

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Maria Luiza Teixeira Caldas**

**Análise termodinâmico de turbina a gás: Estudo comparativo baseado em dados experimentais da literatura.**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle

Rio de Janeiro

Julho 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, meus avós e meus irmãos por sempre me darem força para nunca desistir dos meus objetivos.

Ao meu namorado, Richard, por estar do meu lado nessa reta final, me dando apoio em todos os momentos difíceis.

A Deus por ter me dado saúde para me recuperar bem de duas contaminações do vírus e conseguir finalizar meu maior objetivo.

Ao meu orientador, Florian, por toda calma e paciência nesse tempo todo de elaboração de trabalho. Por sempre estar disponível e disposto a me ajudar em qualquer momento.

Aos meus colegas de turma e de vôlei por todos esses anos de faculdade. Agradeço por toda amizade e companheirismo. Principalmente Tatiana, por ser minha dupla em todos os momentos e Mengen Liu pela ajuda no código final.

Aos meus gerentes do trabalho, por todo ensino e sabedoria, por todas aulas sobre turbinas e seus componentes.

Obrigada a todos.

## RESUMO

### **Análise termodinâmico de turbina a gás: Estudo comparativo baseado em dados experimentais da literatura.**

Com o avanço tecnológico na indústria, as turbinas a gás foram sendo desenvolvidas de diversas formas. Pode-se perceber a aplicação dessa turbomáquina em diversos ramos, como na geração de energia elétrica, na indústria aeronáutica, na engenharia naval, dentre outras. Porém, não encontra-se na literatura um trabalho que compare em uma mesma base de hipóteses para a câmara de combustão diferentes turbinas a gás, em termos de análise termodinâmica (energética e exergética).

A partir de dados da literatura, será elaborado um banco de dados com propriedades termodinâmicas utilizadas, como temperatura e pressão, e as hipóteses adotadas. Com isso, através do software MATLAB, será desenvolvido um modelo termodinâmico para realizar a análise energética e exergética de uma turbina a gás. Em particular, será considerado o impacto do modelo de combustão: um modelo simplificado considerando a combustão como completa e um modelo mais elaborado considerando a combustão incompleta e usando a minimização da energia livre de Gibbs para definir a composição do gás de exaustão.

A simulação ocorreu conforme o esperado, porém foi analisado que é necessário ser preciso na escolha do cp, elemento fundamental para atingir um melhor resultado. Além disso, o refino do modelo de combustão usando a minimização da energia livre de Gibbs com o conjunto de hipóteses assumido não permitiu melhorar a representação dos produtos de combustão.

Palavras Chave: Turbinas á gás. Termodinâmica. Simulação. Matlab. Combustão.

## **ABSTRACT**

### **Comparison of energy and exergetic efficiencies of a gas turbine.**

With the technological advances of the industry, gas turbines were being developed in different ways. The application of this turbomachinery can be seen in various fields, such as electricity generation, aeronautical industry, naval engineering, among others. However, there is no study in the literature that compares different gas turbines on the same basis, in terms of thermodynamic analysis (energetic and exergetic).

From literature data, a database with hypotheses and thermodynamic properties, such as temperature and pressure, will be created. Thus, through MATLAB software, a thermodynamic model will be developed to perform the energy and exergetic analysis of a gas turbine. In particular, the impact of the combustion model will be considered: a simplified model considering combustion as complete and a more elaborate model considering incomplete combustion using Gibbs free energy minimization to define exhaust gas composition.

The simulation took place as expected, but it was analyzed that it is necessary to be precise when choosing the  $c_p$ , a fundamental element to achieve a better result. Furthermore, the refinement of the combustion model using Gibbs free energy minimization with the assumed set of hypotheses did not improve the representation of the combustion products.

