

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**VARIAÇÕES NA POTÊNCIA DE TURBINAS A GÁS PELA ADIÇÃO DE VAPOR  
D'ÁGUA EM SEUS COMBUSTORES**

**EVANDRO NUNES SOUZA**

**Orientador: Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA**

**Monografia apresentada a faculdade de  
Engenharia Mecânica da UniRV –  
Universidade de Rio Verde – Como parte das  
exigências para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.**

**RIO VERDE – GOIÁS**

**2014**

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**VARIAÇÕES NA POTÊNCIA DE TURBINAS A GÁS PELA ADIÇÃO DE VAPOR  
D'ÁGUA EM SEUS COMBUSTORES**

**EVANDRO NUNES SOUZA**

**Orientador: Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA**

**Monografia apresentada a faculdade de  
Engenharia Mecânica da UniRV –  
Universidade de Rio Verde – Como parte das  
exigências para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.**

**RIO VERDE – GOIÁS**

**2014**

SOUZA, Evandro Nunes.

Variações na Potência de Turbinas a Gás Pela Adição de Vapor D'Água em seus Combustores / por Evandro Nunes Souza - Rio Verde, Goiás: 2014.

53 f.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) apresentada à Universidade de Rio Verde – UniRV, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2014.

Orientador: Paulo Henrique Neves Pimenta

1. Óxidos de Nitrogênio. 2. Potência. 3. Vapor d'água.



## FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

### VARIAÇÕES NA POTÊNCIA DE TURBINAS A GÁS PELA ADIÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA EM SEUS COMBUSTORES.

**EVANDRO NUNES SOUZA**

Esta monografia foi julgada adequada para a obtenção do grau de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA** e aprovada em sua forma final na data 09/12/2014.

**Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA**

**Orientador**

**Prof. Dr. Warley Augusto Pereira**

**Examinador**

**Prof. Rodrigo Francisco Borges Lourenço**

**Examinador**

**Prof. Ms. João Pires de Moraes**

**Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta monografia aos meus pais, Duglaci Souza Lima e Jaci Nunes Borges Souza, aos meus irmãos, Elenizia Nunes Souza, Enaldo Nunes Souza Garcia, Erlando Nunes Souza Natal e Coriolano Nunes Borges, e a minha namorada Nataliude Ferreira Silva. Também agradeço a meus avós, Abel Nunes Borges, Antônia Nunes dos Santos, Francisco Souza Lima e Ana Gomes de Lima (In memória), que embora não estejam mais entre nós, sei que, onde quer que estejam, estão torcendo por mim.

Amo todos vocês!

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus, por me conceder a oportunidade de vir a esse mundo e demonstrar minha capacidade.

Ao professor Paulo Henrique Neves Pimenta, pelo tempo dedicado à orientação deste trabalho e pelas palavras de incentivo.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde, que transmitiram seus conhecimentos e experiências durante esses cinco anos de graduação.

Aos meus amigos e colegas de graduação cujos nomes não citarei por risco de cometer algum esquecimento imperdoável.

Aos meus pais, Duglaci Souza Lima e Jaci Nunes Borges Souza, aos meus irmãos, Elenizia Nunes Souza, Enaldo Nunes Souza Garcia, Erlando Nunes Souza Natal e Coriolano Nunes Borges, e a minha namorada Nataliude Ferreira Silva, que me apoiaram em todas as horas de dificuldades, nunca me permitiram baixar a cabeça, sempre compreenderam a minha falta de tempo e, às vezes, minha falta de paciência para com eles. Obrigado!

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

SOUZA, E. N. **VARIAÇÕES NA POTÊNCIA DE TURBINAS A GÁS PELA ADIÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA EM SEUS COMBUSTORES.** 2014. 53f. Monografia<sup>1</sup> (Graduação em Engenharia Mecânica) – UniRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2014.

Turbinas a gás são muito utilizadas na geração de eletricidade, no entanto nesse tipo de equipamento ocorre o processo de combustão em altas temperaturas, formando NOx. Devido à emissão de poluentes na atmosfera, a camada de Ozônio está diminuindo, e o resultado disso é o aumento da radiação solar que chega a terra, acarretando o efeito estufa. Os compostos da família NOx são um dos grandes poluentes do ar, esse tipo de gás é formado principalmente em processos de combustão, onde devido a alta temperatura da chama, o nitrogênio reage com o oxigênio. A adição de vapor d'água no combustor de turbinas a gás é uma alternativa na redução da emissão desses poluentes, pois reduz a temperatura máxima das chamas e conseqüentemente as emissões de NOx, entretanto esse processo diminui a potência desenvolvida pela turbina. Comparando os valores sem adição e com adição de vapor d'água no combustor da turbina SGT-500, verifica que o equipamento em estudo proporciona uma potência de 91065KW e  $2,84 \times 10^{-8}$  [g/Kgcomb] de NOx formado, por meio do processo de combustão da turbina a gás sem adição de vapor d'água no combustor. Logo que se adiciona vapor d'água no combustor da turbina, a potência e a quantidade de NOx formado é reduzida. Quando se adiciona 10% de vapor d'água na combustão, tem-se uma redução de 8% na potência e 23% na emissão de NOx.

## PALAVRAS-CHAVE

Óxidos de nitrogênio, potência, vapor d'água.

---

<sup>1</sup> **Orientador:** Prof. Paulo Henrique Neves Pimenta; Prof. Dr. Warley Augusto Pereira; Prof. Rodrigo Francisco Borges Lourenço.

## ABSTRACT

SOUZA, E. N. **CHANGES IN GAS TURBINE POWER BY STEAM ADD WATER IN YOUR COMBUSTORS**. 2014. 53f. Monograph <sup>2</sup> (Graduation in Mechanical Engineering) - UniRV - University of Rio Verde, Rio Verde, 2014.

Gas turbines are widely used in electricity generation, however this type of equipment is the combustion process at high temperatures, forming NO<sub>x</sub>. Due to the emission of pollutants in the atmosphere, the ozone layer is shrinking, and the result is increased solar radiation reaching the earth, causing the greenhouse effect. NO<sub>x</sub> family of compounds are one of the major air pollutants, such gas is formed primarily from combustion processes, where due to high flame temperature, nitrogen reacts with oxygen. The addition of water vapor in the gas turbine combustor is an alternative to reduce the emission of these pollutants, as it reduces the maximum flame temperature and hence NO<sub>x</sub> emissions, however this process decreases the power developed by the turbine. Comparing the values without addition and with addition of water vapor in the SGT-500 turbine combustor, verifies that the equipment provides a power study 91065KW and  $2.84 \times 10^{-8}$  [g / Kgcomb] NO<sub>x</sub> formed through the combustion process of the gas turbine without the addition of vapor water into the combustor. Once the water vapor is added to the turbine combustor, the power and the amount of NO<sub>x</sub> formed is reduced. When you add 10% of water vapor in the combustion, it has been a reduction of 8% in power and 23% in NO<sub>x</sub> emissions.

## KEY WORDS

Nitrogen oxides, power, water vapor.

---

<sup>2</sup>**Advisor:** Prof. Paulo Henrique Neves Pimenta; Prof. Dr. Warley Augusto Pereira; Prof. Rodrigo Francisco Borges Lourenço.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Turbina Whittle. ....	14
FIGURA 2: Ciclo Brayton.....	18
FIGURA 3: Diagrama P x V e T x S.....	19
FIGURA 4: Motor térmico. ....	20
FIGURA 5: Turbina SGT-500.....	21
FIGURA 6: Potência em relação a quantidade de vapor d'água adicionado. ....	43
FIGURA 7: Massa de NOx em função da porcentagem de vapor d'água adicionado. ....	44
FIGURA 8: Porcentagem de redução da potência e do NOx após adicionar vapor d'água. ....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Família dos compostos nitrogenados.....	31
TABELA 2- Entalpia dos Reagentes.....	40
TABELA 3- Entalpia dos Produtos.....	40
TABELA 4 - Porcentagem de vapor sobre o fluxo de combustível.....	42
TABELA 5- Percentual de cada componente do ar.....	43

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

$AC_{mássica}$	Relação ar-combustível na base mássica $\left[\frac{\text{Kg}_{\text{ar}}}{\text{Kg}_{\text{comb}}}\right]$
$AC_{molar}$	Relação ar-combustível na base molar $\left[\frac{\text{Kmol}_{\text{ar}}}{\text{Kmol}_{\text{comb}}}\right]$
$CA_{mássica}$	Relação combustível-ar na base mássica $\left[\frac{\text{Kg}_{\text{comb}}}{\text{Kg}_{\text{ar}}}\right]$
$CA_{molar}$	Relação combustível-ar na base molar $\left[\frac{\text{Kmol}_{\text{comb}}}{\text{Kmol}_{\text{ar}}}\right]$
$h$	Entalpia específica na base mássica $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
$\bar{h}$	Entalpia específica na base molar $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}\right]$
$\bar{h}_f^0$	Entalpia específica de formação na base molar $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}\right]$
$H$	Entalpia [KJ]
$m$	Massa [Kg]
$M$	Peso molecular $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}\right]$
$n$	Numero de mol`s
$\eta_t$	Rendimento térmico
$ppmv$	Partes por milhão
$P$	Pressão [KPa]
$\bar{q}_{V.C}$	Taxa de transferência de calor específico na base molar $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}_{\text{comb}}}\right]$
$q$	Taxa de transferência de calor específico na base mássica $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
$\dot{Q}_{V.C}$	Calor específico [KW]
$RPM$	Rotação por minuto
$T$	Temperatura [K]
$u$	Energia interna específica na base molar $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}\right]$
$\bar{u}$	Energia interna de combustão $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}\right]$
$V$	Volume [ $\text{m}^3$ ]

$\bar{V}$	Volume específico na base molar $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}\right]$
$W$	Trabalho [KJ]
$\phi$	Relação de equivalência
$\Delta\bar{h}$	Variação da entalpia específica na base molar $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{kmol}}\right]$
$\Delta H$	Variação da entalpia[KJ]

### Subscritos

<i>ar</i>	Ar
<i>comb</i>	Combustível
<i>e</i>	Entrada
<i>i</i>	Inicial
<i>P</i>	Produto
<i>R</i>	Reagente
<i>s</i>	Saída
<i>V.C</i>	Volume de controle

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo .....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
2.1 Turbina a Gás. ` .....	14
2.1.1 Princípio básico de funcionamento .....	15
2.1.2 Compressor.....	15
2.1.3 Câmara de combustão.....	16
2.1.4 Turbina .....	16
2.1.5 Tipos de combustíveis .....	17
2.1.5.1 Combustível sólido.....	17
2.1.5.2 Combustível líquido .....	17
2.1.5.3 Combustível gasoso.....	17
2.1.6 Ciclo de Brayton.....	18
2.1.7 Rendimento Térmico .....	20
2.1.8 Modelo de Turbina .....	20
2.2 Análise do Processo de Combustão.....	21
2.2.1 Entalpia de formação.....	25
2.2.2 Aplicação da primeira Lei em sistemas reagentes.....	27
2.2.3 Entalpia, energia interna de combustão e calor de reação .....	28
2.2.4 Temperatura adiabática de chama .....	29
2.3 Processo de Combustão com Formação de NO <sub>x</sub> .....	30
2.3.1 Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ).....	30

2.3.2 Mecanismo de formação.....	31
2.3.2.1 NO térmico.....	32
2.3.2.2 NO rápido.....	33
2.3.2.3 NO combustível .....	34
2.3.3 A Formação de NO <sub>2</sub> .....	35
2.4 Correlações Empíricas Para Previsão da Formação de NO <sub>x</sub> .....	35
2.5 Tecnologias Para a Redução de Emissões de NO <sub>x</sub> .....	36
2.5.1 Injeção de água ou vapor na câmara de combustão.....	36
2.5.2 Câmara de combustão de geometria variável .....	37
2.5.3 Câmara de combustão em estágios .....	37
2.5.4 Câmara de combustão lean premix-prevaporize combustion.....	37
2.5.5 Redução catalítica seletiva (RSC) .....	38
3 ESTUDO DE CASO .....	39
3.1 Resultados Obtidos .....	39
3.1.1 Entalpia de formação .....	40
3.1.2 Calor fornecido no procedo de combustão .....	40
3.1.3 Potência .....	42
3.1.4 Quantidade de NO <sub>x</sub> formado.....	42
3.2 Resultados após adição de vapor .....	42
3.2.1 Potência após adição de vapor d'água .....	43
3.2.2 Quantidade de NO <sub>x</sub> formado após adição de vapor d'água .....	44
3.3 Discussão e comparação de resultados .....	44
4 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47
ANEXO .....	48

## **1 INTRODUÇÃO**

Em 1930 foi registrada a primeira patente de uma turbina a gás, que constituiu as bases das modernas turbinas a gás. Atualmente, turbinas a gás de baixo peso vem sendo bastante utilizada em aplicações industriais para geração de eletricidade, no entanto nesse tipo de equipamento ocorre o processo de combustão em altas temperaturas, formando  $\text{NO}_x$ .

