processo dos altos-fornos em si, onde quanto maior a temperatura de chama mais fácil é a injeção

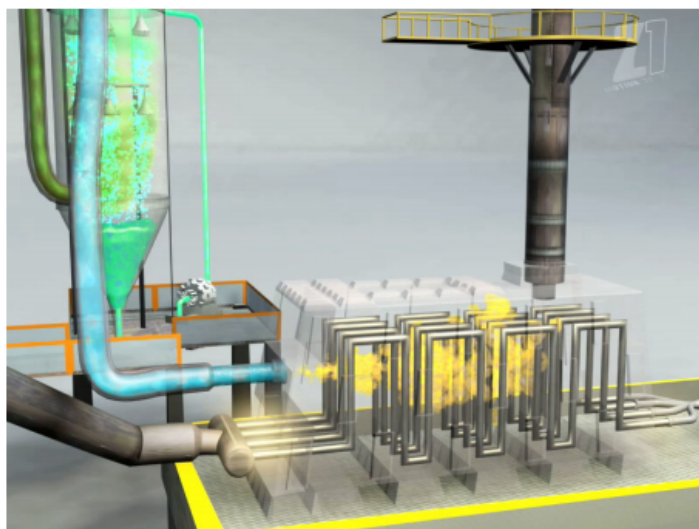


Figura 21 – Esquema de aquecimento dos gases de entrada do alto forno [18].

de combustíveis auxiliares, como finos de carvão, gerando uma maior a produtividade e menores consumos específicos de ar de sopro e de carvão vegetal. Este último é responsável pela maior parte dos custos totais de insumos na produção do ferro gusa nos altos-fornos conforme a Figura 23.

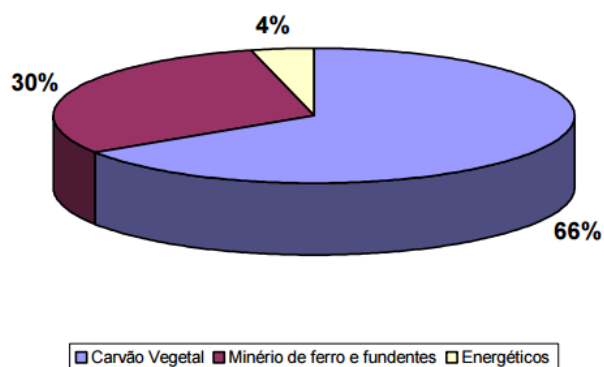


Figura 22 – Valores médios dos custos de produção de ferro gusa.[3]

A partir desta análise, o processo de cogeração apresentado se torna ainda mais válido não só pela qualidade gerada ao processo devido implantação do CO como matéria-prima para os glendons, mas principalmente pelo fato de que uma prática que foi utilizada durante muito tempo como opção para esse sistema estar relacionado com o uso de lenha ou até mesmo carvão para realizar esse pré-aquecimento do ar de sopro. Ou seja, esse sistema, além de não proporcionar o reaproveitamento do poder calorífico dos gases de escape, ainda faz com que o custo de produção aumente ainda mais, já que seria necessário aumentar o insumo de maior valor do processo.

Pela interferência dos parâmetros apresentados, fica ainda mais claro que os

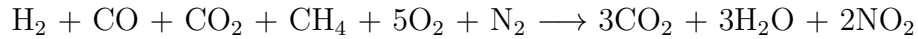
valores máximos possíveis de temperatura de chama são sempre objetivados na operação de altos-fornos. Além disso, em unidades siderúrgicas que possuem mais de um alto forno, faz que a continuidade do ciclo do processo seja ainda mais eficiente, pois mesmo que ocorra algum problema técnico ou até mesmo uma parada na produção para manutenção em um dos altos fornos, o outro é capaz de suprir as necessidades tanto do seu próprio processo de aquecimento quanto no aquecimento do forno da laminação. Vale destacar que várias usinas siderúrgicas operam com bem mais que dois altos fornos, o que fatalmente proporciona uma eficiência ainda maior ao projeto.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resumindo os parâmetros abordados anteriormente, como forma de esclarecimento dos dados que serão inseridos nos softwares, tem-se:

Reação global de combustão:



- a) Combustível: Gás composto por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>);
- b) Oxidante: Ar (oxigênio + nitrogênio);
- c) Razão de equivalência: 0,6 até 3,3;
- d) Temperatura de entrada no combustor: 500K até 1000K;
- e) Pressão de entrada no combustor: 400 KPa

É importante ressaltar novamente que as curvas referentes à temperatura adiabática de chama são geradas a partir da ferramenta computacional CANTERA, onde o código da programação é construído na linguagem PYTHON, sendo apresentada no Anexo A. Já com relação à velocidade de propagação de chama, as curvas são geradas a partir do software CHEMKIN, adotando uma vazão de entrada de 40 cm/s (padrão desta ferramenta). Além disso, vale destacar também que em ambas as situações foram usados 50 passos para a convergência da curva, o que, de acordo com os resultados, foi suficiente.

Assim, pretende-se apresentar como resultados, os parâmetros de desempenho como temperatura adiabática e velocidade de propagação de chama do processo de combustão de um alto forno e algumas das concentrações dos principais gases envolvidos como produto da queima, principalmente no que se refere à emissão de poluentes.

### 6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando separadamente os principais resultados encontrados, há alguns pontos de destaque, e que conseqüentemente merecem uma atenção especial.

#### •Temperatura Adiabática de Chama

Com relação à temperatura adiabática de chama, Figura 24, pode-se comprovar que quanto maior a temperatura no interior da câmara de combustão do alto forno, maior será a temperatura adiabática, fato este que é um tanto trivial ao se tratar de um fenômeno térmico. Entretanto, um primeiro ponto a ser ressaltado é que quanto maior a temperatura de entrada maior será a estabilidade da temperatura de chama, uma vez que este valor é crescente até valores próximos de  $\phi$  igual 1, entretanto, a partir deste ponto, quanto

menor a temperatura de entrada maior será o decaimento da curva (como pode-se ver no gráfico) e menor será a estabilidade da temperatura adiabática de chama.

Retomando a conceitos explorados anteriormente, que dizem que "a temperatura adiabática corresponde à maior temperatura que pode ser alcançada nos pontos de combustão, para uma dada condição dos reagentes" e tomando a curva de 1000 K como referência, uma vez que é a temperatura onde ocorre o início da fusão do minério de ferro, transformando-se em gusa líquido, pode-se concluir que cerca de 700K de temperatura são liberados como forma de energia térmica pelas reações exotérmicas decorrentes, sendo gasta nas trocas de calor com o ambiente e principalmente com as próprias paredes da câmara do alto forno, sendo que, nas partes do equipamento onde há acesso constantes de pessoas, é incluído um sistemas de resfriamento externo para evitar que a energia dissipada possa causar um acidente. Essa temperatura pode ser mensurada pelo fato de que a fusão completa do minério ocorre por volta de 1800 K e por isso, o intervalo de temperatura necessário para atingir o pico do gráfico apresentado abaixo está relacionado com o conceito explicitado inicialmente.