**Keywords:** Turbine. Thermodynamics. Simulation. Matlab. Combustion.

## Sumário

Introdução	12
2. Revisão Bibliográfica	14
2.1 Tipos de turbina a gás	14
2.2 Estrutura de uma turbina a gás	17
2.2.1 Ventilador	17
2.2.2 Compressor	17
2.2.3 Câmara de Combustão	18
2.2.4 Turbina a gás	19
2.2.5. Bocal	19
2.3 Análise da eficiência de turbina	19
3 Análise Teórica	21
3.1 Ciclo Brayton	21
3.2 Volume de Controle	22
3.3 Lei da conservação de massa	22
3.4 1ª lei da termodinâmica	23
3.5 Análise exergética	23
3.6 Estrutura	25
3.7 Compressor de baixa pressão	25
3.8 Compressor de alta pressão	27
3.9 Câmara de Combustão	28
3.9.1. Combustão completa	30
3.9.2. Minimização da energia de Gibbs	31
3.10 Turbina de alta pressão	33
3.11 Turbina de baixa pressão	34
3.12 Bocal	35
3.13 Sistema Integrado	36
4 – Metodologia	37
4.1 Dados	38
5 Resultados e Discussão	41

5.1 Fluxo de Exergia	41
5.2 Eficiência Exergética	42
6 Conclusão	45

## **Lista de figuras**

Figura 1 - Representação de uma turbina a gás do tipo Turbojet. Fonte: Quora, 2019

Figura 2 - Aeronave com turbina Turboprop (Turboélice). Fonte: Chamone, Aviação Executiva.

Figura 3 - Representação de uma turbina turboshaft (turbo-eixo). Fonte: Alchetron, 2018

Figura 4 - Turbina turbofan. Fonte: Saint-Gobain

Figura 5 - Aeronave com turbina propfan. Fonte: Quora, 2018

Figura 6 - Compressor Axial e Compressor Centrífugo. Fonte: MAN-ES.

Figura 7 - Turbina a gás ciclo aberto e ciclo fechado. Fonte: Van Wylen, 1999

Figura 8 - Gráfico  $P \times v$  ciclo Brayton. Fonte: Van Wylen, 1999

Figura 9 – Esquema do tipo de turbina a ser estudado.

## **Lista de tabelas**

Tabela 1 - Coeficientes para cálculo da constante universal do gás. Fonte: Smith, J.M.; Van Ness, H. C.; Abbott, 2007.

Tabela 2 – Fundamentos da Termodinâmica, Van Wylen, Apêndice A, Tabela A.6

Tabela 3 - Dados utilizados para análise

Tabela 4 – Dados utilizados para análise.

Tabela 5 – Dados utilizados para análise.

Tabela 6 - Dados utilizados para análise.

Tabela 7 – Resultados e erros obtidos para fluxo de exergia.

Tabela 8 – Resultados e erros obtidos para fluxo de exergia

Tabela 9 – Resultados obtidos para eficiência exergética.

Tabela 10– Resultados obtidos para eficiência exergética.



## Nomenclatura

### Símbolos

$CC$	Câmara de combustão
$c_p$	Calor específico à pressão constante $[kJ/kg.K]$
$c_v$	Calor específico à volume constante $[kJ/kg.K]$
$E$	Energia total $[kJ]$
$f$	Fração molar das espécies $[-]$
$G$	Energia livre de Gibbs $[kJ]$
$g$	Aceleração da gravidade $[m/s^2]$
$GT$	Turbina a gás ( <i>Gas Turbine</i> )
$H$	Entalpia $[kJ]$
$h$	Entalpia específica $[kJ/kg]$
$HPC$	Compressor de alta pressão ( <i>High Pressure Compressor</i> )
$HPT$	Turbina de alta pressão ( <i>High Pressure Turbine</i> )
$k$	Coeficiente de expansão adiabática $[-]$
$LHV$	Poder calorífico inferior $[kJ/kg]$
$LPC$	Compressor de baixa pressão ( <i>Low Pressure Compressor</i> )
$LPT$	Turbina de baixa pressão ( <i>Low Pressure Turbine</i> )
$M$	Massa molar $[kg/mol]$
$m$	Massa $[kg]$
$\dot{m}$	Vazão mássica $[kg/s]$
$n$	Quantidade de matéria $[mol]$
$P$	Pressão $[kPa]$
$Q$	Calor $[kJ]$
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor $[kW]$
$q$	Calor por unidade de massa $[kJ/kg]$
$R$	Constante universal dos gases $[kJ/mol.K]$
$S$	Entropia $[kJ/K]$
$s$	Entropia específica $[kJ/kg.K]$
$T$	Temperatura $[K]$
$t$	Tempo $[s]$