Devido à emissão de poluentes na atmosfera, a camada de Ozônio está diminuindo, e o resultado disso é o aumento da radiação solar que chega à terra, acarretando o efeito estufa. Os compostos da família  $\text{NO}_x$  são um dos grandes poluentes do ar, esse tipo de gás é formado principalmente em processos de combustão onde, devido à alta temperatura da chama, o nitrogênio reage com o oxigênio. A adição de vapor d'água no combustor de turbinas a gás é uma alternativa na redução da emissão desses poluentes, pois reduz a temperatura máxima das chamas e, conseqüentemente, as emissões de  $\text{NO}_x$ . Entretanto esse processo diminui a potência desenvolvida pela turbina.

### **1.1 Objetivo**

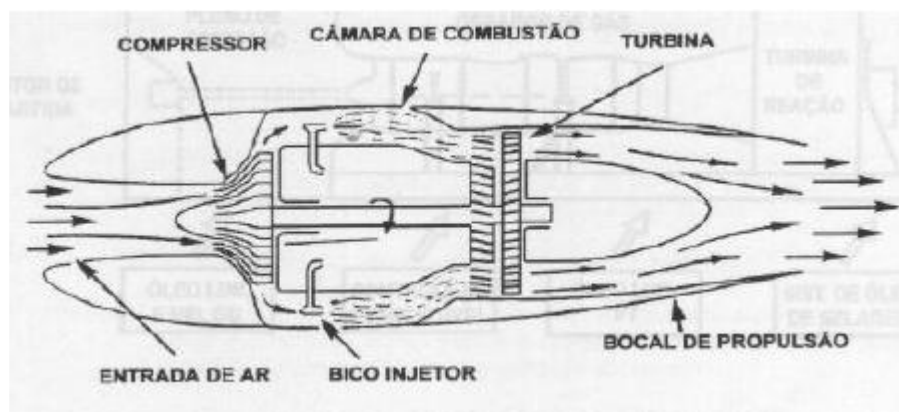
O Presente trabalho tem o objetivo de simular numericamente utilizando a Microsoft Office Excel 2007, as variações causadas pela adição de vapor d'água nos combustores de turbinas a gás que utilizam metano como combustível. Fazer uma análise comparativa da potência desenvolvida por uma turbina de rendimento fixo, com e sem a adição de vapor em seu combustor para diferentes temperaturas de entrada do ar e do vapor d'água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são revisadas as principais particularidades de turbinas a gás e seus componentes, e os mecanismos de formação do  $\text{NO}_x$ , bem como os possíveis métodos para diminuir a emissão desse tipo de poluente.

### 2.1 Turbina a Gás.

Em 1930 Frank Whittle registrou a primeira patente de uma turbina a gás para produzir um jato de propulsão (Figura 1). A turbina Whittle formou as bases das modernas turbinas a gás (QUEIROZ e MATIAS, 2003).



Fonte: Queiroz e Matias, 2003.

FIGURA 1: Turbina Whittle.

Segundo Martinelli Jr (2002), as turbinas a gás têm a aplicação mais variada possível e a mais ampla dentre os diversos tipos de motores. Primeiramente elas foram desenvolvidas com intuito de fornecer trabalho mecânico. No entanto, o desenvolvimento efetivo só aconteceu em benefício de seu aproveitamento na aeronáutica como elemento propulsor (reator). No intuito de fornecer trabalho mecânico as turbinas a gás têm sido utilizadas, de maneira geral, como elemento propulsor para navios, aviões (hélice), no setor automotivo, ferroviário e, principalmente, como acionador de estações “*booster*” de bombeamento



(oleodutos e gasodutos) assim como também na geração de eletricidade, principalmente, nas centrais de ponta e sistemas “*Stand-by*” e em locais onde peso e volume são levados em conta como o caso das plataformas “*Off-shore*” de extração de petróleo. Devido sua alta confiabilidade aliada à simplicidade de operação, permitem inclusive que elas sejam operadas à distância, por isso também são usadas em locais afastados e de difícil acesso e instalação.

### **2.1.1 Princípio básico de funcionamento**

Segundo Queiroz e Matias (2003) a turbina a gás é uma máquina térmica que utiliza o ar como fluido motriz para prover energia. Para conseguir isto o ar que passa através da turbina deve ser acelerado; isto significa que a velocidade ou energia cinética do ar é aumentada. Para obter esse aumento, primeiramente aumenta-se a pressão e, em seguida, adiciona-se calor. Finalmente a energia gerada (aumento de entalpia) é transformada em potência no eixo da turbina.

De acordo com Moran et al (2003), as turbinas a gás podem operar em um modo aberto ou modo fechado. No modo aberto, entende-se que o fluido de trabalho não retorna ao início do ciclo. O ar, retirado da atmosfera, é comprimido a uma alta pressão, levado à câmara de combustão onde, juntamente com o combustível, recebe uma faísca, provocando a combustão da mistura. Os gases desta combustão então se expandem na turbina, fornecendo potência à mesma e ao compressor, e, finalmente, saem pelo bocal de exaustão. No modo fechado, o fluido de trabalho permanece no sistema. Para isso, o combustível é queimado fora do sistema, utilizando-se um trocador de calor para fornecer a energia da combustão ao fluido de trabalho.

As turbinas a gás são compostas por três componentes principais:

- compressor;
- câmara de combustão;
- turbina.

### **2.1.2 Compressor**

Os compressores são proporcionados em dois tipos: o centrífugo ou radial e o axial conforme a direção com relação ao eixo de rotação, do escoamento na saída do rotor.

Segundo Martinelli Jr (2002), os principais elementos são um rotor, contendo pás, que, no seu movimento de rotação, transferem a energia (potência) mecânica, ganhada no

eixo, para o ar (fluido de trabalho) em forma de potência hidráulica; e, um sistema de aletas (pás fixas) que constituem o difusor (consta basicamente de passagens divergentes que desaceleram o ar aumentando sua pressão). Existe ainda a carcaça onde é montado o conjunto.

De maneira geral pode-se dizer que, para uma mesma potência, o tipo radial fornece uma pressão maior com uma vazão apropriada menor quando confrontado com o tipo axial. Normalmente, no uso em turbina a gás, compressores axiais se ajustam melhor para altas potências e os radiais são mais adequados para sistemas de baixa potência (MARTINELLI JR, 2002).

### **2.1.3 Câmara de combustão**

Conforme Queiroz e Matias (2003), a combustão em uma turbina a gás é um procedimento sucessivo realizado a pressão constante. Um fornecimento contínuo de combustível e ar é misturado e queimado à medida que flui através da zona de chama. A chama contínua não toca as paredes da camisa da câmara de combustão, sendo consolidada e modelada pela repartição do fluxo de ar admitido, que também resfria toda a câmara de combustão. Podem ser queimadas misturas com larga faixa de variação da relação combustível-ar, porque a proporção combustível-ar é mantida normal na região da chama, sendo o excesso de ar injetado a jusante da chama.

### **2.1.4 Turbina**

Segundo Martinelli Jr (2002), os modelos empregados em turbinas a gás podem ser axiais ou radiais.

De acordo com Queiroz e Matias (2003), a grande maioria é do tipo axial por apresentarem maior eficiência isoentrópica, alternando entre 75 e 90 %.

A turbina pode ser provida por vários estágios de palhetas estatoras e rotoras a depender da aplicação ou projeto, notando que as palhetas estatoras são fixadas à carcaça da turbina e às rotoras as rodas, que, por conseguinte são fixadas ao eixo. De qualquer modo a energia extraída pela roda de turbina é transmitida ao eixo que por sua vez transfere para o compressor de ar, proporcionando assim a compressão de um volume de ar para a câmara de combustão fechando o ciclo de funcionamento. (QUEIROZ e MATIAS, 2003)

Para aplicação industrial os gases gerados pela turbina a gás é direcionado por meio de uma peça de transição para uma turbina de potência, que é um conjugado de estágios de

palhetas estatoras e rotoras com o intuito de extrair potência dos gases gerados pela turbina a gás. Essa energia é conduzida para o equipamento acionado através de um eixo utilizando um redutor de velocidade (gerador elétrico) ou um multiplicador (compressores) (QUEIROZ e MATIAS, 2003).

### **2.1.5 Tipos de combustíveis**

Segundo Martinelli Jr (2002), na maioria das vezes os combustíveis são de origem fóssil, e dentre os combustíveis habituais tem-se três tipos: sólido, líquido e gasoso.

#### **2.1.5.1 Combustível sólido**

Devido ao conteúdo de cinzas e demais impurezas (metal, enxofre, etc.), este tipo de combustível é normalmente utilizado em turbinas com circuitos fechados, utilizando cavaco de madeira ou bagaço de cana-de-açúcar.

#### **2.1.5.2 Combustível líquido**

Existem vários tipos, desde os leves como o querosene de uso aeronáutico até aos pesados como óleo cru (petróleo), cujo preço é o menor, porém com a desvantagem de ter um conteúdo de cinzas muito grande o que é altamente prejudicial ao funcionamento da turbina.

Veja alguns exemplos:

- óleo cru: bom, mas a maior parte dos membros voláteis tem a tendência de desenvolver coque flutuante;
- diesel: é apropriado, mas o custo é alto;
- álcool: é adequado, porém caro.

#### **2.1.5.3 Combustível gasoso**

Os principais são:

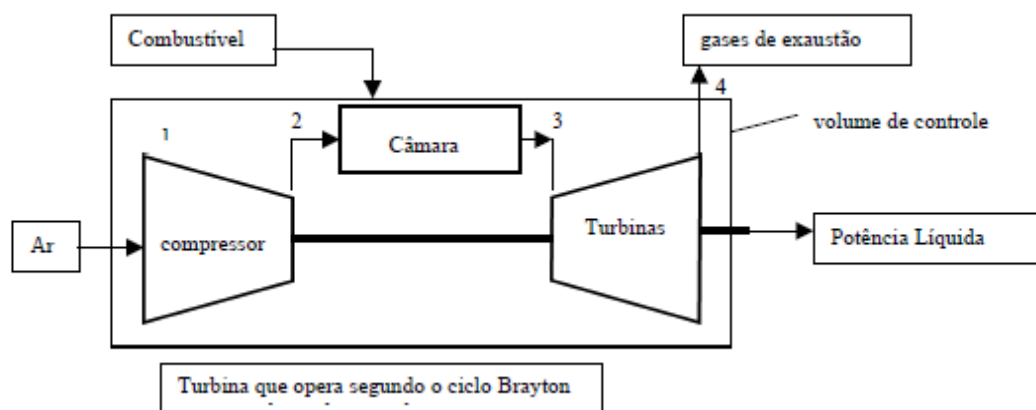
- gás pobre: subproduto barato, baixo poder calorífico inferior, necessita uma onerosa purificação, grande volume, dutos e câmara de combustão grande, diferentes misturas podem causar corrosão.

- gás natural: é o combustível componente ideal para turbinas, não há necessidade de limpeza, a pressão é suficiente para injetar diretamente na câmara de combustão. O principal componente do gás natural é o Metano, hidrocarboneto gasoso incolor, no qual a molécula é composta por um átomo de carbono e quatro de hidrogênio ( $\text{CH}_4$ ).

- gaseificação de carvão: também é indicado, porém é caro, no momento está em amplo desenvolvimento.