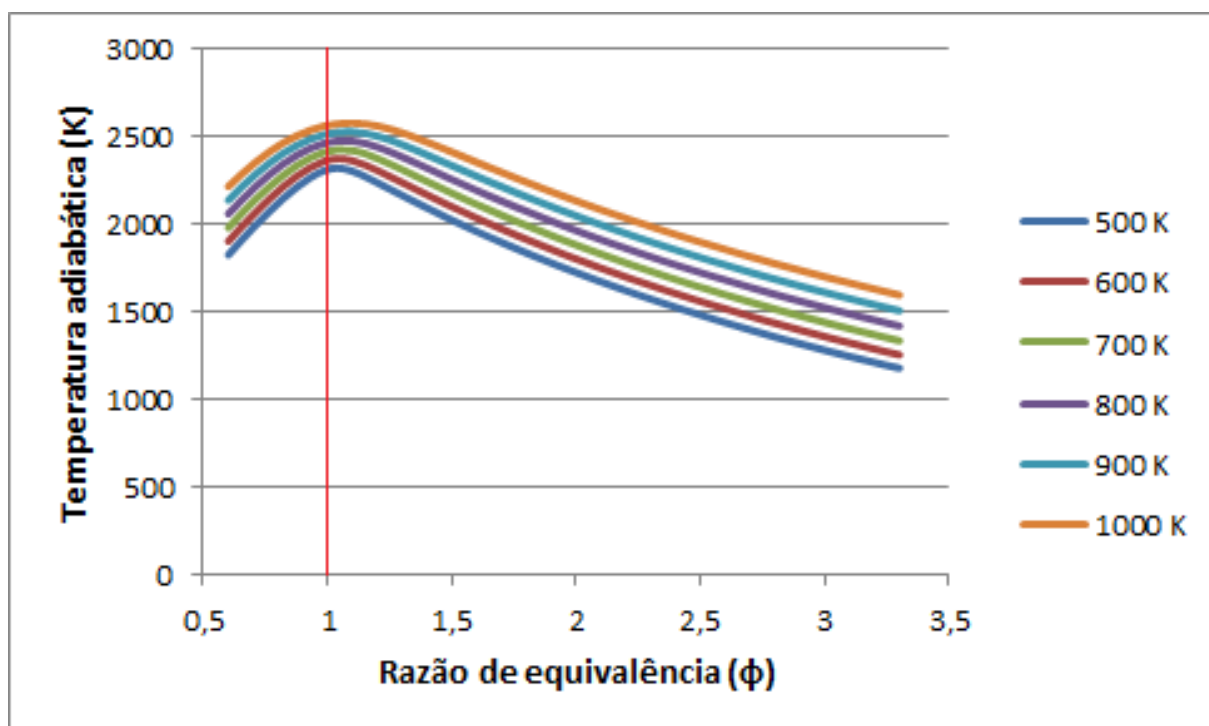


Figura 23 – Temperatura adiabática de chama x Razão de equivalência. Fonte: Autor

Outro ponto de grande importância está relacionado ao fato de que os picos de temperatura adiabática de chama ocorrem quando a razão de equivalência é superior à estequiométrica, confirmando a premissa adotada de que o processo de combustão de um alto forno é regido por uma combustão rica, com excesso de combustível, o que não poderia ser diferente uma vez que a produção é o aspecto mais importante em uma usina siderúrgica, sendo constantemente adotada a inserção de uma parte maior de combustível

para garantir a eficiência do processo.

### •Cogeração e Emissão de Poluentes

Ainda utilizando a ferramenta computacional CANTERA, dos gráficos gerados a partir das frações molares dos produtos obtidos, o ponto mais importante a se observar é a grande diferença entre as frações molares de CO e CO<sub>2</sub>, Figura 25 e Figura 26, respectivamente, presentes no produto final quando comparados com NO e NO<sub>2</sub>. Uma vez que os dois primeiros são frutos da grande concentração de carbono presente no carvão vegetal utilizado na queima, era esperado que houvesse uma superioridade com relação aos demais gases, mas além disso, é importante observar como a concentração destes compostos aumenta gradativamente no decorrer da reação, fato este que não ocorre com a concentração final dos compostos de nitrogênio (N), onde as frações molares destes elementos sofrem uma queda exponencial com o aumento da razão de equivalência.

Outro ponto a ser lembrado na análise das frações molares dos produtos obtidos é que o CO e o CO<sub>2</sub> precisam de um acompanhamento especial no que se refere ao processo pós combustão. A importância do CO, como já foi ressaltada, está relacionada com o processo de cogeração da usina, sendo que este é o principal gás utilizado, e o controle da quantidade de CO que está sendo emitida é de suma importância para garantir que o fluxo do processo seja constante, já que, desconsiderando as manutenções preventivas e alguns problemas mecânicos que fatalmente ocorrem, os altos fornos operam 24 horas por dia.

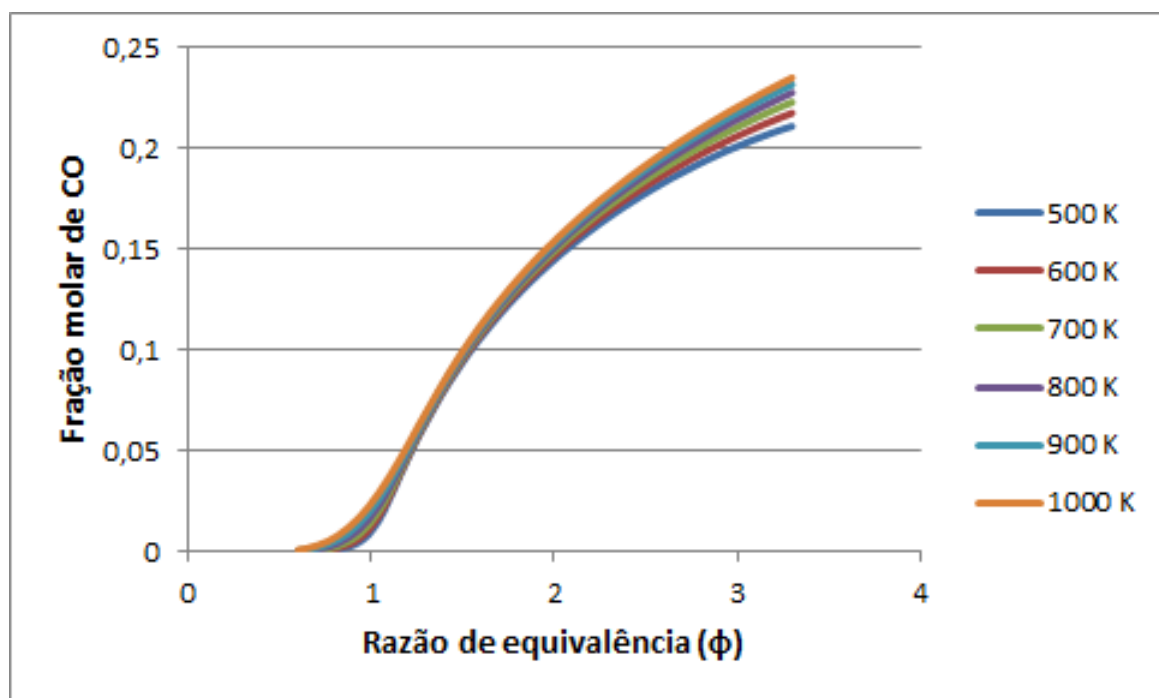


Figura 24 – Fração molar de CO x Razão de equivalência. Fonte:Autor

De acordo com o gráfico acima pode-se perceber que a concentração molar de CO aumenta gradativamente com o aumento da razão de equivalência, lembrado que razões de

equivalências altas estão relacionadas à uma combustão rica, com excesso de combustível. A partir de então pode-se perceber que a fração molar de CO é diretamente proporcional à temperatura analisada e à quantidade de combustível presente na reação, sendo que quanto maior estes parâmetros, maior será a concentração deste elemento.