$U$	Energia interna [ $kJ$ ]
$u$	Energia interna específica [ $kJ/kg$ ]
$\mathcal{V}$	Velocidade [ $m/s$ ]
$V$	Volume [ $m^3$ ]
$v$	Volume específico [ $m^3/kg$ ]
$W$	Trabalho [ $kJ$ ]
$\dot{W}$	Potência [ $kW$ ]
$w$	Trabalho específico [ $kJ/kg$ ]
$X$	Exergia [ $kJ$ ]
$\dot{X}$	Taxa exergética [ $kW$ ]
$x$	Exergia específica [ $kJ/kg$ ]

#### Letras gregas

$\delta$	Variação
$\eta$	Eficiência [-]
$\lambda$	Relação combustível-ar mássica [-]
$\xi$	Relação exergia-energia do combustível [-]
$\sigma$	Entropia produzida por irreversibilidades [ $kJ$ ]

#### Subscritos

0	Estado termodinâmico de referência ou estado morto
1,2,3,4,5	Estados termodinâmicos do ar ou gases de combustão
$a$	Ar
$b$	Vizinhança imediata
$c$	Compressão
$cv$	Volume de controle
$CH_4$	Gás natura considerado com metano puro
$C_{12}H_{23}$	Querosene de aviação
$d$	Destruída
$e$	Saída
$f$	Combustível
$g$	Gases da combustão

<i>i</i>	Entrada
<i>k</i>	Componente molecular
<i>KE</i>	Energia cinética
<i>liq</i>	Líquida
<i>mol</i>	Molar
<i>PE</i>	Energia potencial
<i>r</i>	Real
<i>s</i>	Reversível
<i>x</i>	Exergética

#### **Sobrescritos**

<i>exp</i>	Experimental
<i>F</i>	Física
<i>P</i>	Pressão
<i>Q</i>	Química
<i>S</i>	Estequiométrica
<i>T</i>	Temperatura

## Introdução

Em 1791, com a patente registrada pelo inglês John Barber, foram desenvolvidos os primeiros modelos de turbina a gás, utilizando o ciclo termodinâmico moderno (Gonçalves, 2019). Ao longo do tempo, com a inovação tecnológica, se fez necessário o aprimoramento da máquina. O que diferencia os tipos de turbina são o fluido de trabalho dentro da câmara de combustão, a temperatura máxima de operação, a potência máxima, a pressão de trabalho e suas dimensões. Os elementos principais que as compõem são o compressor de ar, a câmara de combustão, o sistema de alimentação de combustível, a própria turbina a gás e, quando necessário, trocador de calor (regenerador) e refrigeradores.

Durante a 2ª Guerra Mundial, ficou evidenciada a necessidade de aeronaves militares mais rápidas e com maior autonomia de voo. Com base nesses estudos e projetos, foram desenvolvidos modelos para diversas aplicações industriais, graças ao avanço nos processos metalúrgicos e de conformação. Atualmente, as turbinas a gás são uma aplicação em ascendência na indústria, tendo como principais focos a geração de energia elétrica, a indústria aeronáutica e a engenharia naval.

Como uma máquina térmica, a turbina a gás possui vantagens em relação às outras. Versatilidade de operação, alta confiabilidade e sua alta potência frente ao espaço necessário para instalação são alguns exemplos. Porém, a maior desvantagem consiste no elevado custo de implantação e manutenção, e também, por operar em altas temperaturas, precisam ser bem projetadas.