### 2.1.6 Ciclo de Brayton

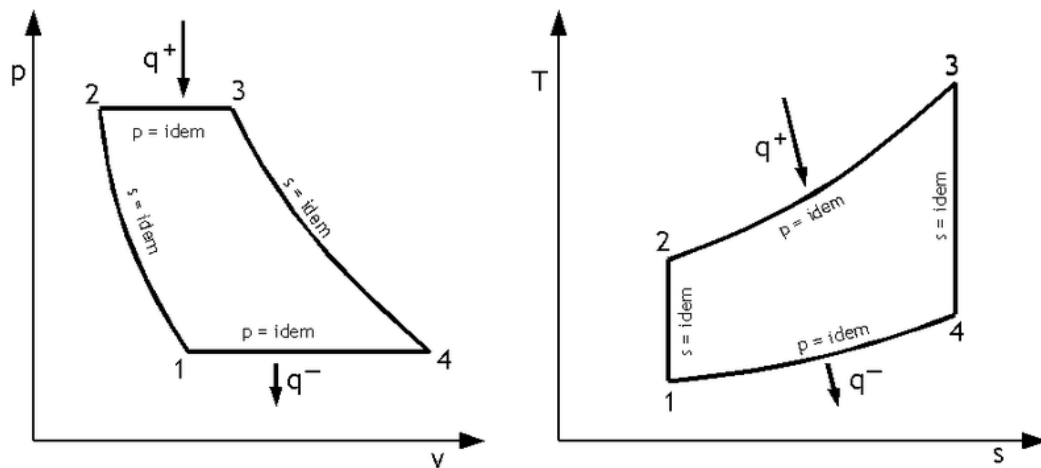
Segundo Queiroz e Matias (2003), uma turbina a gás produz energia a partir do resultado das conseqüentes etapas contínuas do ciclo Brayton (Figura 2).



Fonte: Queiroz e Matias, 2003.

FIGURA 2: Ciclo Brayton.

O ciclo Brayton (pressão constante) é denominado vulgarmente como ciclo aberto. Os passos deste ciclo são mostrados nos diagramas  $P \times V$  e  $T \times S$  (Figura 3).



Fonte: Queiroz e Matias, 2003.

FIGURA 3: Diagrama  $P \times V$  e  $T \times S$ .

1 ao 2. Compressão - O ar é admitido e comprimido em um compressor onde as energias de pressão e temperatura do fluido (ar) aumentam, e o volume reduz.

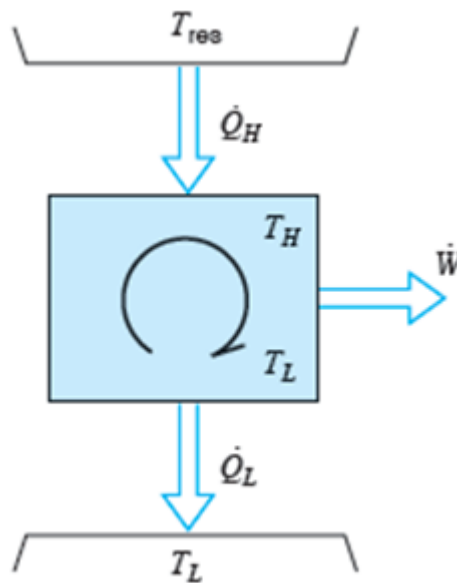
2 ao 3. Combustão - O ar comprimido flui para as câmaras de combustão, onde o combustível, a alta pressão, é injetado e queimado a uma pressão constante, mas com um aumento relevante do volume. Este aumento de volume se manifesta em aumento de velocidade de escoamento dos gases, porque não há mudança acentuada na área desta seção da turbina.

3 ao 4. Expansão - Os gases são expandidos ocasionando uma redução da temperatura e pressão, e conseguindo uma alta velocidade através dos estágios da turbina geradora de gás, que converte parte da energia dos gases em potência no eixo para acionar o compressor de ar (aproximadamente 2/3 da energia gerada com a queima).

4 ao 1. Exaustão - Em um avião a jato, os gases remanescentes da expansão na turbina passam através de um bocal para aumentar sua velocidade e, conseqüentemente, o impulso (propulsão). Na aplicação industrial, os gases são direcionados para uma turbina de reação ou potência onde a energia residual (aproximadamente 1/3) da energia gerada, dos gases é convertida em potência no eixo para acionar um componente como um compressor de gás, gerador elétrico ou uma bomba. Finalmente os gases fluem para o duto de exaustão, onde sua energia remanescente pode ainda ser aproveitada em um sistema de recuperação de calor (aquecimento de água, geração de vapor, aquecimento do ar de combustão, etc.).

### 2.1.7 Rendimento Térmico

De acordo com Borgnakke e Sonntag (2009), o rendimento térmico ( $\eta_{térmico}$ ) (Figura 4) de uma máquina térmica trabalhando no ciclo ideal (Ciclo Brayton) é a razão entre o trabalho ( $W$ ) e o calor fornecido da fonte a alta temperatura ( $Q_H$ ). Com isso, o rendimento térmico, ou eficiência térmica, é definido por:



Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).  
FIGURA 4: Motor térmico.

$$\eta_{térmico} = \frac{W}{Q_H} \quad (2.1)$$

Na análise de uma turbina a gás  $Q_H = \dot{Q}_{V.C}$  que é o calor específico fornecido no processo de combustão.

### 2.1.8 Modelo de Turbina

De acordo com o catálogo de turbinas a gás industrial da empresa SIEMENS, a turbina SGT-500 (Figura 5), produz um acionamento mecânico de 19,52 MW utilizando gás natural como combustível, obtendo uma eficiência de 34,5%, com taxa de calor igual a 10.432 KJ/kWh, rotação de 3.450 RPM, coeficiente de pressão do compressor de 13:1, fluxo de gás

de escape igual a 97,9 kg/s, temperatura de 396 °C, e emissões de NO<sub>x</sub> (com DLE, corrigidas 15% O<sub>2</sub> seco) ≤ 42 ppmv.

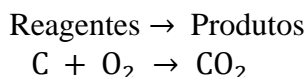


Fonte: Catálogo de turbina a gás industrial SIEMENS.  
FIGURA 5: Turbina SGT-500.

## 2.2 Análise do Processo de Combustão

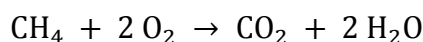
De acordo com Borgnakke e Sonntag (2009), o processo de combustão envolve a oxidação dos constituintes do combustível que são oxidáveis e pode ser representado por uma equação química. Durante o processo de combustão, a massa de cada elemento continua a mesma.

Inicialmente, analisa-se a reação do carbono com o oxigênio.



Essa equação indica que um kmol de carbono reage com um kmol de oxigênio para compor um kmol de dióxido de carbono. Isso também significa que 12 kg de carbono reagem com 32 kg de oxigênio para formar 44 kg de dióxido de carbono. Todas as substâncias iniciais que sofrem o processo de combustão são chamadas reagentes e as substâncias resultantes do processo são chamadas produtos.

Quando um combustível composto por hidrocarbonetos é queimado, o carbono e o hidrogênio são oxidados. Por exemplo, considere a combustão estequiométrica do metano.

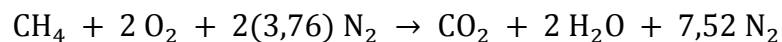


Nesse caso, os produtos de combustão contêm dióxido de carbono e água. A água pode estar na fase vapor, líquida ou sólida, dependendo da temperatura e pressão dos produtos de combustão.

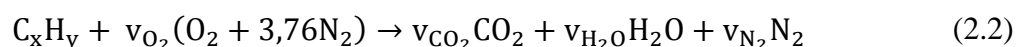
Na maior parte dos processos de combustão, o oxigênio é fornecido pelo ar e não como oxigênio puro. A composição do ar, em base molar, são aproximadamente 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio, e 1% de argônio. Admite-se que o nitrogênio e o argônio não participem das reações químicas. No entanto, ao final da combustão eles estão à mesma temperatura dos demais produtos e, assim, sofrem uma mudança de estado (considerando que a temperatura final dos produtos não é igual à inicial dos reagentes). É importante lembrar que determinadas reações químicas, entre o oxigênio e o nitrogênio, acontecem nas câmaras dos motores de combustão interna (devido às altas temperaturas de reação) formando o  $\text{NO}_x$ . Isso gera a poluição do ar com os óxidos de nitrogênio que estão presentes nos gases de escapamento dos motores.

O argônio é normalmente desprezado na solução dos problemas de combustão que abrange o ar e, deste modo, o ar passa a ser considerado como sendo composto por 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio em volume. Quando esta suposição é feita, o nitrogênio é algumas vezes chamado de nitrogênio atmosférico. O nitrogênio atmosférico apresenta um peso molecular de 28,16 kg/kmol (levando em conta o argônio), enquanto o nitrogênio puro apresenta peso molecular igual a 28,013 kg/kmol. Considera-se que os 79% da mistura sejam relativos a nitrogênio puro.

A hipótese de que o ar é constituído por 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, em base volumétrica, conduz à conclusão de que para cada mol de oxigênio estão envolvidos  $79,0/21,0 = 3,76$  mols de nitrogênio. Portanto, quando o oxigênio for fornecido pelo ar para a combustão estequiométrica do metano, tem-se: `



A quantidade mínima de ar que abastece o oxigênio suficiente para a combustão completa do carbono, hidrogênio e quaisquer outros elementos do combustível que possam oxidar é chamada de ar teórico. Quando se consegue combustão completa dos reagentes com o ar teórico, os produtos resultantes não contêm oxigênio. A equação geral para a combustão de um hidrocarboneto com ar apresenta a seguinte forma:





Em que os coeficientes relativos às substâncias são conhecidos como os coeficientes estequiométricos. A conservação das espécies químicas nos fornece a quantidade de ar teórica. Assim,

$$C: v_{CO_2} = x \quad (2.3)$$

$$H: 2v_{H_2O} = y \quad (2.4)$$

$$N_2: v_{N_2} = 3,76 \times v_{O_2} \quad (2.5)$$

$$O_2: v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{H_2O}}{2} = x + y \quad (2.6)$$

e o número total de kmols de ar para um kmol de combustível é dada como segue,

$$n_{ar} = v_{O_2} \times 4,76 = 4,76 \left( x + \frac{y}{4} \right) \quad (2.7)$$

Essa quantidade é igual a 100% do ar teórico. Sabe-se, experimentalmente, que a combustão completa não é alcançada, a menos que a quantidade de ar fornecida seja maior que a quantidade teórica necessária.

Dois parâmetros importantes, empregados para expressar a relação entre o combustível e o ar, são a relação ar-combustível (designada por AC) e seu recíproco, a relação combustível-ar (designada por CA). Essas relações são comumente calculadas em base mássica, mas, algumas vezes, também são calculadas em base molar. Assim,

$$AC_{mássica} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} \quad (2.8)$$

$$AC_{molar} = \frac{n_{ar}}{n_{comb}} \quad (2.9)$$

Estas relações são vinculadas por meio das massas moleculares do ar e do combustível. Assim,

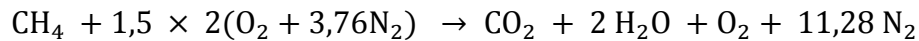
$$AC_{mássica} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{n_{ar}M_{ar}}{n_{comb}M_{comb}} = AC_{molar} = \frac{M_{ar}}{M_{comb}} \quad (2.10)$$

O subscrito *s* é utilizado para indicar que a relação se refere a 100% do ar teórico (também conhecido como ar estequiométrico). Ainda é possível conceber a quantidade de ar realmente fornecida à reação em função da porcentagem de ar teórico ou por meio da relação de equivalência que é determinada da seguinte maneira:

$$\phi = \frac{CA}{CA_s} = \frac{AC_s}{AC} \quad (2.11)$$

Observa-se que não importa se é utilizada a base mássica ou a molar nessa definição, pois a porcentagem de ar teórico ou a razão de equivalência são ambas, razões ar-combustível entre a quantidade estequiometricamente necessária e a de fato existente, sendo que as massas moleculares se anulam.