A partir da análise da Tabela 6, que analisa as características dos combustíveis usados no forno de aquecimento, a curva ótima para o emprego da cogeração é a de 1000K, pois além de possuir o ponto de maior concentração de CO, fazendo com que o poder calorífico ideal seja atingido, é também a curva cuja temperatura está mais próxima à temperatura de ignição, necessária no forno de aquecimento, gerando assim maior eficiência ao processo.

Já o controle do CO<sub>2</sub> se faz necessário devido às questões ambientais nas quais todas as empresas deste tipo são submetidas. Portanto, é necessário saber e acima de tudo comprovar que as emissões de CO<sub>2</sub> estão dentro das normas previamente estabelecidas à usina, para que uma emissão acima do normal possa ser evitada, fato este que, além dos danos ambientais, pode acarretar em prejuízos financeiros à usina.

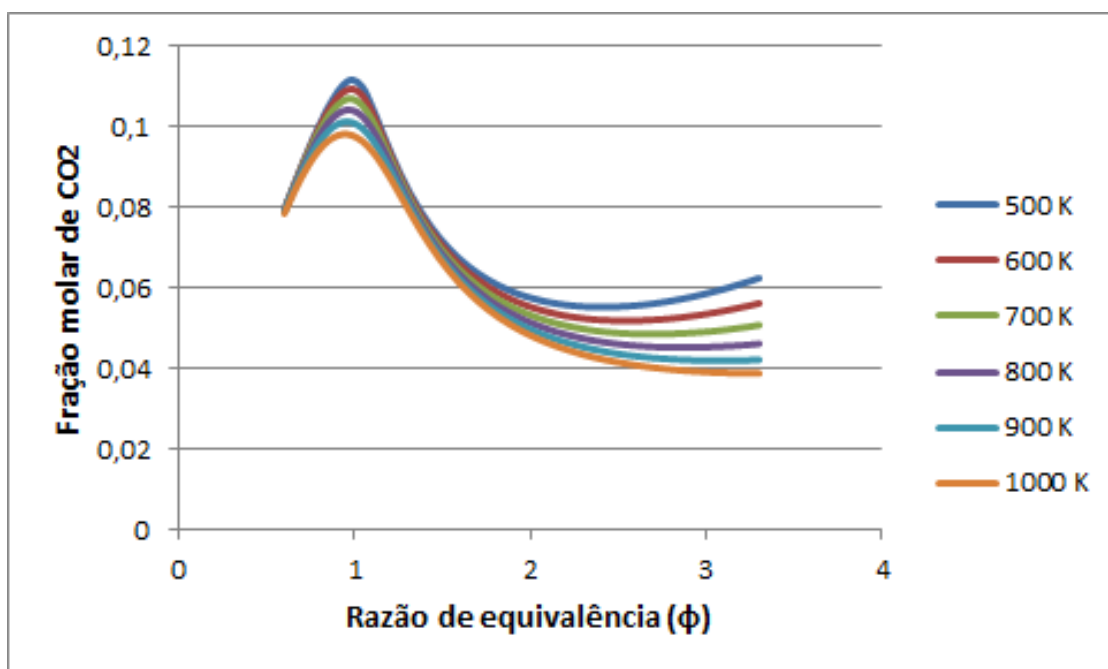


Figura 25 – Fração molar de CO<sub>2</sub> x Razão de equivalência. Fonte: Autor

A seguir, na Figura 27 e na Figura 28, respectivamente, são apresentadas as concentrações molares de NO e NO<sub>2</sub> presentes nos produtos de combustão. Essas curvas são demonstradas exclusivamente com intuito de observar a disparidade encontrada entre as concentrações molares dos compostos de carbono e de nitrogênio, ressaltando que mesmo não estando em grandes quantidades também estão presentes no processo.

O principal ponto destaque das curvas geradas por estes compostos está relacionado com o fato de se comportarem de maneira completamente diferente com relação aos demais

compostos, especialmente quando analisamos os picos de concentração destes elementos, visto que tanto o NO quanto o NO<sub>2</sub> atingem a concentração máxima bem antes da razão estequiométrica, diferentemente do que ocorre com os compostos de carbono. Este fato ocorre claramente pela disparidade entre a quantidade de NO<sub>x</sub> presente no processo quando comparado aos demais reagentes.