Na termodinâmica, o ciclo Brayton é considerado o ciclo ideal que governa o comportamento das turbinas a gás. Este ciclo é um ciclo padrão ar ideal (sem perdas mecânicas de energia) e descreve variações de estado (pressão e temperatura) dos gases. É um modelo simplificado para análise do ciclo real, assume que o fluido de trabalho percorre um ciclo termodinâmico, evitando a complexidade da combustão e outras irreversibilidades. Atua, por hipótese, com adição de calor a pressão constante, sendo composto por 4 processos reversíveis: compressão isentrópica através de um compressor, adição de calor a pressão constante no interior da câmara de combustão, expansão isentrópica pela turbina e expulsão de calor e pressão constante (Van Wylen, 1997).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta universal para comparar os diversos tipos de turbinas a gás em uma mesma base de cálculo. Será

elaborado um banco de dados com as propriedades termodinâmicas e as hipóteses usadas em trabalhos de literatura. Em seguida, será desenvolvido um modelo termodinâmico para realizar uma análise energética e exergética de uma turbina a gás. Em particular, será considerado o impacto do modelo de combustão: um modelo simplificado considerando a combustão como completa e um modelo mais elaborado considerando a combustão incompleta e usando a minimização da energia de Gibbs para definir a composição do gás de exaustão.

No desenvolvimento do trabalho, são aplicados os conceitos de termodinâmica relacionada a 1ª e 2ª leis (balanços de energia e exergia) aos dados experimentais obtidos e as hipóteses assumidas. A modelagem de operação da turbina a gás escolhida foi desenvolvida através do software MATLAB tendo como base de dados de entrada e saída as temperaturas e eficiências energéticas e exergéticas de cada parte da turbina (compressores, câmara de combustão e a própria turbina) extraídos do artigo de Sohret (2016). Será desenvolvido um código utilizando dados de entrada como vazões mássicas, temperaturas, pressões e eficiências isentrópicas que possibilitarão retornar como resultado eficiência energética e exergética. Sendo assim, será necessário considerar uma temperatura e pressão conhecidas para poder abranger o estudo a diversos tipos de combustíveis e utilizar a combustão completa e incompleta na câmara de combustão podendo concluir qual tem melhor rendimento.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Tipos de turbina a gás

As turbinas a gás podem ser classificadas de acordo com a origem do seu desenvolvimento, o projeto da câmara de combustão e respectivo número de eixos. Elas são divididas em turbojet, turboprop, turboshaft, turbofan, propfan e advanced ducted fan engines (Sohret 2016).

A turbina turbojet foi a primeira projetada e é a mais simples entre os outros tipos. É um motor a jato de respiração, normalmente usado em aeronaves. Consiste em uma turbina a gás com um bico de propulsão. A turbina a gás possui uma entrada de ar, um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina (que aciona o compressor). O compressor acionado pela turbina aspira e comprime o ar, obtendo uma combustão em alta pressão e temperatura devido a injeção do combustível na câmara de combustão. A ignição faz os gases se expandirem e se deslocarem primeiramente através da turbina e depois através de um bico na parte traseira. A figura 1 abaixo, demonstra esse tipo de turbina.

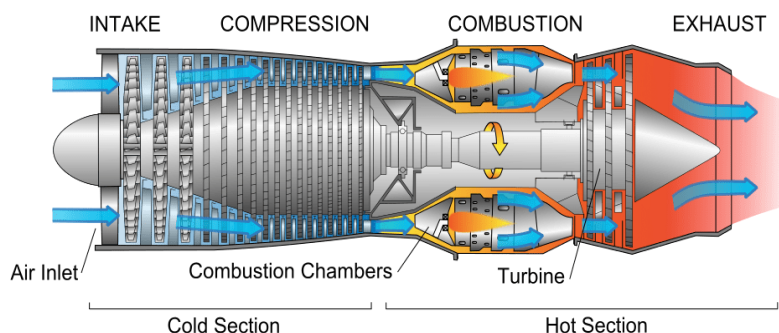


Figura 1 - Representação de uma turbina a gás do tipo Turbojet. Fonte: Quora, 2019