Deste modo, 150% de ar teórico expressam que o ar é fornecido numa quantidade uma vez e meia maior que a referente ao ar teórico (a relação de equivalência é igual a 2/3). A combustão completa do metano com 150% de ar teórico é escrita do consequente modo:

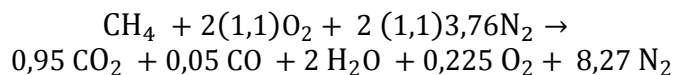


O excesso de ar é a quantidade de ar abastecido acima ou abaixo da quantidade estequiométrica necessária. Então, 150% de ar teórico são equivalentes a 50% de ar em excesso. Os termos ar teórico, ar em excesso e razão de equivalência são todos utilizados como informações sobre a mistura reacional de combustível e ar.

Se a quantidade de ar provida é inferior à quantidade de ar teórico necessário, a combustão é dita incompleta, podem existir alguns hidrocarbonetos nos produtos de combustão. Se há somente uma pequena deficiência de ar, o resultado é que um pouco de carbono reage com o oxigênio para formar o monóxido de carbono (CO), em vez de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Até quando se fornece um pouco de excesso de ar, pode-se encontrar pequenas quantidades de monóxido de carbono nos produtos de combustão. A quantidade exata constituída depende de múltiplos fatores, contendo a mistura e a turbulência durante a com-

bustão. Portanto, a combustão do metano com 110% de ar teórico pode ser expressa da seguinte maneira:



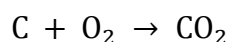
Existem alguns procedimentos experimentais para realizar a análise dos produtos de combustão, nos quais se calcula a quantidade de ar realmente fornecida ao processo de combustão. Uns produzem resultados em uma base “seca”, isto é, fornecem a análise fracionária de todos os componentes, exceto a água. Outros métodos apresentam resultados que incluem o vapor d’água.

O princípio básico utilizado para obter a relação real ar-combustível a partir da análise dos produtos de combustão é a conservação de massa de cada um dos elementos. De tal modo, pode fazer um balanço do carbono, do hidrogênio, do oxigênio e do nitrogênio (e qualquer outro elemento que possa estar envolvido na reação) na transformação de reagentes em produtos.

### 2.2.1 Entalpia de formação

Admite-se que o estado de referência seja determinado pela temperatura de 25 °C e pressão de 0,1 MPa, e que nessa condição, as substâncias na fase vapor se comportem como gases ideais.

Analisando o processo de reação ideal que envolve a combustão de carbono sólido com oxigênio gasoso (gás ideal), cada um deles entrando no volume de controle no estado de referência de 25 °C e 0,1 MPa. O dióxido de carbono (gás ideal) formado pela reação sai da câmara no estado de referência. Se a transferência de calor fosse precisamente medida, seria igual a  $-393\,522\text{ KJ/Kmol}$  de  $\text{CO}_2$  formado. A equação química desse procedimento é:



Aplicando a primeira lei a esse processo, tem-se:

$$\bar{q}_{V,C} + H_R = H_P \quad (2.12)$$

em que os subíndices  $R$  e  $P$  referem-se, respectivamente, aos reagentes e produtos,  $\bar{q}_{v.c}$  é a taxa de transferência de calor específico na base molar,  $H$  é a entalpia. É conveniente escrever a primeira lei para tal processo da seguinte forma:

$$\bar{q}_{v.c} + \sum_R n_e \bar{h}_e = \sum_P n_s \bar{h}_s \quad (2.13)$$

em que as somatórias se referem, respectivamente, a todos os reagentes e a todos os produtos e o  $\bar{h}$  é a entalpia específica na base molar. A taxa de transferência de calor específico na base mássica é dada pela seguinte equação:

$$q = \frac{\bar{q}_{v.c}}{M} \quad (2.14)$$

em que o  $M$  é o peso molecular.

De tal modo, uma medida da transferência de calor determina a diferença entre a entalpia dos produtos e dos reagentes. Porém, atribui o valor zero para a entalpia de todos os elementos a 25 °C e à pressão de 0, 1 MPa. Nesse caso, a entalpia dos reagentes é inexistente:

$$\bar{q}_{v.c} + H_P = -393\,522 \text{ KJ/Kmol}$$

A entalpia do  $\text{CO}_2$ , a 25 °C e à pressão de 0, 1 MPa (relativamente a essa base na qual a entalpia dos elementos é admitida nula), é chamada entalpia de formação. Indica-se essa entalpia pelo símbolo  $\bar{h}_f^0$ . Portanto, para o  $\text{CO}_2$ ,

$$\bar{h}_f^0 = -393\,522 \text{ KJ/Kmol}$$

A entalpia do  $\text{CO}_2$  em outro estado, relativa a essa base em que a entalpia dos elementos é zero, é encontrada pela soma da variação de entalpia entre esse estado (gás ideal a 25 °C, 0,1 MPa) e o estado dado com a entalpia de formação. Isto é, a entalpia a qualquer pressão e temperatura é expressa da seguinte forma:

$$\bar{h}_{T,P} = \left( \bar{h}_f^0 \right)_{298;0,1\text{MPa}} + (\Delta\bar{h})_{298;0,1\text{MPa} \rightarrow T,P} \quad (2.15)$$

em que o segundo termo do lado direito da equação representa a diferença entre a entalpia em qualquer estado dado e a entalpia a 298 K e 0,1 MPa.

O método evidenciado para o CO<sub>2</sub> pode ser aplicado para qualquer outro composto.

Inúmeras tabelas termodinâmicas fornecem os valores da entalpia de formação para algumas substâncias em kJ/kmol. No presente trabalho, a tabela adotada é aquela fornecida por Borgnakke e Sonntag (2009) que está representado no anexo 1, onde são fornecidos dois valores para a entalpia de formação da água; um para água líquida e outro para água vapor (gás ideal) e ambos estão mencionados a 25 °C e 0,1 MPa. É apropriado utilizar a referência de gás ideal em conjunto com a tabela de variações de propriedades fornecida na tabela no anexo 1 e utilizar a referência de líquido real em conjunto com as variações nas propriedades de gases reais

### 2.2.2 Aplicação da primeira Lei em sistemas reagentes

Na aplicação da primeira lei da termodinâmica em sistemas reagentes é fundamental a entalpia de formação, uma vez que permite que as entalpias de substâncias diferentes possam ser somadas ou subtraídas (contanto que elas sejam relativas à mesma base).

Com isso, para um processo em regime permanente escreve-se a primeira lei da seguinte maneira:

$$\bar{q}_{V.C} + H_R = W_{V.C} + H_P \quad (2.16)$$

ou

$$\bar{q}_{V.C} + \sum_R n_e \bar{h}_e = W_{V.C} + \sum_P n_s \bar{h}_s \quad (2.17)$$

E o calor específico fornecido no processo de combustão é:

$$\dot{Q}_{V.C} = \dot{m}_{Comb} \times q \quad (2.18)$$

### 2.2.3 Entalpia, energia interna de combustão e calor de reação.

A entalpia de combustão,  $H_{RP}$ , é determinada como a diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes quando ocorre combustão completa a uma dada temperatura e pressão. Isto é,

$$\bar{h}_{RP} = H_P - H_R \quad (2.19)$$

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_s \left( \bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h} \right)_s - \sum_R n_e \left( \bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h} \right)_e \quad (2.20)$$

A entalpia de formação é fixa. Portanto, considera que ela é composta pelos termos:

$$H = H^0 + \Delta H \quad (2.21)$$

na qual

$$H_R^0 = \sum_R n_i \bar{h}_{fi}^0 \quad (2.22)$$

$$H_R = \sum_R n_i \Delta\bar{h}_i \quad (2.23)$$

$$H_P^0 = \sum_P n_i \bar{h}_{fi}^0 \quad (2.24)$$

$$H_P = \sum_P n_i \Delta\bar{h}_i \quad (2.25)$$

A diferença entre a entalpia dos produtos e a dos reagentes é reescrita na seguinte maneira:

$$H_P - H_R = H_P^0 - H_R^0 + \Delta H_P - \Delta H_R = \bar{h}_{RP0} + \Delta H_P - \Delta H_R \quad (2.26)$$

Nota-se que a diferença de entalpias é em função da entalpia de combustão no estado de referência  $\bar{h}_{RP0}$  e das variações de entalpia dos produtos  $\Delta H_P$  e dos reagentes  $\Delta H_R$ . Quando os produtos e os reagentes estão no estado de referência essas variações são nulas.

A energia interna de combustão é definida de modo análogo.

$$\bar{u}_{RP} = u_P - u_R \quad (2.27)$$

$$\bar{u}_{RP} = \sum_P n_i \left( \bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h} - P\bar{v} \right)_s - \sum_R n_i \left( \bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h} - P\bar{v} \right)_e \quad (2.28)$$

onde  $P$  é a pressão e  $\bar{v}$  é o volume específico na base molar.

Quando todos os constituintes gasosos puderem ser analisados como gases ideais e o volume dos constituintes líquidos e sólidos for desprezível em relação ao volume dos constituintes gasosos, a relação para  $\bar{u}_{RP}$  é simplificada a:

$$\bar{u}_{RP} = \bar{h}_{RP} - \bar{R}T (n_{\text{produtos gasosos}} - n_{\text{reagentes gasosos}}) \quad (2.29)$$

Repetidas vezes, são utilizados os termos poder calorífico ou calor de reação. Eles representam a quantidade de calor transferida da câmara durante a combustão ou reação a temperatura constante. No caso de pressão constante, conclui-se, através da primeira lei da termodinâmica, que eles são iguais à entalpia de combustão com o sinal oposto. Com isso, a quantidade de calor transferida é, algumas vezes, chamada de poder calorífico a pressão constante.

Junto com o termo poder calorífico, são usados os termos superior e inferior. O poder calorífico superior é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado líquido e o poder calorífico inferior é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado vapor.

## 2.2.4 Temperatura adiabática de chama

Quando a temperatura atingida pelos produtos é chamada de temperatura adiabática de chama, atende a um processo de combustão que acontece adiabaticamente e sem abranger trabalho ou variações de energia potencial ou cinética. Admitindo que o trabalho no processo

é inexistente e que as variações de energia potencial ou cinética são inexistentes, essa é a máxima temperatura que pode ser atingida pelos produtos, pois qualquer mudança de calor no processo e qualquer combustão incompleta contribui para a redução da temperatura dos produtos.

Em certo estado dos reagentes (P e T), a máxima temperatura adiabática de chama atingida para um dado combustível acontece quando a mistura é estequiométrica. A temperatura adiabática de chama pode ser controlada pela quantidade de ar em excesso que é utilizada. Portanto, é essencial realizar um controle rigoroso da temperatura dos produtos de combustão na aplicação em turbinas a gás, em que a temperatura máxima admissível para turbinas a gás situa-se entre 700 e 1300 °C, definida por considerações metalúrgicas.

## **2.3 Processo de Combustão com Formação de NO<sub>x</sub>**

Os óxidos de nitrogênio são compostos formados da reação entre o oxigênio e o nitrogênio em altas temperaturas, os seus tipos e processos de formação serão detalhados a seguir.

### **2.3.1 Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)**

Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) consistem de uma família (Tabela 1) muito importante de compostos químicos poluentes do ar. Por isso, é muito importante conhecer sua formação e sua reação na atmosfera, assim como dos métodos tecnológicos disponíveis para controle e prevenção para as várias fontes de combustão.



TABELA 1- Família dos compostos nitrogenados

<b>Fórmula</b>	<b>Nome</b>	<b>Propriedades</b>
$N_2O$	Óxido nitroso	Gás transparente, solúvel em água.
$NO$	Óxido nítrico/ Óxido de nitrogênio	Gás transparente, levemente solúvel em água.
$N_2O_2$	Dióxido de dinitrogênio	Gás transparente, levemente solúvel em água.
$N_2O_3$	Trióxido de dinitrogênio	Sólido preto, solúvel em água, decompõe-se em água.
$NO_2$	Dióxido de nitrogênio	Gás marrom-avermelhado, altamente solúvel em água, decompõe-se em água.
$N_2O_4$	Tetróxido de dinitrogênio	Gás marrom-avermelhado, altamente solúvel em água, decompõe-se em água.
$N_2O_5$	Pentóxido de dinitrogênio	Sólido branco, altamente solúvel em água, decompõe-se em água.