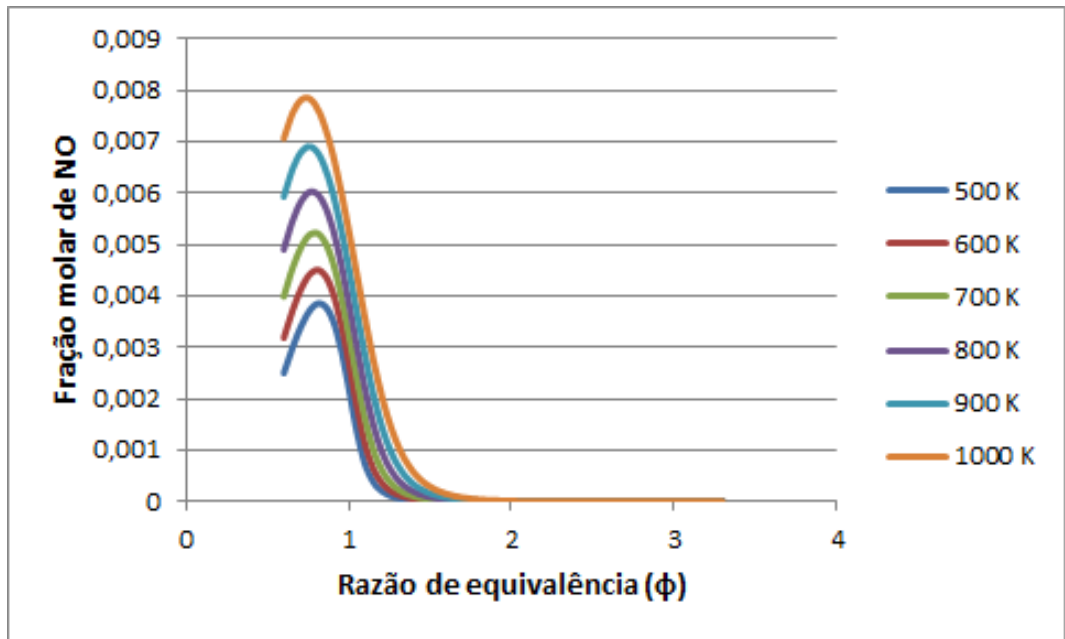


Figura 26 – Fração molar de NO x Razão de equivalência. Fonte: Autor

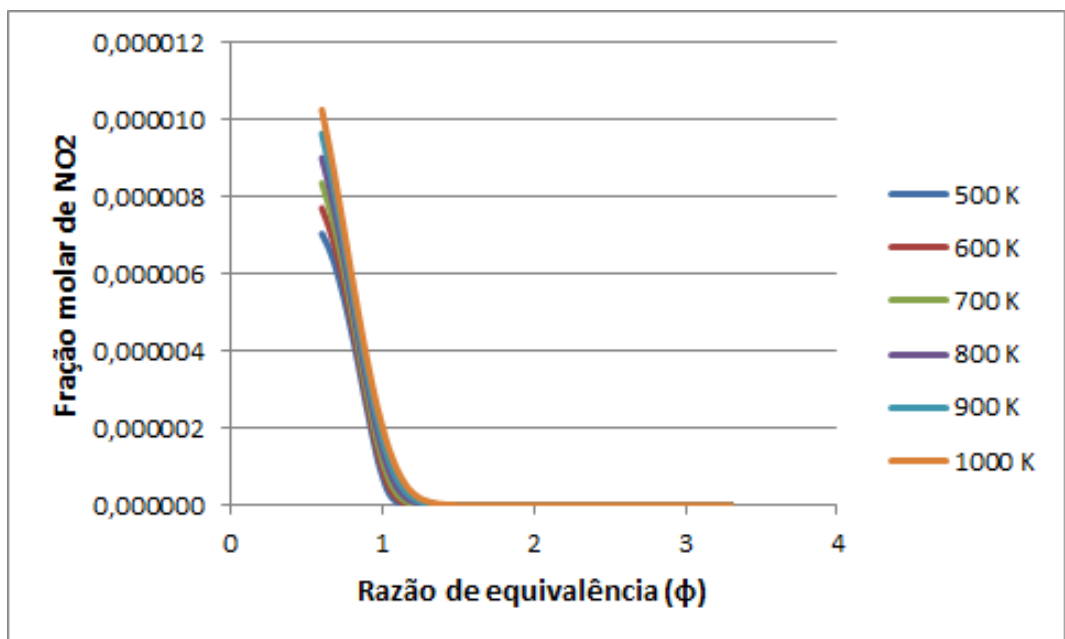


Figura 27 – Fração molar de NO<sub>2</sub> x Razão de equivalência. Fonte: Autor

#### • Velocidade de Propagação de Chama

Utilizando agora a ferramenta computacional CHEMKIN e aplicando os parâmetros descritos anteriormente obtemos as curvas referentes à velocidade de propagação da chama. A princípio, como já era de se esperar, observa-se que quanto maior a temperatura analisada maior será esta velocidade, sendo que o seu pico é atingido em regiões um pouco acima do valor estequiométrico ( $\phi > 1$ ), comprovando novamente a fato de que o processo de combustão dos altos fornos trabalha em um regime de combustão rica. Os resultados são apresentados na Figura 29:

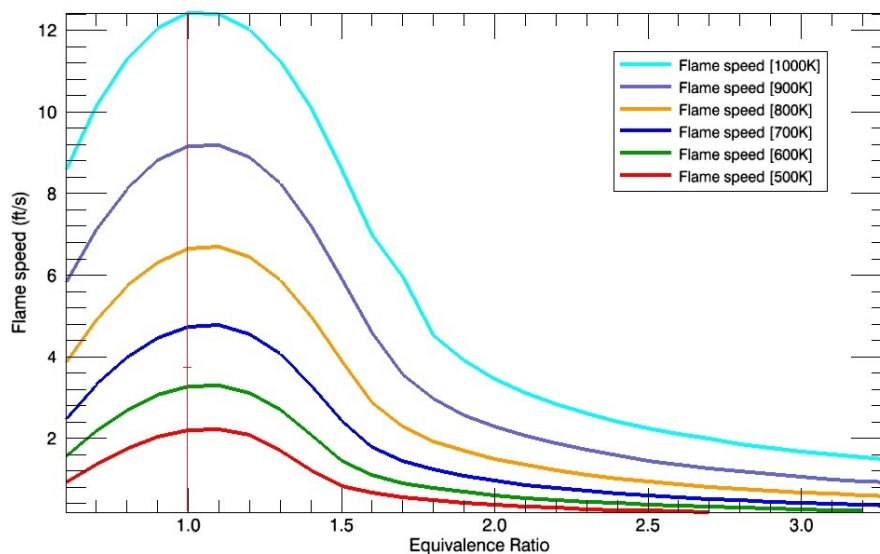


Figura 28 – Velocidade de chama (em km/h) x Razão de equivalência. Fonte:Autor

O pico de velocidade de chama aparentemente pode não parecer tão elevado mas ao analisar todos os parâmetros que foram aplicado no processo conclui-se que esse resultado é bastante compatível com o sistema. Chega-se a essa conclusão tomando como base alguns trabalhos realizados em estudos anteriores (Anexo B) que ao serem analisados podem ser destacados alguns pontos importantes:

- Primeiramente observa-se que as maiores velocidades de chama ocorrem quanto maior a presença de hidrogênio no combustível, tanto que nos estudos em que esse elemento é usado como combustível único são encontrados valores bem elevados. Por isso, pelo fato do H<sub>2</sub> não ter uma concentração tão alta no processo e pela presença de outros gases no combustível, pode-se concluir que a velocidade de propagação de chama alcança valores relativamente altos;

- Outro ponto importante é que os estudos em questão, apresentados no Anexo B, foram realizados com uma pressão de 10 atm, ou seja, bem maior do que a pressão de aproximadamente 4 atm encontrada no interior de um alto forno, gerando assim velocidades de propagação de chama elevadas com relação à pressão imposta;

- Além disso, os compostos de carbono e hidrocarbonetos apresentam as menores

velocidades de chama nas condições apresentadas nos resultados em anexo, e como no processo em questão, boa parte dos gases combustíveis são formados por estes elementos, reforça ainda mais o fato de que os resultados alcançados estão compatíveis ao processo.

Dentre as premissas adotadas quando se trabalha com velocidade de propagação da chama, destaca-se o fato de que a taxa de progresso da zona onde a chama está inserida depende de parâmetros como a taxa de ar fornecido, da velocidade do ar e do poder calorífico dos combustíveis. A importância deste último já está bastante evidenciada ao longo de todo o trabalho, entretanto a partir dos resultados obtidos, pode-se constatar a importância do soprador no processo de combustão de um alto forno, uma vez que é esse o equipamento responsável pela velocidade de alimentação do ar de entrada, e como o processo como um todo necessita de uma alimentação intensa e constante, está justificada a razão pela qual o equipamento deve trabalhar com altas rotações.