Aeronaves de baixa velocidade e pequenas aeronaves de passageiros fazem o uso da turbina Turboprop (propulsão turboélice), como mostra a figura 2 abaixo. A turbina é um motor híbrido que fornece propulsão a jato e também aciona uma hélice. A diferença para a turbina turbojet é que a turbina adicionada, na parte traseira da câmara de combustão, trabalha através de um eixo e engrenagens de redução de velocidade para girar uma hélice na frente do motor. (Eller, 2018).



Figura 2 - Aeronave com turbina Turboprop (Turboélice). Fonte: Chamone, Aviação Executiva.

As turbinas a gás que fornecem energia para aeronaves de asa rotativa, ou helicópteros, são chamadas de turboschaft (turbo-eixo). Elas são projetadas para que a velocidade do rotor do helicóptero seja independente da velocidade de rotação do gerador de gás e possuem a vantagem da relação potência/peso serem muito mais altas que os motores de pistão (Turan, 2016). A figura 3 abaixo, representa o tipo de turbina citado.

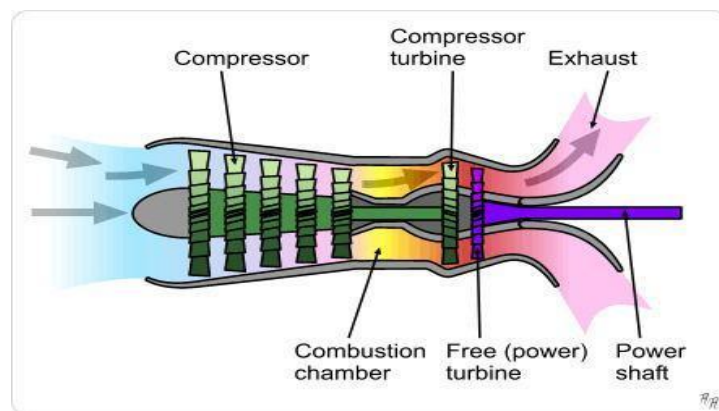


Figura 3 - Representação de uma turbina turboschaft (turbo-eixo). Fonte: Alchetron, 2018

Turbofans são a junção das melhores qualidades das turbojets e turboprops. Atualmente, é usual em aeronaves que transportam muitos passageiros, representada na figura 4 abaixo. O seu funcionamento é baseado em conectar um ventilador na frente do turbojet. Com isso, o ventilador cria um impulso adicional, ajudando a resfriar o motor e reduzindo a emissão de ruído (Sohret 2015).



Figura 4 - Turbina turbofan. Fonte: Saint-Gobain

Motores a jato de ventoinha não encadeados são chamados de propfans. Os mesmos obtêm o fluxo de ar devido a hélices de acordes amplas acionadas pelo motor a jato. A diferença para as turbofans é a ausência da carcaça do motor que amortece o seu ruído. (Autoentusiastas). A figura 5 abaixo, representa a aeronave com turbina propfan.



Figura 5 - Aeronave com turbina propfan. Fonte: Quora, 2018



## **2.2 Estrutura de uma turbina a gás**

### **2.2.1 Ventilador**

Nas turbinas a gás, o ventilador tem como principal função girar em alta velocidade para coletar o ar atmosférico. Toda essa quantidade sugada é direcionada para o compressor (Van Wylen, 1997).

### **2.2.2 Compressor**

Um dos componentes principais para o funcionamento de uma turbina a gás é o compressor. Os compressores são equipamentos utilizados para aumentar a pressão no fluido pela adição de trabalho de eixo. (Van Wylen, 1997). A turbina pode ter um ou mais compressores, dependendo de sua finalidade. É o local onde o ar entra e ocorre compressão adiabática e consequentemente também o aumento de temperatura.