Fonte: (EPA, 2002), citado por Teixeira, (2005).

De acordo com Teixeira (2005),  $NO_x$  é um dos poluentes primários mais lançados na atmosfera durante o processo de combustão. Nesta situação, o  $NO_x$  relaciona-se às emissões acumulativas de óxido nítrico ( $NO$ ), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), e traços de outras espécies como mostrado na Tabela 1. Ainda que as fontes móveis sejam os maiores contribuintes para a formação de  $NO_x$ , a combustão de qualquer combustível fóssil ou não fóssil gera certo nível de  $NO_x$  devido às altas temperaturas de queima e à disponibilidade de oxigênio e nitrogênio no ar e no combustível. As emissões de  $NO_x$  nos processos de combustão são, tipicamente, de 90 a 95% de  $NO$ , ficando o restante predominantemente  $NO_2$ .

Segundo Primo (2005), os óxidos de nitrogênio  $NO_x$  também são produzidos por fontes naturais, como os relâmpagos, atividades vulcânicas, atividade microbiana no solo, oxidação da amônia e processos biológicos ou fotolíticos nos oceanos. Porém as principais fontes emissoras são as fontes antropogênicas como a queima de combustíveis fósseis e de biomassa.

Primo (2005), ainda resalta que o  $NO_x$  afeta a saúde humana, gerando irritação nos olhos e deterioração das funções pulmonares, causa danos as árvores e culturas agrícolas, e também ajuda na formação da chuva ácida.

### 2.3.2 Mecanismo de formação

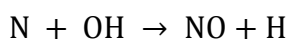
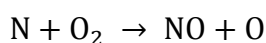
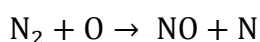
Segundo Teixeira (2005), no século XIX foi identificada a presença de  $NO_x$  nos produtos de queima de combustíveis orgânicos. Ao final dos anos 50 iniciaram averiguações sistemáticas dos processos físico-químicos de geração de  $NO_x$  em fornalhas de caldeiras,

motores de combustão interna e fornalhas industriais. Atualmente, a contribuição das emissões de  $\text{NO}_x$ , pelos sistemas de combustão, para a formação da chuva ácida, “*smog*” fotoquímico e partículas finas na atmosfera são vastamente reconhecidas. Muitos dos países desenvolvidos e em desenvolvimento têm feito uma série de regulamentações as quais limitam emissões de  $\text{NO}_x$  pelos sistemas de combustão.

Segundo Gallego, Martins e Gallo (2000), no meio dos óxidos constituídos durante o processo de combustão, o mais encontrado é o óxido de nitrogênio (NO). Esse óxido pode ser adquirido no processo de combustão por três caminhos diferentes: a reação do nitrogênio atmosférico com o oxigênio a altas temperaturas, constituindo o NO térmico; a reação de radicais hidrocarbônicos livres com a molécula de nitrogênio, formando o NO rápido; e pela reação do nitrogênio existente no combustível, compondo o NO combustível. Dependendo das condições em que acontece a combustão, tem o predomínio de um dos tipos de mecanismos citados: NO térmico predomina a altas temperaturas; NO combustível prevalece quando a quantidade de nitrogênio contido no combustível é alta e a temperatura é baixa, e o NO rápido é o predominante.

### 2.3.2.1 NO térmico

A formação do NO térmico de acordo com Gallego, Martins e Gallo (2000), sucede da reação do nitrogênio do ar atmosférico com o oxigênio dissociado pelas elevadas temperaturas impostas no processo de combustão. As principais reações de formação do NO térmico segundo o modelo proposto por Zeldovich, são expostas abaixo:



Segundo Chigier (1981), citado por Gallego, Martins e Gallo (2000) a velocidade de formação do NO térmico, importante quando em condições próximas a estequiométrica e mistura rica. Nessas condições se produz grande quantidade de óxido de nitrogênio. A velocidade de formação de NO é menor do que a velocidade da maioria das reações de combustão e verifica-se que na região da chama pouco NO térmico é formado, com grande quantidade sendo originada na região de pós-chama.

Na equação (2.28), Chigier (1981), citado por Gallego, Martins e Gallo (2000), apresenta a taxa de formação de óxido de nitrogênio, indicando que a quantidade de NO depende exclusivamente da temperatura e das concentrações de oxigênio e de nitrogênio. Observa a boa concordância com valores da equação e os valores de NO medidos na região de pós-queima, mas quando confrontado a valores aferidos na região de combustão, existe um erro expressivo, devido à não possibilidade de se prever o acréscimo de NO formado, proveniente do NO combustível e NO rápido.

$$\frac{d(NO)}{t} = 6 \times 10^{10} T_{eq}^{1/2} \exp\left(\frac{-69090}{T_{eq}}\right) [O_2]_{eq}^{1/2} [N_2]_{eq} \quad (2.30)$$

De acordo com Gallego, Martins e Gallo (2000), o aumento de temperatura colabora com a energia que precipita a reação de dissociação, exigindo menor tempo de exposição para que ela aconteça. Com isso, para uma dada mistura, há uma temperatura na qual o tempo de exposição não é mais expressivo no aumento de NO térmico, devido ao processo de formação de NO ter alcançado o equilíbrio químico.

Deve-se verificar que, para uma dada temperatura de referência, uma nova condição de equilíbrio para formação do NO térmico pode ser obtida com o ar em excesso (mistura pobre), em colocação da maior presença de oxigênio e nitrogênio, que podem se dissociar e reagir. O tempo de residência é outro fator importante; entretanto para baixas relações de combustível/ar (por volta de 0,4), o tempo de residência não tem influência no aumento da formação de NO térmico, dada a redução da temperatura da chama (GALLEGO, MARTINS e GALLO, 2000).

Lefebvre (1995), citado por Gallego, Martins e Gallo (2000) menciona que os pontos-chave relativos à formação de NO térmico podem ser abreviados da seguinte forma:

- a formação do NO térmico é controlada pela temperatura de chama;
- pequena quantidade de NO térmico é formada com temperaturas abaixo de 1850 K;
- para relações de combustão com mistura pobre (relação combustível/ ar < 0,5), NO formado independe do tempo de residência.

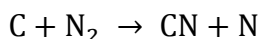
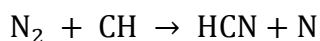
### 2.3.2.2 NO rápido

Segundo Teixeira (2000), o NO rápido foi descoberto pelo cientista norte americano Fennimore, (1971), e chamados de óxidos de nitrogênio “rápidos” devido a sua velocidade de

formação na zona da frente da chama ser muito intensa e rápida. As principais características da oxidação rápida são:

- Duração breve do processo: a zona de formação de NO está localizada numa seção pequena da frente da chama;
- Dependência fraca entre a emissão de NO e a temperatura;
- Forte dependência da emissão de NO com a relação ar/combustível.

Conforme Lefebvre (1995), citado por Gallego, Martins e Gallo (2000), a formação do NO rápido é iniciada a partir da formação do HCN (espécies de cianeto de hidrogênio intermediário), representada pelos exemplos abaixo, acontecendo reações intermediárias, que formam compostos como CN (Nitrila ou cianeto); este por sua vez é oxidado, formando o NO.



Segundo Gallego, Martins e Gallo (2000), Chigier (1981), apresenta algumas características com relação ao NO rápido, que são:

- a absoluta dependência da presença de hidrocarbonos ativos;
- a relativa independência da temperatura, tipo de combustível ou mistura. Em ensaios realizadas em condições estequiométricas foram obtidos níveis de NO rápido de 50 a 90 ppm; ao se alterar a temperatura de 1.900 K para 2.350 K não houve expressivo aumento NO rápido; em compensação, ao se aumentar relação combustível/ar de 0,9 para 2,0 a 1.900 K foi produzido significativo aumento na produção de NO rápido;
- quando em baixas temperaturas de chama, um tempo longo de residência promove a destruição do NO ativo formado a partir de reações desse com hidrocarbonos.

### **2.3.2.3 NO combustível.**

Segundo Gallego, Martins e Gallo (2000), o NO combustível é constituído a partir da reação do oxigênio com o nitrogênio contido no combustível durante o processo de combustão. Frações de nitrogênio podem ser achadas nos combustíveis desde 0,2% em massa, nos destilados leves, até 2% em massa nas frações asfálticas e carvões.

De acordo com Chigier (1981), citado por Gallego, Martins e Gallo, (2000), a oxidação de moléculas de baixo peso molecular que contêm nitrogênio, presente no combustível ou composta durante a combustão ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CN}$ ), é muito rápida, acontecendo em escala de tempo parecido à das outras reações do processo de combustão. A formação do NO combustível, além de ser profundamente influenciada pela quantidade de nitrogênio presente na composição do combustível, é entusiasmada pela relação ar/combustível da reação de combustão. Altas concentrações de NO combustível são obtidas em reações pobres (baixas temperaturas de chama), ou seja, a temperatura tem pouca influência. Quando a combustão ocorre em temperaturas baixas, como em reatores de leito fluidizado (750 a 950 °C), o NO combustível é o mais predominante.

### **2.3.3 A Formação de $\text{NO}_2$**

Segundo Gallego, Martins e Gallo (2000), próximo à chama é praticamente desprezível a formação de  $\text{NO}_2$  se comparado com o NO formado, sendo que parte do  $\text{NO}_2$  formado nessa região se transforma em NO. A transformação de NO em  $\text{NO}_2$ , por sua vez, acontece nas zonas em que existe excesso de ar na câmara de combustão, o que distingue uma maior estabilidade do  $\text{NO}_2$  a baixas temperaturas, quando confrontado com o NO. A partir da cinética de reação pode ser prevista a conversão de NO em  $\text{NO}_2$ . Tomando um exemplo: a 700 K e para um tempo de 0,1 ms, ocorre rapidamente 25% de conversão; por outro lado, ao se aumentar a temperatura para 900 K, a conversão é menor que 6%. Existem dúvidas se o convertimento de NO para  $\text{NO}_2$  acontece nas proximidades da saída da câmara ou dentro da câmara de combustão.

### **2.4 Correlações Empíricas Para Previsão da Formação de $\text{NO}_x$**

De acordo com Gallego, Martins e Gallo (2000), a probabilidade de se prever o comportamento térmico e as emissões provocadas por uma turbina são importantes, especialmente na fase de projeto e escolha do sistema a ser usado. Existem duas maneiras para determinar a quantidade de  $\text{NO}_x$ :

- a necessidade de se conhecer os mecanismos de reação, equações de equilíbrio e as constantes de velocidade de reação e de se resolver essas equações por métodos computacionais;

- desenvolver correlações empíricas a partir de dados coletados em equipamentos existentes.

A preparação dos modelos está baseada em três parâmetros: tempo de residência na zona de combustão; taxa da reação química; taxa de mistura. A partir desses parâmetros podem ser conseguidos termos que abrangem o tamanho da câmara de combustão, a perda de carga, as proporções dos fluxos abrangidos, além das condições de entrada, como temperatura, pressão e fluxo de massa.

Lefebvre (1995), citado por Gallego, Martins e Gallo (2000), criou a seguinte equação para previsão de formação de  $\text{NO}_x$  em turbinas a gás:

$$\text{NO}_x = 9 \times 10^{-8} P^{-1,25} V_C \exp(0,001 T_{st}) / m_A T_{pz} \quad (2.31)$$

onde:  $P$  é a pressão da combustão (kPa),  $V_C$  é volume da combustão ( $\text{m}^3$ ),  $T_{st}$  é a temperatura da chama (K),  $T_{pz}$  é a temperatura média da câmara da chama (K), e  $m_A$  é fluxo de massa de ar (kg/s); o resultado obtido é dado em gramas de  $\text{NO}_x$  por quilo de combustível (g/kg de combustível).

## 2.5 Tecnologias Para a Redução de Emissões de $\text{NO}_x$

Segundo Gallego, Martins e Gallo, (2000), existem alguns métodos para a redução do nível de emissões de  $\text{NO}_x$  em turbinas a gás: injeção de água líquida ou vapor, utilizar câmaras de combustão como baixa emissão de  $\text{NO}_x$ , ou tratamento dos gases de combustão, depende de sua viabilidade técnica e econômica.