Os resultados obtidos também foram gerados com velocidade de propagação de chama em metros por segundo (m/s), conforme a Figura 30:

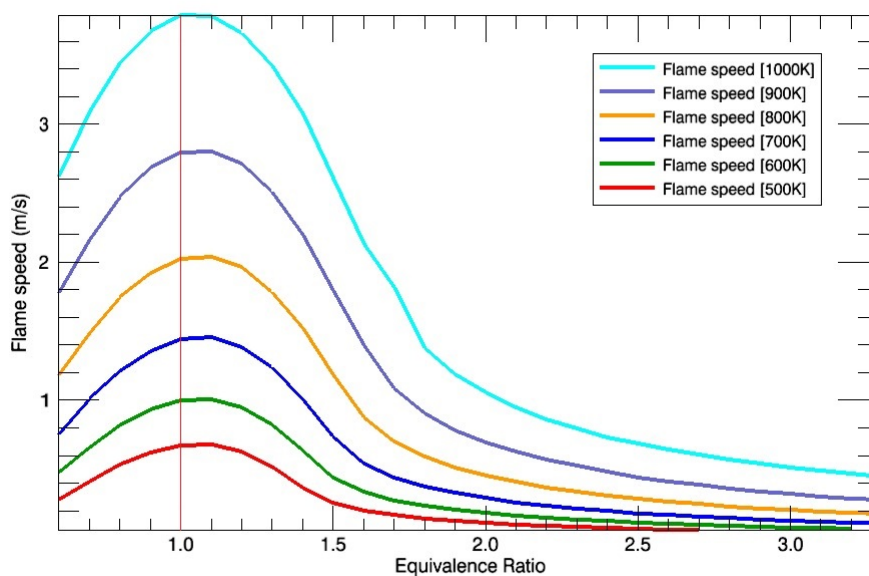


Figura 29 – Velocidade de chama (em m/s) x Razão de equivalência. Fonte: Autor

Outro princípio no qual o estudo foi baseado está relacionado com o fato de que a velocidade de propagação da frente de chama é a velocidade à qual ela se desloca no sentido da mistura para consumi-la, uma vez que esta esteja com uma composição padrão dentro dos limites de inflamabilidade e das condições gerais do processo. Partindo desse conceito, pode-se perceber que mesmo a velocidade de chama tendo atingido valores consideráveis, ainda seria viável para o processo produtivo que estes valores fossem mais elevados, pois a partir do momento em que se trabalha com o fato de que quanto maior a velocidade de propagação de chama, maior será a quantidade de minério de ferro fundido, e maior será a produção. Entretanto, este conceito apresenta algumas dificuldades de concretização

prática ao pressupor uma estabilidade da zona de reação para que seja fisicamente possível de se medir este parâmetro, ou seja, o aumento indevido da velocidade de propagação pode ocasionar uma instabilidade da chama, afetando a combustão como um todo. Além disso, economicamente falando, para que seja aumentada esta velocidade é necessário que seja aumentado proporcionalmente a quantidade de combustíveis injetados e a partir do momento que não se tem a garantia de que haverá a resposta esperada do processo ao realizar-se essas modificações, a mudança destes parâmetros não é aconselhável. Resumindo o que foi dito, no que se refere ao aumento da produtividade uma pequena otimização do processo pode ser feita ajustando a velocidade de ar injetado com a quantidade de combustíveis, mas que fique bem claro que a o aumento exacerbado desses dois parâmetros não significa que teremos reações mais rápidas e muito menos garante um aumento de produção.

Fazendo um análise geral dos resultados tanto da temperatura adiabática quanto da velocidade de propagação de chama e tomando novamente os resultados do Anexo B como parâmetros, pode-se concluir que a eficiência das temperaturas envolvidas no processo é o principal parâmetro a ser estudado quando se analisa a combustão de um alto forno. Este fato fica evidenciado pelo fato de os resultados alcançados apresentarem curvas de temperatura adiabática de chama similares e de velocidade de chama superiores aos resultados em anexo mesmo adotando uma pressão bem inferior (10 atm contra 4 atm). É nítido que ainda há diferenças entre a concentração dos elementos combustíveis, entretanto, devido à grande diferença observada, subentende-se que os intervalos de temperatura adotados tiveram uma maior relevância para o processo, evidenciando ainda mais a importância de equipamentos como os glêndons no sistema de combustão de um alto forno.



## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 COMENTÁRIOS

Ao fim deste trabalho, pode-se perceber que seu objetivo foi alcançado. A análise do processo de combustão de um alto forno apresentou resultados compatíveis com os resultados reais dentro das limitações envolvidas com relação aos parâmetros adotados e às ferramentas computacionais utilizadas. O mais importante é que foi possível avaliar o comportamento do desempenho do equipamento, frente à variação de parâmetros como o intervalo de temperatura adotado e a pressão imposta ao sistema, chegando à conclusão que cerca de 700 K são gerados para o aquecimento das paredes internas do alto forno, proporcionando um pico de temperatura adiabática de chama acima de 2500 K, 700 K a mais do que a temperatura de fusão completa do aço. Além disso, os resultados encontrados para a velocidade de propagação de chama estão dentro do esperado de acordo com os parâmetros do processo, sendo que o pico atingido de 12 km/h está compatível, principalmente, com o fluxo de carga que entra no alto forno.

O incremento de eficiência é bem pequeno, principalmente pelo fato de esbarrar em questões como a estabilidade da chama, o que não permite que a quantidade de combustível inserido seja maior do que o ideal, visando uma maior velocidade de chama e conseqüentemente uma maior produtividade. Isso indica que o melhoramento no desempenho do processo de combustão de um alto forno não está relacionada unicamente com a quantidade de combustível envolvido e sim com a associação deste parâmetro com a quantidade do fluxo de ar que está sendo adicionado, necessitando de um entrosamento perfeito entre glendons, sopradores e quantidade de combustível para que haja um ponto ótimo de execução do processo.

Foi possível também observar a grande quantidade de emissões que é gerada pelo sistema de combustão dos altos fornos, entretanto, foi mais importante ainda acompanhar a metodologia implantada para que esses gases não sejam emitidos diretamente para a atmosfera e simultaneamente fazer parte de outros processos pertencentes ao sistema de cogeração implantado nas usinas, concluindo ser possível o reaproveitamento do poder calorífico desses elementos conquistando, acima de tudo, uma maior economia ao processo.

Como conclusão final deste trabalho, destaca-se o fato de que quando se trabalha com a análise de eficiência energética de um processo, qualquer ponto que seja capaz de fornecer uma potencial viabilidade de otimização deve ser estudado e trabalhado intensamente, principalmente quando se trata de grandes usinas e de grandes valores envolvidos em uma linha de produção, uma vez que, um pequeno implemento que passa despercebido por muitos pode significar um ganho milionário para a empresa quando é feito um balanço final do processo. Com relação a isso, os resultados obtidos com relação à velocidade de propagação de chama e à cogeração realizada a partir do reaproveitamento

de parte dos gases de escape foram bem encaminhados para atingir a meta da maior eficiência possível, entretanto, com os picos de temperatura adiabática obtido, observou-se que grande quantidade de energia utilizada para a realização de tarefas que não darão um retorno efetivo ao sistema de produção, tornando-se interessante um estudo que aborde a diminuição da energia gasta para esses fins ou que haja algum sistema que possa reaproveitá-la.

A seguir são apresentados algumas outras sugestões de estudos posteriores que podem vir a contribuir para a garantia de uma melhor eficiência energética do processo siderúrgico como um todo:

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

A partir do momento em que é criada uma linha de produção, garantir que a maior eficiência energética seja atingida é um grande desafio para todos os envolvidos no projeto. Quando se trata de um processo que envolve grande quantidade de energia térmica e intensas transferências de calor, como é o caso de uma siderúrgica, esse desafio se estende ainda mais. Por isso, no decorrer deste trabalho foram relatados alguns pontos que já estão sendo estudados e outros que podem ser temas de trabalhos futuros visando alcançar a máxima eficiência possível. Dentre eles destacam-se:

- Processo de enforamento a quente: Como foi comentado, a quantidade de tarugos necessária para o carregamento completo do forno de reaquecimento (FRT), na laminação, é superior à quantidade de tarugos produzidos pela lingoteira, na aciaria. Com isso, no intervalo de tempo em que o FRT está em aquecimento, os tarugos recém gerados ficam esperando o descarregamento do mesmo, fatalmente acabam perdendo grande quantidade de calor, e quando finalmente chega a hora de ser laminado, é necessária uma maior potência do forno para suprir o calor que o tarugo perdeu ao ficar exposto no ambiente. Por isso, algum projeto que alinhasse a capacidade de produção da lingoteira e do forno de reaquecimento seria algo extremamente válido.