O compressor pode ser axial ou centrífugo. Os compressores axiais são utilizados majoritariamente em turbinas a gás de maior tamanho, possuem altas razões de pressão e são constituídos em múltiplos estágios, normalmente entre 8 e 16 estágios. Em comparação, os compressores centrífugos são o oposto. São mais adequados em turbinas de menor potência, atuando em baixas pressões. Porém, ambos são constituídos por um rotor e um difusor que compõem um estágio. Cada estágio é composto por uma fileira de palhetas rotativas que produzem energia cinética (movimento ao fluxo de ar) e uma fileira de palhetas estáticas, que convertem a energia cinética em aumento de pressão. Para o acionamento do compressor, cerca de metade da potência é produzida pela turbina de potência e o restante é a potência líquida gerada. O ar sai do compressor a uma temperatura que geralmente varia entre 300°C e 400°C. As figuras 6 e 7 abaixo, representam os dois tipos de compressores (Nebra).

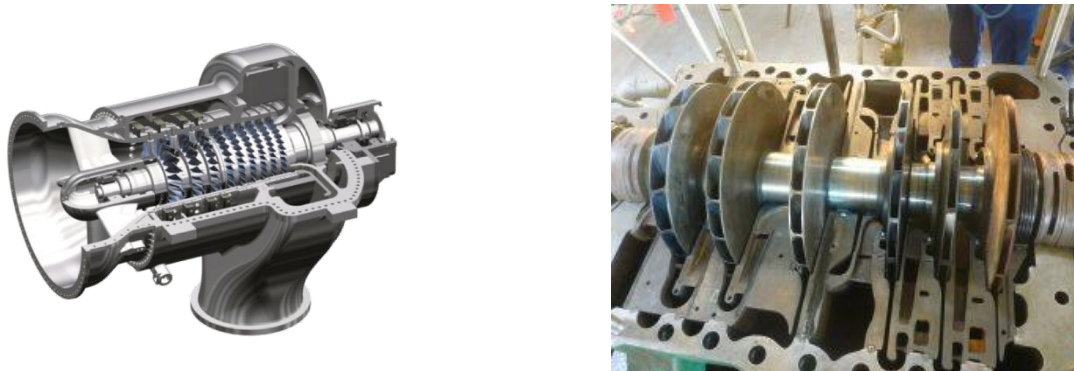


Figura 6 - Compressor Axial e Compressor Centrífugo. Fonte: MAN-ES.

### 2.2.3 Câmara de Combustão

A câmara de combustão é responsável pela transformação da energia química contida nos combustíveis em energia térmica, que provocará uma expansão dos gases, aumentando sua velocidade e consequentemente, sua energia cinética. Esta energia é aproveitada por uma turbina, que irá movimentar o eixo realizando trabalho de eixo (Batista, 2011).

O principal objetivo da câmara de combustão é ter uma alta eficiência na queima de combustível para não ocorrer queima irregular, tendo como possível resultado um maior consumo e maior emissão de gases poluentes. Além disso, é importante obter a menor queda de pressão possível nos componentes. (Van Wylen, 1997).

A fórmula química do combustível injetado na câmara de combustão é  $C_{12}H_{23}$ . De acordo com Sohret (2016), nos estudos em busca de melhorias nas análises exérgicas, há a preferência de composição de combustível utilizando hidrogênio, metanol e metano, ao invés de combustíveis comuns na aviação como JP-8, Jet-A e Jet-A1.

Será feita a análise pelo combustível  $C_{12}H_{23}$  e também do combustível junto com o gás  $CH_4$ , sendo possível dessa forma, obter uma modelagem que seja capaz de gerar resultados para qualquer tipo de combustível.

Para análise da eficiência energética na câmara de combustão, será utilizado ou o conceito de combustão completa ou o método de minimização da energia livre de Gibbs. A vantagem da utilização desse método é que não é necessário considerar reação química para achar a solução desejada e permite considerar os produtos de

combustão incompleta como  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  (representando hidrocarbonetos não queimados) ou  $\text{H}_2$ .