### 2.5.1 Injeção de água ou vapor na câmara de combustão

A adição de água líquida ou vapor na câmara de combustão diminui substancialmente a temperatura de chama na zona primária, obtendo baixos níveis de emissões de  $\text{NO}_x$ . As proporções de adição estão por volta de 50% do fluxo de combustível utilizando água líquida e de 100 a 200% do fluxo de combustível para a adição de vapor.

Esse tipo de princípio tem as seguinte desvantagens:

- no caso de injeção de água líquida, há necessidade de se usar água desmineralizada e em quantidade substancial;

- no caso da injeção de vapor, além da vazão necessária, o gerador de vapor deve ter pressão compatível com a pressão da câmara de combustão da turbina;
- pode acontecer o aumento do nível de emissões de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos;
- pode haver oscilações da chama, no caso de injeção de água na fase líquida;
- ocorre a redução no rendimento térmico da turbina.

### **2.5.2 Câmara de combustão de geometria variável**

Este preceito modula a quantidade de ar necessário de diluição, mantendo a temperatura da zona primária próxima às condições de baixa formação de NO. Quando a turbina trabalha em baixa carga, existe um sistema que desvia parte do ar para a zona de mistura, mantendo a chama controlada. Esse sistema gera desvantagem na complexidade do seu controle, que tende a aumentar custo e peso, bem como reduzir a confiabilidade da operação.

### **2.5.3 Câmara de combustão em estágios**

Utilizado por vários fabricantes, esse sistema encontra-se valores de emissões de NO<sub>x</sub> inferiores a 25 ppmv (base 15% oxigênio) e sem a injeção de água ou vapor. A importância da combustão em estágios é gerar uma distribuição constante do fluxo de ar na câmara, alternando o fluxo de combustível para manter a temperatura de combustão constante e em valores adequados a emissões baixas. Um meio de se fazer a injeção de combustível seletiva pode ser pela combinação de injetores de combustível em uma coroa circular, conseguindo-se temperatura da combustão localizada e dividida. A desvantagem que esse sistema causa é o resfriamento de reações químicas que ocorrem nas extremidades das zonas de combustão, o que pode originar baixa eficiência e aumento na formação de CO e UHC.

### **2.5.4 Câmara de combustão lean premix-prevaporize combustion**

Este tipo de câmara é utilizado quando se solicita níveis muito baixos de emissão usando combustíveis líquidos. O combustível é injetado de forma atomizada no fluxo de ar em alta velocidade e direcionado para a zona de combustão. A finalidade desse tipo de concepção é conseguir a completa evaporação e a melhor mistura admissível do combustível e

do ar, evitando-se a formação de gotas, além de se ter uma mistura com excesso de ar que reduz as emissões de  $\text{NO}_x$ . As dificuldades dessa tecnologia incluem o risco de autoignição, vaporização incompleta da mistura, dificuldade de acendimento e possibilidade de retrocesso da mistura.

### **2.5.5 Redução catalítica seletiva (RSC)**

Esse método é uma forma de tratamento dos gases de combustão na saída da turbina. Trata-se de um procedimento baseado na grande relação do  $\text{NO}_x$  com a amônia ( $\text{NH}_3$ ): a amônia é injetada de forma controlada (devido ao seu poder corrosivo) nos gases de combustão antes da entrada no conversor catalítico, local onde se converte seletivamente o  $\text{NO}_x$  em  $\text{N}_2$  e água. São utilizados como catalisadores o pentóxido de vanádio ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) ou óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), necessitando acontecer dentro de uma faixa de temperatura de 285 a 400 °C, o que restringe o seu uso em ciclos que possuam sistema de recuperação de energia dos gases de combustão. Outra dificuldade é o controle da injeção de amônia, que não pode ser envolvida com os gases de combustão (a emissão de amônia é ainda pior que a de  $\text{NO}_x$ ).



### 3 ESTUDO DE CASO

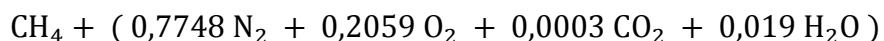
Neste capítulo são analisados os resultados da potência de uma turbina a gás com combustão de metano e ar teórico e adição de vapor d'água em seu combustor, obtidos através dos métodos revisados no capítulo anterior.

Para obtenção dos dados referente a potência da turbina a gás, foram utilizados os dados da turbina SGT-500, de acordo o catálogo de turbinas a gás industrial da empresa SIEMENS.

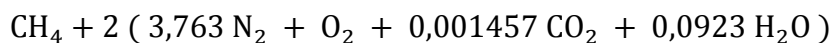
Os cálculos foram realizados manualmente, aplicando-se as fórmulas na Microsoft Office Excel 2007.

#### 3.1 Resultados Obtidos

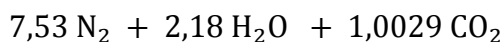
Utilizado a equação 2.2, os reagentes entre o metano e o ar teórico são:



Divide-se todos os componentes do ar por 0,2059 e multiplica-se por 2 para obter a relação correta entre o oxigênio e o metano, ficando:



Durante a reação química, o metano vai reagir com o oxigênio, obtendo o seguinte produto:



### 3.1.1 Entalpia de formação

De acordo com as tabelas de propriedades dos fluidos disponíveis no anexo 1, a entalpia específica de formação na base molar e as variações de entalpia específica na base molar do metano e dos componentes do ar podem ser obtidas por interpolação, seus valores estão apresentados na tabela 2 para os reagentes e na tabela 3 para os produtos, considerando a temperatura de entrada do combustível igual a temperatura ambiente e o ar entra na temperatura do vapor superaquecido à 473,15 K, já os produtos saem a uma temperatura de 689,15 K.

TABELA 2- Entalpia dos Reagentes.

<b>Entalpia específica de formação na base molar e variação</b>		
<b>Componentes</b>	$\bar{h}_f^0 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$	$\Delta \bar{h} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$
CH <sub>4</sub>	-74873	0
N <sub>2</sub>	0	204,979
O <sub>2</sub>	0	218,862
CO <sub>2</sub>	-393522	232,328
H <sub>2</sub> O	-241826	204,452

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 3- Entalpia dos Produtos.

<b>Entalpia específica de formação na base molar e variação</b>		
<b>Componentes</b>	$\bar{h}_f^0 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$	$\Delta \bar{h} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$
N <sub>2</sub>	0	216,356
H <sub>2</sub> O	-241826	218,122
CO <sub>2</sub>	-393522	249,942

Fonte: Próprio Autor.

### 3.1.2 Calor fornecido no procedo de combustão

Primeiramente é necessário calcular o taxa de transferência de calor específica na base molar. Isso é possível através da equação 2.13:

$$\bar{q}_{v.c} = -801964,3377 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}_{\text{comb}}}$$

Divide-se o calor específico na base molar pelo peso molecular para encontrar a taxa de transferência de calor específica na base mássica, utilizando a equação 2.14:

$$q = -49988,43 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

A determinação da relação ar-combustível dada pela equação 2.10, também será necessário para encontrar o calor fornecido.

$$AC = 17,5403 \frac{\text{Kg}_{\text{ar}}}{\text{Kg}_{\text{comb}}}$$

A massa específica do combustível será obtida pela seguinte análise:

$$m_{\text{ar}} + m_{\text{comb}} = 97,9 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Divide-se toda essa equação pela  $m_{\text{comb}}$  e utiliza a relação AC para obter o valor da massa do combustível:

$$\frac{m_{\text{ar}}}{m_{\text{comb}}} + \frac{m_{\text{comb}}}{m_{\text{comb}}} = \frac{97,9}{m_{\text{comb}}}$$

$$AC + 1 = \frac{97,9}{m_{\text{comb}}}$$

$$m_{\text{comb}} = 5,28 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Logo tem-se que o calor fornecido no processo de combustão é calculado através da equação 2.18:

$$\dot{Q}_{V.C} = 263.958,61 \text{ KW}$$

### 3.1.3 Potência

O calculo da potência da turbina é dado pela equação 2.1:

$$W = 91065,72 \text{ KW}$$

### 3.1.4 Quantidade de NOx formado

Supondo que a temperatura da chama seja de 1000 °C, aplica-se a correlação empírica representada pela equação 2.29, tem-se o seguinte:

$$\text{NO}_x = 2,84 \times 10^{-8} \frac{\text{g}}{\text{Kg}_{\text{comb}}}$$

### 3.2 Resultados após adição de vapor

Sabendo que a proporção de adição de vapor d'água no combustor da turbina tem que ser por volta de 100 a 200% do fluxo de combustível, tem-se a tabela 4 com os valores da porcentagem de vapor d'água que será adicionado, e conseqüentemente a porcentagem de vapor sobre o fluxo de combustível.

TABELA 4 - Porcentagem de vapor sobre o fluxo de combustível.

Massa de água no ar %	Relação AC $[\frac{\text{Kg}_{\text{ar}}}{\text{Kg}_{\text{comb}}}]$	Massa de água na Relação AC [Kg]	Proporção de vapor em relação ao combustível [%]
1,9 %	17,54	0,33	33%
5 %	18,11	0,91	91%
6 %	18,31	1,10	110%
7 %	18,50	1,30	130%
8 %	18,70	1,50	150%
9 %	18,91	1,70	170%
10 %	19,12	1,91	191%

Fonte: Próprio Autor.

Logo, é calculado na tabela 5 o percentual de cada componente do ar para as respectivas porcentagens de vapor adicionado.

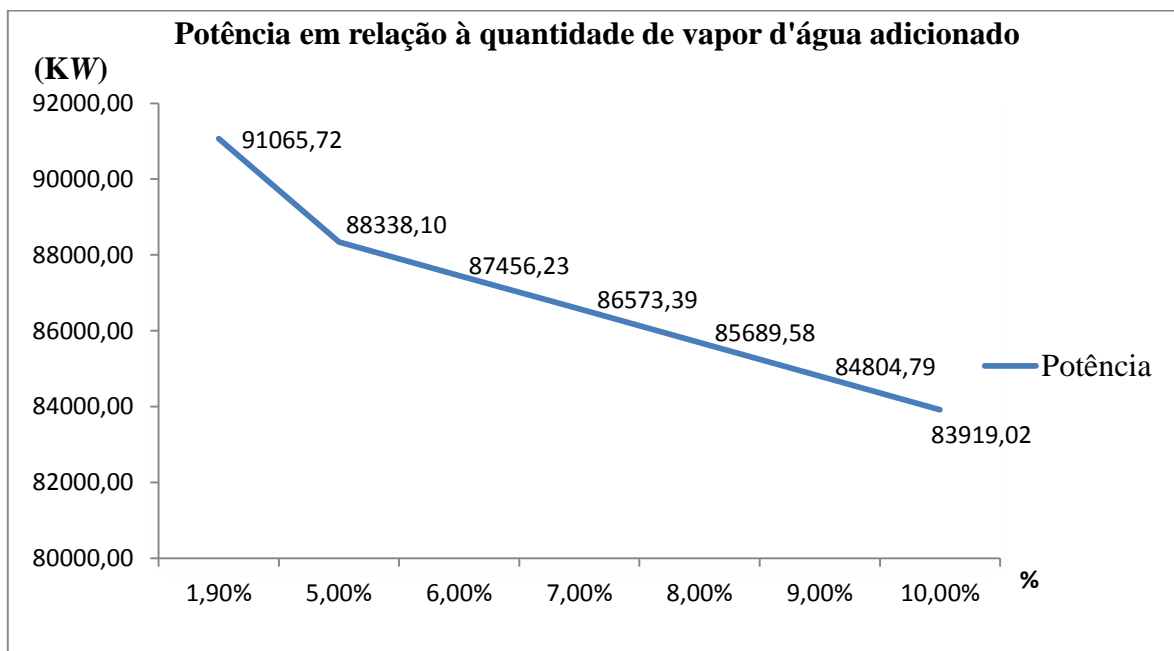
TABELA 5- Percentual de cada componente do ar.