- O segundo ponto está relacionado com o consumo energético do forno elétrico a arco (FEA), que consome uma elevada quantidade de energia elétrica sem que haja nenhum processo de reaproveitamento do calor que é liberado. Este vem sendo um dos principais pontos de estudo das siderúrgicas, visto que este equipamento é a maior fonte de gastos da usina. Talvez um sistema semelhante ao dos altos fornos, que captasse pelo menos o poder calorífico dos gases liberados para uma posterior reutilização já seria um bom começo. Entretanto, a diminuição do consumo energético propriamente dito do FEA é algo bastante complexo, sendo necessária a participação de profissionais da parte elétrica para elaboração do escopo principal do projeto.

- Já com relação aos altos fornos especificamente, um ponto a ser trabalhado com

relação à eficiência energética do equipamento é a possibilidade de implantação do maior número de ventaneiras possível, já que, como foi dito, quanto maior este número, mais eficiente será o processo de combustão. Entretanto, como foi ressaltado também, para o aumento deste número é necessário o aumento do diâmetro do alto forno, o que fatalmente acarretaria na substituição do equipamento, o que seria economicamente inviável para qualquer usina que busque melhores resultados financeiros. Entretanto, o dimensionamento das ventaneiras para que possa ser implantado o maior número possível sem alterar as configurações iniciais do alto forno também pode ser um tópico a ser discutido mais à frente.

- Por fim, ainda nos altos fornos, vimos que, como resultado obtido deste estudo, a temperatura adiabática de chama está consideravelmente acima do ponto de fusão do minério de ferro, ou seja, há uma determinada quantidade de energia térmica sendo liberada. É fato que boa parte desta perda é compensada pelo processo de cogeração do CO, como foi apresentado, mas, se houvesse algum sistema que otimizasse ainda mais esse processo, diminuindo essa perda de temperatura, a eficiência energética do sistema seria ainda melhor.

## REFERÊNCIAS

- [1] Grupo ARCELORMITTAL -<http://brasil.arcelormittal.com.br> - Acessado em junho de 2017
- [2] SILVA, J.N.S.,(2011), Siderurgia - Escola Técnica Aberta do Brasil - Belém : IFPA : Santa Maria : UFSM.
- [3] ASSUNÇÃO, C.S., (2006), Siderurgia - Glendon siderúrgico: análise termodinâmica e modelagem matemática simplificada; Universidade Federal de Minas Gerais.
- [4] CASTRO, L.F.A,(2005), Melhorias operacionais em Altos-Fornos com Stave-Cooler. Belo Horizonte: Vallourec e Mannesmann do Brasil.
- [5] ASSUNÇÃO, C. S.,(2009) Redução do consumo de oxigênio em um alto-forno a partir do aumento da eficiência energética dos trocadores de calor. In: Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais; Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, São Paulo, p. 85-94.
- [6] VALLOUREC E MANNESMAN DO BRASIL,(2008), PIMS – Process Information Management System. Belo Horizonte.
- [7] MOORE, J. J., BOYCE, E. A., BROOKS, M. J.,(2013), Chemical Metallurgy, 1st Edition - Butterworth-Heinemann.
- [8] CHEMKIM - PRO, (2013), "Combustion Simulation Software", ANSYS Reaction Design.
- [9] CANTERA (2012), "Chemical Kinetics, Thermodynamics, Transport Process".
- [10] LACAVAL, P. T.,(2014), Elementos de Combustão - Capítulo 1 – Termoquímica: Balanços de Massa e Energia - São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Departamento de Propulsão.
- [11] BORMAN, G. L., RAGLAND, K. W.,(1998), Combustion Engineering, McGraw-Hill.
- [12] LEFEBVRE, A. H., BALLAL, D. R.,(2010), GAS Turbine Combustion - Alternative Fuels and Emissions; Third Edition.
- [13] VLASSOV, D.(2008), Fundamentos de combustão;
- [14] CHIAVERINI, V.,(1986), Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento; Volume 2, Segunda edição.
- [15] BOHORQUEZ, Washington Orlando Irrazabal,(2016), Notas de aula - Fundamentos de Combustão, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica; Universidade Federal de Juiz de Fora.
- [16] POINSOT, T., VEYNANTE, Denis,(2005), Theoretical and Numerical Combustion,

Second Edition;

- [17] CARVALHO, P. S. L.,(2015), Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, n. 41, Rio de Janeiro, p. 181-236.
- [18] METALSIDER LTDA/Z1 MOTION, (2010). Disponível em:<http://www.metalsider.com.br/>. Acessado em março de 2017.
- [19] GERDAU AÇOS ESPECIAIS; Disponível em: [www.gerdau.com/br/pt](http://www.gerdau.com/br/pt). Acessado em abril de 2017.
- [20] DOS SANTOS, H. S. O.,(2013), Minimização do custo energético de um forno de reaquecimento de tarugos utilizando algoritmos genéricos - Belo Horizonte.
- [21] HAUCK, G. A. C., LAIA, L.L.,(2002), Fornos de Reaquecimento. São Paulo - SP: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- [22] CAVALCANTI, P. P. S.,(2012), Gestão ambiental na indústria siderúrgica - Aspectos relacionados às emissões atmosféricas; Rio de Janeiro.
- [23] BRASIL - RESOLUÇÃO CONAMA n 382/06, (2006).
- [24] JÚNIOR, D. S. S.(2007), Estudo do Comportamento de Escórias de Alto-Forno a Carvão Vegetal Produzidas a Partir de Ativação à Quente. Belo Horizonte.
- [25] BIZZO, W. A.,(2003), Geração, Distribuição e Utilização de Vapor, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- [26] ARAÚJO, L. A.,(1997), Manual de Siderurgia - Producao - Vol 1.
- [27] PINHO, C. M. C. T. de, (2014), Sistemas Térmicos - Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade do Porto (FEUP).

## APÊNDICE A - Características Operacionais dos Altos Fornos

### ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS ALTOS FORNOS

Volume útil	257	m <sup>3</sup>	
Volume interno	285	m <sup>3</sup>	
Diâmetro do cadinho	4,30	m <sup>3</sup>	
Diâmetro do topo	3,75	m <sup>3</sup>	
Número de ventaneiras	12		
Temperatura do vento	800	oC	
Vazão de vento nominal	28000	Nm <sup>3</sup> /h	
Vazão de vento máxima	36000	Nm <sup>3</sup> /h	
Consumo de ar úmido/tgusa	1300	Nm <sup>3</sup> /t	
Vazão de gas gerado	59000	Nm <sup>3</sup> /h	
Pressão de gás no topo	0,35	bar	máx
Dias de operação por ano	350	dias	
<b>Produção prevista de gusa</b>			
	Normal	Máxima	
Produtividade	2,00	2,50	t/m <sup>3</sup> V.U./dia
Hora	21,41	26,76	t/h
Dia	514	642	t/dia
Mes	15420	19260	t/mes
Ano	180000	225000	t/ano
<b>Descarga de carvão</b>			
Volume por caminhão		100	m <sup>3</sup>
Disponibilidade		50%	
Horas/dia		12	
Capacidade silo descarga		115	m <sup>3</sup>
Capacidade correia		400	m <sup>3</sup> /h
Tempo transporte/caminhão		100m <sup>3</sup> /400m <sup>3</sup> /h	15 min m <sup>3</sup> /h, 4 caminhões/hora
Capacidade máxima		400	m <sup>3</sup>
Capacidade máxima de descarga/dia		400 m <sup>3</sup> x 12	4.800 m <sup>3</sup>
Produção nominal dos 2 Afs		1.028	t/dia
Consumo nominal de carvão/dia	2,98 m <sup>3</sup> x 1.028 =	3.073 m <sup>3</sup>	
Números de caminhão descarregados/dia		3.073/100 =	30,7
Fator de projeto		4.800/3.073 =	1,56
<b>Descarga de minério</b>			
Peso líquido/caminhão		30 ton	(12,88 m <sup>3</sup> )
Disponibilidade		50	%
Horas funcionamento/dia		12	h
Consumo específico M. Fe	1.556 kg/t (0,667m <sup>3</sup> /ton.		
	Gusa)		
Capacidade silo descarga		13	m <sup>3</sup>
Capacidade da correia		180	m <sup>3</sup> /h
Tempo de transporte de 1 caminhão	12,88 ton/180 t/h =	4,24 min	
Capacidade máxima de descarga/dia	180 m <sup>3</sup> x12 =	2.160 m <sup>3</sup>	
Produção nominal dos 2 Afs		1.028	t/dia
Consumo de M. Fe e fundentes/dia	(0,667 + 0,0915) x 1.028 =	779 m <sup>3</sup>	
Números de caminhões descarregando por dia		13,9	(180÷12,88)

APÊNDICE B - Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas

Unidade de produção	Fontes de emissão pontual	MP <sup>(1)</sup>	SO <sub>2</sub> <sup>(2)</sup>	NOx <sup>(1)</sup> (como NO <sub>2</sub> )	% O <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>
Coqueria	Sistema de despoeiramento do desenformamento	40	N.A.	N.A.	N.A.
	Câmara de combustão dos fornos de coque	50	800	700	7%
Sinterização	Sistema primário de despoeiramento	70	600	700	NA'
	Sistema secundário de despoeiramento	70	N.A.	N.A.	
Alto forno a coque	Sistema de despoeiramento da casa de estocagem	40	N.A.	N.A.	
	Sistema de despoeiramento da casa ou ala de corrida	40	N.A.	N.A.	
Alto forno a carvão vegetal	Sistema de despoeiramento da casa de estocagem	50	N.A.	N.A.	
	Sistema de despoeiramento da casa ou ala de corrida	50	N.A.	N.A.	
Aciaria LD	Sistema primário de despoeiramento	80	N.A.	N.A.	
	Sistema secundário de despoeiramento	40	N.A.	N.A.	
	Sistema de despoeiramento da dessulfuração de gusa	40	N.A.	N.A.	
	Sistema de despoeiramento dos fornos de cal	100	N.A.	470	
Aciaria elétrica	Sistemas primário e secundário de despoeiramento (2)	≤ 50 t/c: 50 > 50 t/c: 40	N.A.	N.A.	N.A.
Laminação	Fornos de reaquecimento de placas com queima de gases siderúrgicos	50	800	700	7%
Pelotização	Sistema de exaustão do forno de pelotização	70	700	700	N.A.
Central termelétrica	Caldeira com queima de gases siderúrgicos	50	600	350	5%

(1) os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm<sup>3</sup>, em base seca e no teor de O<sub>2</sub> explicitado. (2) t/c = toneladas de aço/corrida. N.A. - Não Aplicável

## Anexo A - Temperatura adiabática de chama - Código utilizado na linguagem PYTHON

```

"""
Adiabatic flame temperature and equilibrium composition for a fuel/air mixture
as a function of equivalence ratio, including formation of solid carbon.
"""

import cantera as ct
import numpy as np
import sys
import csv

#####
# Edit these parameters to change the initial temperature, the pressure, and
# the phases in the mixture.

T = 500.0
P = 4*101325.0

# phases
gas = ct.Solution('gri30.xml')
carbon = ct.Solution('graphite.xml')

# the phases that will be included in the calculation, and their initial moles
mix_phases = [ (gas, 1.0), (carbon, 0.0)]

# gaseous fuel species
fuel_species = 'CO:0.15,CO2:0.15,H2:0.3,CH4:0.3,H2O:0.05,N2:0.05'

# equivalence ratio range
npoints = 50
phi = np.linspace(0.6, 3.3, npoints)

#####

mix = ct.Mixture(mix_phases)

# create some arrays to hold the data
tad = np.zeros(npoints)
xeq = np.zeros((mix.n_species,npoints))

for i in range(npoints):
    # set the gas state
    gas.set_equivalence_ratio(phi[i], fuel_species, 'O2:1.0, N2:3.76')

    # create a mixture of 1 mole of gas, and 0 moles of solid carbon.
    mix = ct.Mixture(mix_phases)
    mix.T = T
    mix.P = P

    # equilibrate the mixture adiabatically at constant P
    mix.equilibrate('HP', solver='gibbs', max_steps=1000)

    tad[i] = mix.T
    print('At phi = {0:12.4g}, Tad = {1:12.4g}'.format(phi[i], tad[i]))
    xeq[:,i] = mix.species_moles

# write output CSV file for importing into Excel
csv_file = 'adiabatic.csv'
with open(csv_file, 'w') as outfile:
    writer = csv.writer(outfile)
    writer.writerow(['phi', 'T (K)'] + mix.species_names)