Ar Teórico		Adição de Vapor D'água						
Componente	%	100	5%	6%	7%	8%	9%	10%
H <sub>2</sub> O	1,90%	0,0190	0,0500	0,0600	0,0700	0,0800	0,0900	0,1000
N <sub>2</sub>	77,48%	0,7748	0,7503	0,7424	0,7345	0,7266	0,7187	0,7108
O <sub>2</sub>	20,59%	0,2059	0,1994	0,1973	0,1952	0,1931	0,1910	0,1889
CO <sub>2</sub>	0,03%	0,0003	0,000291	0,000287	0,000284	0,000281	0,000278	0,000275
<b>Total</b>	100,00%	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Fonte: Próprio Autor.

### 3.2.1 Potência após adição de vapor d'água

Na figura 6, tem-se o resultado da potência da turbina após adicionar vapor d'água em seu combustor, obtido através de todos os cálculos do item 3.1 em relação a cada porcentagem de adição de vapor d'água no percentual de 5 a 10% do ar na combustão.

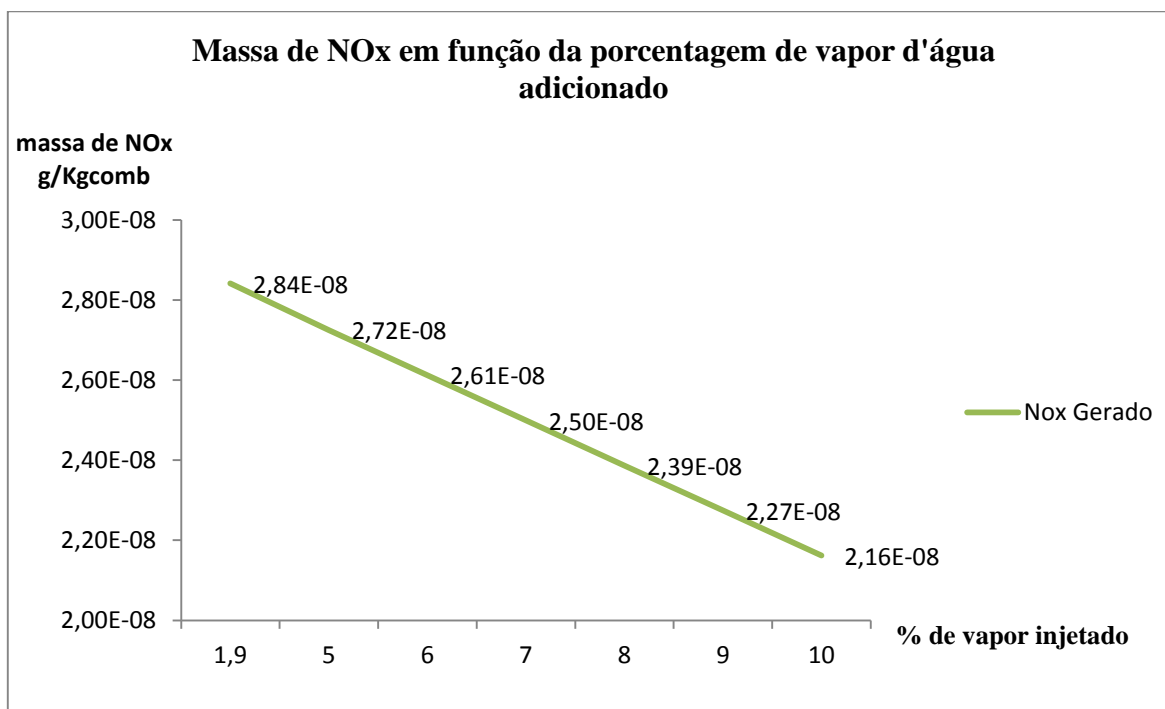


Fonte: Próprio autor.

FIGURA 6: Potência em relação a quantidade de vapor d'água adicionado.

### 3.2.2 Quantidade de NOx formado após adição de vapor d'água

Na figura 7 contem a quantidade de NOx formado em relação a porcentagem de vapor d'água adicionado no ar para a combustão, supondo que para cada 1% de vapor adicionado reduza 50 °C na temperatura da chama.



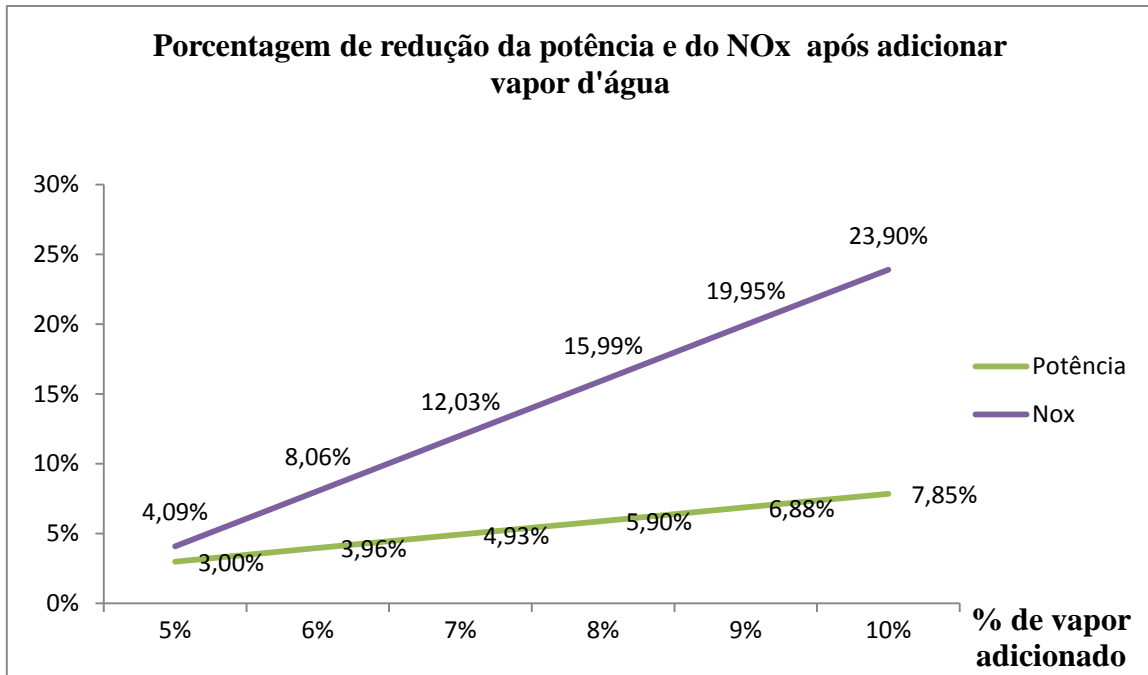
Fonte: Próprio autor.

FIGURA 7: Massa de NOx em função da porcentagem de vapor d'água adicionado.

### 3.3 Discussão e comparação de resultados

Analisando os resultados calculados, verifica-se que a potência da turbina a gás diminui 2728 KW quando é adicionado 5% de vapor d'água em sua combustão, e quanto maior a quantidade de vapor adicionado, maior é a redução de potência. O mesmo fato ocorre com a formação de NOx, quanto maior a quantidade de vapor, menor é a quantidade de NOx formado.

Comparando os valores antes e após a adição de vapor, a figura 8 mostra a porcentagem de redução da potência e do NOx em relação a quantidade de vapor d'água adicionado na combustão.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 8: Porcentagem de redução da potência e do NOx após adicionar vapor d'água.

## 4 CONCLUSÃO

Nesse estudo foram observados a potência e a quantidade de NOx formado por uma turbina a gás a partir de uma combustão simples e com adição de vapor d'água em seu combustor.

Os resultados analisados neste trabalho apresentaram uma potência de 91065KW e  $2,84 \times 10^{-8}$  [g/Kgcomb] de NOx formado, por meio do processo de combustão da turbina a gás sem adição de vapor d'água no combustor. Logo que se adiciona vapor d'água no combustor da turbina, a potência e a quantidade de NOx formado é reduzida. Quando se adiciona 10% de vapor d'água na combustão, tem-se uma redução de 8% na potência e 23% na emissão de NOx..

A adição de vapor d'água no combustor da turbina a gás é o método mais aconselhável para reduzir a formação de NOx.

Turbinas a gás são fundamentais para as indústrias, principalmente termoelétricas, no entanto o processo de combustão desses equipamentos deve ser analisado de forma bastante criteriosa, de modo a reduzir a formação de NOx.

Alguns trabalhos podem ser feitos decorrentes desse estudo, como por exemplo, desenvolver meios para a redução de emissão de NOx, sem que haja redução na potência da turbina.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGNAKKE, C; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7 .ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

**Catálogo de Turbina a Gás Industrial**. Disponível em: <[http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/gas-turbines/downloads/Industrial%20Gas%20Turbines/E50001-W430-A100-V2-7900\\_Gas%20Turbines\\_Broschuere\\_POR\\_LR.pdf](http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/gas-turbines/downloads/Industrial%20Gas%20Turbines/E50001-W430-A100-V2-7900_Gas%20Turbines_Broschuere_POR_LR.pdf)> Acesso em 23 de maio de 2014.

GALLEGO, A. G; MARTINS, G; GALLO, W. L. R. **Emissões de NO<sub>x</sub> em Turbinas a Gás: Mecanismo de Formação e Algumas Tecnologias de Redução**. Revista de Ciência e Tecnologia.15-pp.13-22, 2000.

MARTINELLI JR, L. C. **Máquinas Térmicas**. Panambi: UNIJUI, 2002. Volume 2. 135p. Apostila

MORAN, M. J; SHAPIRO, H. N; MUNSON, B. R; DEWITT, D. P. **Introdução a engenharia de sistemas térmicos**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.

PRIMO, C. R. **Formação, controle e dispersão atmosférica dos óxidos de nitrogênio decorrentes da queima de bagaço em caldeiras industriais**. 2005. 112f. Dissertação de mestrado em engenharia da energia – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

QUEIROZ, M; MATIAS, J. **Básico de Turbinas a Gás**. 2003. 87f. Petrobras. Apostila.

TEIXEIRA, F. N. **Caracterização e controle das emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras**. 2005.274f. Tese de doutorado em engenharia mecânica - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

**ANEXO**

## Anexo 1 – Tabelas de propriedades

**TABELA A.9**  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$ ) base molar

$T$ (K)	Nitrogênio diatômico ( $\text{N}_2$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 0 \text{ kJ/kmol}$ $M = 28,013 \text{ kg/kmol}$		Nitrogênio monatômico (N) $\bar{h}_{f,298}^0 = 472\,680 \text{ kJ/kmol}$ $M = 14,007 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K
0	-8670	0	-6197	0
100	-5768	159,812	-4119	130,593
200	-2857	179,985	-2040	145,001
298	0	191,609	0	153,300
300	54	191,789	38	153,429
400	2971	200,161	2117	159,409
500	5911	206,740	4196	164,047
600	8894	212,177	6274	167,837
700	11937	216,865	8353	171,041
800	15046	221,016	10431	173,816
900	18223	224,757	12510	176,265
1000	21463	228,171	14589	178,455
1100	24760	231,314	16667	180,436
1200	28109	234,227	18746	182,244
1300	31503	236,943	20825	183,908
1400	34936	239,487	22903	185,448
1500	38405	241,881	24982	186,883
1600	41904	244,139	27060	188,224
1700	45430	246,276	29139	189,484
1800	48979	248,304	31218	190,672
1900	52549	250,234	33296	191,796
2000	56137	252,075	35375	192,863
2200	63362	255,518	39534	194,845
2400	70640	258,684	43695	196,655
2600	77963	261,615	47860	198,322
2800	85323	264,342	52033	199,868
3000	92715	266,892	56218	201,311
3200	100134	269,286	60420	202,667
3400	107577	271,542	64646	203,948
3600	115042	273,675	68902	205,164
3800	122526	275,698	73194	206,325
4000	130027	277,622	77532	207,437
4400	145078	281,209	86367	209,542
4800	160188	284,495	95457	211,519
5200	175352	287,530	104843	213,397
5600	190572	290,349	114550	215,195
6000	205848	292,984	124590	216,926