```

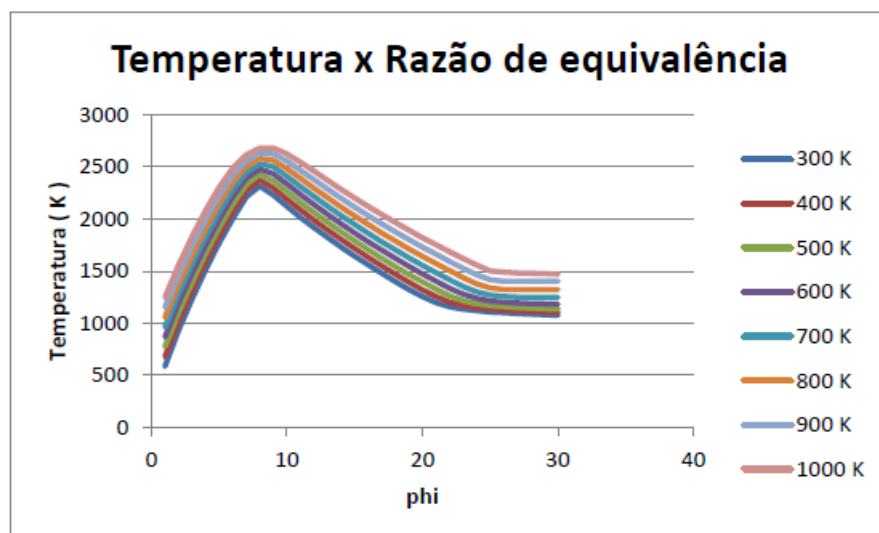


## ANEXO B - Resultados obtidos para a combustão de diferentes elementos

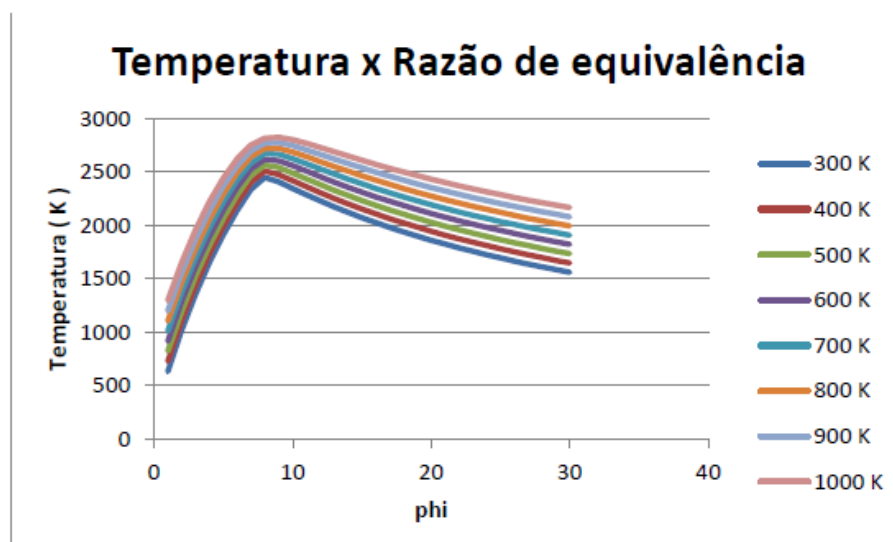
Os resultados a seguir foram gerados a partir de simulações numéricas desenvolvidas na disciplina "Fundamentos de Combustão", disponibilizada pelo Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica da UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.

- Combustível: hidrogênio ( $H_2$ ), propano ( $C_3H_8$ );
- Oxidante: Ar (oxigênio + nitrogênio);
- Razão de equivalência: 0,1 até 4;
- Temperatura de entrada no combustor: 300K até 1000K;
- Pressão de entrada no combustor: 700 kPa (T. Adiabática) e 1000kPa (V. de chama)

### • PROPANO ( $C_3H_8$ ):

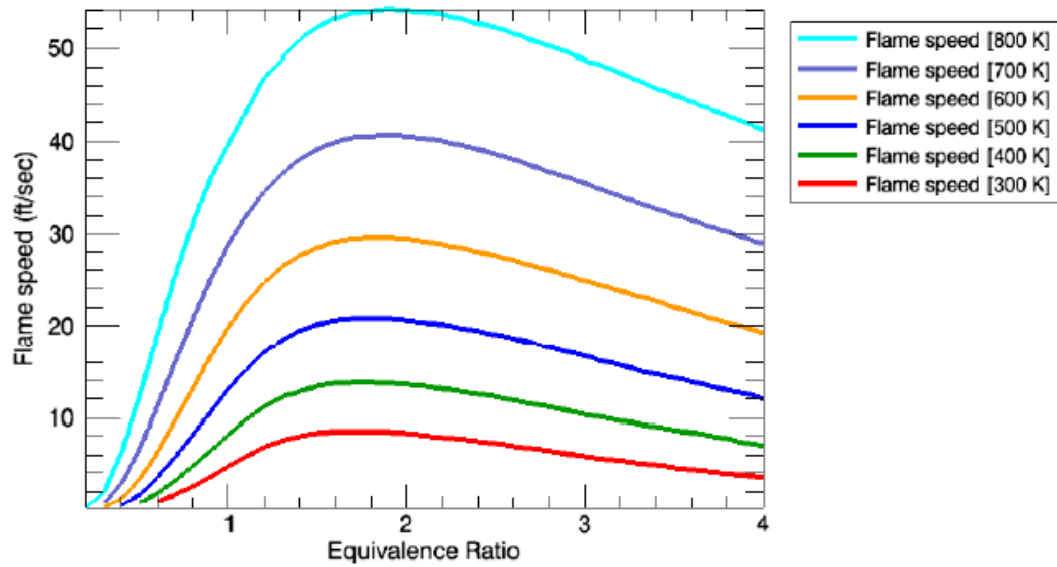


### • HIDROGÊNIO



## ➤ Hidrogênio (H<sub>2</sub>)

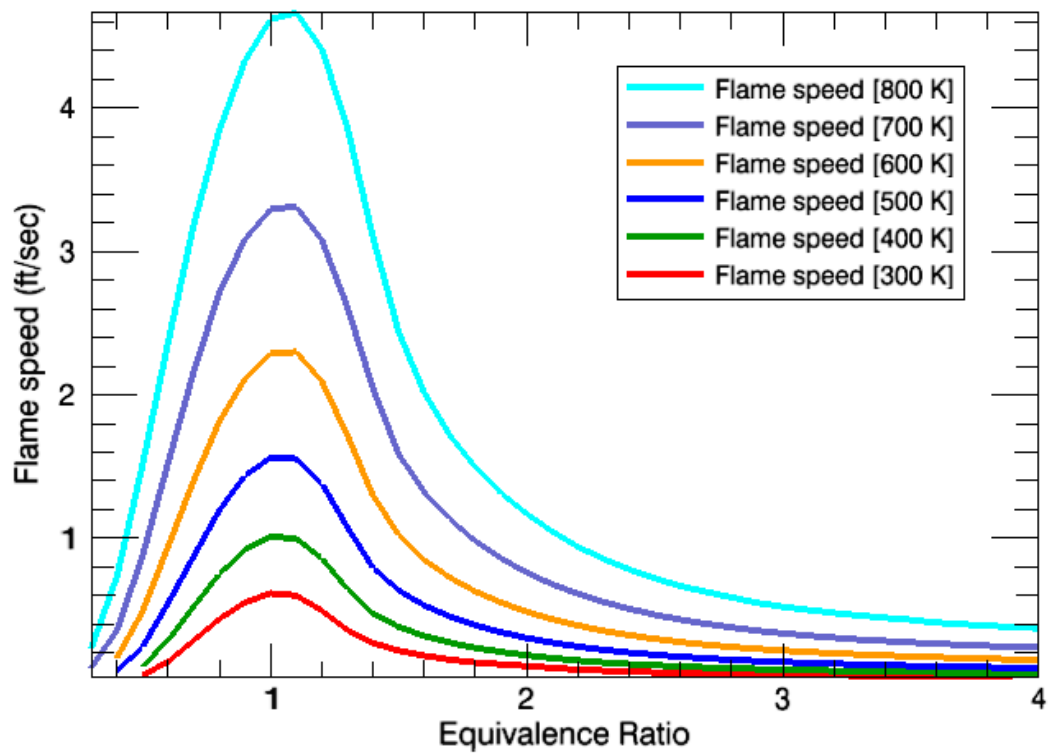
H<sub>2</sub> - Air Flame Speed 10 atm



H<sub>2</sub> - Air Flame Speed 10 atm

## ➤ Propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> - Air Flame Speed 10 atm



C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> - air Flame Speed 10 atm

## ANEXO C - Termo de Autenticidade

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 20 de Junho de 2017.

---

Emanuel Ferreira e Sousa – Discente  
Matrícula: 201271100 – CPF: 103.606.836-65

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.