**TABELA A.9 (continuação)**  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$ ) base molar

$T$ (K)	Oxigênio diatômico ( $\text{O}_2$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 0 \text{ kJ/kmol}$ $M = 21,999 \text{ kg/kmol}$		Oxigênio monatômico (O) $\bar{h}_{f,298}^0 = 249\,170 \text{ kJ/kmol}$ $M = 16,00 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K
0	-8683	0	-6725	0
100	-5777	173,308	-4518	135,947
200	-2868	193,483	-2186	152,153
298	0	205,148	0	161,059
300	54	205,329	41	161,194
400	3027	213,873	2207	167,431
500	6086	220,693	4343	172,198
600	9245	226,450	6462	176,060
700	12499	231,465	8570	179,310
800	15836	235,920	10671	182,116
900	19241	239,931	12767	184,585
1000	22703	243,579	14860	186,790
1100	26212	246,923	16950	188,783
1200	29761	250,011	19039	190,600
1300	33345	252,878	21126	192,270
1400	36958	255,556	23212	193,816
1500	40600	258,068	25296	195,254
1600	44267	260,434	27381	196,599
1700	47959	262,673	29464	197,862
1800	51674	264,797	31547	199,053
1900	55414	266,819	33630	200,179
2000	59176	268,748	35713	201,247
2200	66770	272,366	39878	203,232
2400	74453	275,708	44045	205,045
2600	82225	278,818	48216	206,714
2800	90080	281,729	52391	208,262
3000	98013	284,466	56574	209,706
3200	106022	287,050	60767	211,058
3400	114101	289,499	64971	212,332
3600	122245	291,826	69190	213,538
3800	130447	294,043	73424	214,682
4000	138705	296,161	77675	215,773
4400	155374	300,133	86234	217,812
4800	172240	303,801	94873	219,691
5200	189312	307,217	103592	221,435
5600	206618	310,423	112391	223,066
6000	224210	313,457	121264	224,597

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

TABELA A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$  base molar

T (K)	Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = -393\,522 \text{ kJ/kmol}$ $M = 44,01 \text{ kg/kmol}$		Monóxido de carbono (CO) $\bar{h}_{f,298}^0 = 110\,527 \text{ kJ/kmol}$ $M = 28,01 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
	0	-9364	0	-8671
100	-6457	179,010	-5772	165,852
200	-3413	199,976	-2860	186,024
298	0	213,794	0	197,651
300	69	214,024	54	197,831
400	4003	225,314	2977	206,240
500	6305	234,902	5932	212,833
600	12906	243,284	8942	218,321
700	17754	250,752	12021	223,067
800	22806	257,496	15174	227,277
900	28030	263,646	18397	231,074
1000	33397	269,299	21686	234,538
1100	38885	274,528	25031	237,726
1200	44473	279,390	28427	240,679
1300	50148	283,931	31867	243,431
1400	55895	288,190	35343	246,006
1500	61705	292,199	38852	248,426
1600	67569	295,984	42388	250,707
1700	73480	299,567	45948	252,866
1800	79432	302,969	49529	254,913
1900	85420	306,207	53128	256,860
2000	91439	309,294	56743	258,716
2200	103562	315,070	64012	262,182
2400	115779	320,384	71326	265,361
2600	128074	325,307	78679	268,302
2800	140435	329,887	86070	271,044
3000	152853	334,170	93504	273,607
3200	165321	338,194	100962	276,012
3400	177836	341,988	108440	278,279
3600	190394	345,576	115938	280,422
3800	202990	348,981	123454	282,454
4000	215624	352,221	130989	284,387
4400	240992	358,266	146108	287,989
4800	266488	363,812	161285	291,290
5200	292112	368,939	176510	294,337
5600	317870	373,711	191782	297,167
6000	343782	378,180	207105	299,809

TABELA A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$  base molar

T (K)	Água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = -241\,826 \text{ kJ/kmol}$ $M = 18,015 \text{ kg/kmol}$		Hidroxila (OH) $\bar{h}_{f,298}^0 = 38\,987 \text{ kJ/kmol}$ $M = 17,007 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
	0	-9904	0	-9172
100	-6617	152,386	-6140	149,591
200	-3282	175,488	-2975	171,592
298	0	188,835	0	183,709
300	62	189,043	55	183,894
400	3450	198,787	3034	192,466
500	6922	206,532	5991	199,066
600	10499	213,051	8943	204,448
700	14190	218,739	11902	209,008
800	18002	223,826	14881	212,984
900	21937	228,460	17889	216,526
1000	26000	232,739	20935	219,735
1100	30190	236,732	24024	222,680
1200	34506	240,485	27159	225,408
1300	38941	244,035	30340	227,955
1400	43491	247,406	33567	230,347
1500	48149	250,620	36838	232,604
1600	52907	253,690	40151	234,741
1700	57757	256,631	43502	236,772
1800	62693	259,452	46890	238,707
1900	67706	262,162	50311	240,556
2000	72788	264,769	53763	242,328
2200	83153	269,706	60751	245,659
2400	93741	274,312	67840	248,743
2600	104520	278,625	75018	251,614
2800	115463	282,680	82268	254,301
3000	126548	286,504	89585	256,825
3200	137756	290,120	96960	259,205
3400	149073	293,550	104388	261,456
3600	160484	296,812	111864	263,592
3800	171981	299,919	119382	265,625
4000	183552	302,887	126940	267,563
4400	206892	308,448	142165	271,191
4800	230456	313,573	157522	274,531
5200	254216	318,328	173002	277,629
5600	278161	322,764	188598	280,518
6000	302295	326,926	204309	283,227

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

**TABELA A.9** (continuação)  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Hidrogênio (H <sub>2</sub> ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 0$ kJ/kmol $M = 2,016$ kg/kmol		Hidrogênio monatômico (H) $\bar{h}_{f,298}^0 = 217\,999$ kJ/kmol $M = 1,008$ kg/kmol	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
0	-8467	0	-6197	0
100	-5467	100,727	-4119	92,009
200	-2774	119,410	-2040	106,417
298	0	130,678	0	114,716
300	53	130,856	38	114,845
400	2961	139,219	2117	120,825
500	5883	145,738	4196	125,463
600	8799	151,078	6274	129,253
700	11730	155,609	8353	132,457
800	14681	159,554	10431	135,233
900	17657	163,060	12510	137,681
1000	20663	166,225	14589	139,871
1100	23704	169,121	16667	141,852
1200	26785	171,798	18746	143,661
1300	29907	174,294	20825	145,324
1400	33073	176,637	22903	146,865
1500	36281	178,849	24982	148,299
1600	39533	180,946	27060	149,640
1700	42826	182,941	29139	150,900
1800	46160	184,846	31218	152,089
1900	49532	186,670	33296	153,212
2000	52942	188,419	35375	154,279
2200	59865	191,719	39532	156,260
2400	66915	194,789	43689	158,069
2600	74082	197,659	47847	159,732
2800	81355	200,355	52004	161,273
3000	88725	202,898	56161	162,707
3200	96187	205,306	60318	164,048
3400	103736	207,593	64475	165,308
3600	111367	209,773	68633	166,497
3800	119077	211,856	72790	167,620
4000	126864	213,851	76947	168,687
4400	142658	217,612	85261	170,668
4800	158730	221,109	93576	172,476
5200	175057	224,379	101890	174,140
5600	191607	227,447	110205	175,681
6000	208332	230,322	118519	177,114

**TABELA A.9** (continuação)  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Óxido nítrico (NO) $\bar{h}_{f,298}^0 = 90\,291$ kJ/kmol $M = 30,006$ kg/kmol		Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 33\,100$ kJ/kmol $M = 46,005$ kg/kmol	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
0	-9192	0	-10186	0
100	-6073	177,031	-6861	202,563
200	-2951	198,747	-3495	225,852
298	0	210,759	0	240,034
300	55	210,943	68	240,263
400	3040	219,529	3927	251,342
500	6059	226,263	8099	260,638
600	9144	231,886	12555	268,755
700	12308	236,762	17250	275,988
800	15548	241,088	22138	282,513
900	18858	244,985	27180	288,450
1000	22229	248,536	32344	293,889
1100	25653	251,799	37606	298,904
1200	29120	254,816	42946	303,551
1300	32626	257,621	48351	307,876
1400	36164	260,243	53808	311,920
1500	39729	262,703	59309	315,715
1600	43319	265,019	64846	319,289
1700	46929	267,208	70414	322,664
1800	50557	269,282	76008	325,861
1900	54201	271,252	81624	328,898
2000	57859	273,128	87259	331,788
2200	65212	276,632	98578	337,182
2400	72606	279,849	109948	342,128
2600	80034	282,822	121358	346,695
2800	87491	285,585	132800	350,934
3000	94973	288,165	144267	354,890
3200	102477	290,587	155756	358,597
3400	110000	292,867	167262	362,085
3600	117541	295,022	178783	365,378
3800	125099	297,065	190316	368,495
4000	132671	299,007	201860	371,456
4400	147857	302,626	224973	376,963
4800	163094	305,940	248114	381,997
5200	178377	308,998	271276	386,632
5600	193703	311,838	294455	390,926
6000	209070	314,488	317648	394,926

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

## Anexo 2 – Tabelas de propriedades

TABELA A.10

Entalpia de formação e entropia absoluta de várias substâncias a 25°C e 100 kPa

Substância	Fórmula	<i>M</i>	Estado	$\bar{h}^0$ kJ/kmol	$\bar{s}^0$ kJ/kmol K
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	gás	+226 731	200,958
Água	H <sub>2</sub> O	18,015	gás	-241 826	188,834
Água	H <sub>2</sub> O	18,015	líquido	-285 830	69,950
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,031	gás	-45 720	192,572
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,114	gás	+82 980	269,562
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,124	gás	-126 200	306,647
Carbono (grafita)	C	12,011	sólido	0	5,740
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44,010	gás	-393 522	213,795
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	64,059	gás	-296 842	249,212
Enxofre	S	32,06	sólido	0	32,056
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,070	gás	-84 740	229,597
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	gás	-235 000	282,444
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	líquido	-277 380	160,554
Eteno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	gás	+52 467	219,330
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100,205	gás	-187 900	427,805
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,178	gás	-167 300	387,979
Metano	CH <sub>4</sub>	16,043	gás	-74 873	186,251
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	gás	-201 300	239,709
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	líquido	-239 220	126,809
Monóxido de carbono	CO	28,011	gás	-110 527	197,653
Nitrometano	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	61,04	líquido	-113 100	171,80
<i>n</i> -Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,232	gás	-208 600	466,514
<i>n</i> -Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,232	líquido	-250 105	360,575
Óxido de Nitrogênio	N <sub>2</sub> O	44,013	gás	+82 050	219,957
Ozônio	O <sub>3</sub>	47,998	gás	+142 674	238,932
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,151	gás	-146 500	348,945
Peróxido de hidrogênio	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	34,015	gás	-136 106	232,991
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,094	gás	-103 900	269,917
Propeno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,081	gás	+20 430	267,066
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	80,058	gás	-395 765	256,769
T-T-Diesel	C <sub>14,4</sub> H <sub>24,9</sub>	198,06	líquido	-174 000	525,90

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

## Anexo 3 – Tabelas de propriedades

**TABELA A.5**  
Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa\*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p0}$ kJ/kg K	$C_{v0}$ kJ/kg K	$k = C_p/C_v$
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H <sub>2</sub> O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	44,01	0,1889	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,400
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	0,2765	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH <sub>4</sub>	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44,013	0,1889	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,23	0,0727	0,092	1,7113	1,638	1,044
Oxigênio	O <sub>2</sub>	31,999	0,2598	1,292	0,9216	0,662	1,393
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,094	0,1886	1,808	1,679	1,490	1,126
R-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120,914	0,06876	4,98	0,616	0,547	1,126
R-22	CHClF <sub>2</sub>	86,469	0,09616	3,54	0,658	0,562	1,171
R-32	CF <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	52,024	0,1598	2,125	0,822	0,662	1,242
R-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	120,022	0,06927	4,918	0,791	0,722	1,097
R-134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	102,03	0,08149	4,20	0,852	0,771	1,106
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	64,059	0,1298	2,618	0,624	0,494	1,263
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	80,053	0,10386	3,272	0,635	0,531	1,196

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).