#### **2.2.4 Turbina a gás**

O componente turbina a gás também é um componente único, separado, podendo ser de alta ou de baixa pressão, e não como a junção de todos os componentes. Chamamos de turbina a gás, o equipamento geral que compõe na maioria das vezes, ventilador, compressores, câmara de combustão, as próprias turbinas a gás, bocais, dentre outros. Especificamente nesse momento, analisa-se a turbina a gás como um componente por si só, sem ser considerado um agrupamento. (Van Wylen, 1997)

A turbina a gás é um componente dedicado ao trabalho de eixo (ou potência). O trabalho realizado na turbina é produzido a partir da queda de pressão do fluido de trabalho que sai da câmara de combustão após a ignição de combustível.

#### **2.2.5. Bocal**

O vapor gerado pela turbina é expandido no bocal, à pressão ambiente, para a atmosfera. Desse modo, se o fluxo de saída for maior do que o de entrada, tem-se um impulso positivo. No caso de um jato, o impulso positivo sobre a fuselagem gera o necessário para o funcionamento da turbina e a propulsão do avião.

A variação de energia potencial do escoamento é nula ou muito pequena, e a transferência de calor também não é significativa em bocais para turbinas a gás de aeronaves. (Van Wylen, 1997)

### **2.3 Análise da eficiência de turbina**

De acordo com Sohret (2016), o uso da análise exergética para avaliar a performance dos diferentes tipos de turbinas a gás, aumentou extensivamente nos 3 anos anteriores à publicação. Com os dados compilados de diversos artigos de autores distintos, foi concluído que a média da eficiência exergética dos compressores de ar é de 88,42%. Como hipótese, foi utilizado o conceito de eficiência isentrópica, sendo a mesma, a razão entre o trabalho resultante real da turbina e o trabalho resultante que seria alcançado se o processo entre o estado de entrada e a pressão

de saída fosse isentrópico (transformação termodinâmica em que a entropia do sistema se mantém constante).

As razões para as variações da eficiência podem ser listadas como as suposições feitas para a variabilidade de eficiência isoentrópica e adiabática, as condições ambientais, a vazão mássica, a composição do ar assumida, entre outros. Dependendo dessas variações, a média da eficiência exergética dos compressores de ar pode se estabelecer entre 80% e 90%. Para as câmaras de combustão, a eficiência exergética conforme Sohret (2016), possui média entre 60% e 70%. Sendo considerada a mais baixa comparada aos outros componentes da turbina a gás. Esse fato se deve pela irreversibilidade do processo de combustão. A turbina a gás é considerada o componente mais eficiente comparado com os outros analisados. A mesma tem média de 98%. As variações são devido aos parâmetros assumidos, como a composição da mistura de gás na combustão.

Sohret (2016) realizou a análise exergética de diferentes tipos de motores de turbinas a gás (Turboprop, Turbojet, Turbofan) através de cada um dos seus componentes. No estudo, pode-se perceber como resultado que o compressor, a câmara de combustão, a turbina a gás, a turbina de potência e o exaustor criaram respectivamente, 9%, 69%, 13%, 7% e 2% do total do impacto ambiental. Com isso, foi possível concluir que o aperfeiçoamento dos componentes do compressor e da turbina a gás são relevantes para reduzir esse impacto significativo.

### 3 Análise Teórica

#### 3.1 Ciclo Brayton

O ciclo Brayton aberto é o ciclo termodinâmico característico para turbina a gás. O ciclo é composto por compressor, turbina e câmara de combustão como demonstrado na figura 7 - esquerda. Para facilitar, pode-se considerar o ciclo aberto como um ciclo fechado, substituindo a câmara de combustão por um trocador de calor. Além disso, seria necessário incluir um outro trocador de calor após a turbina, onde ocorrem as perdas de calor conforme figura 7 - direita abaixo.

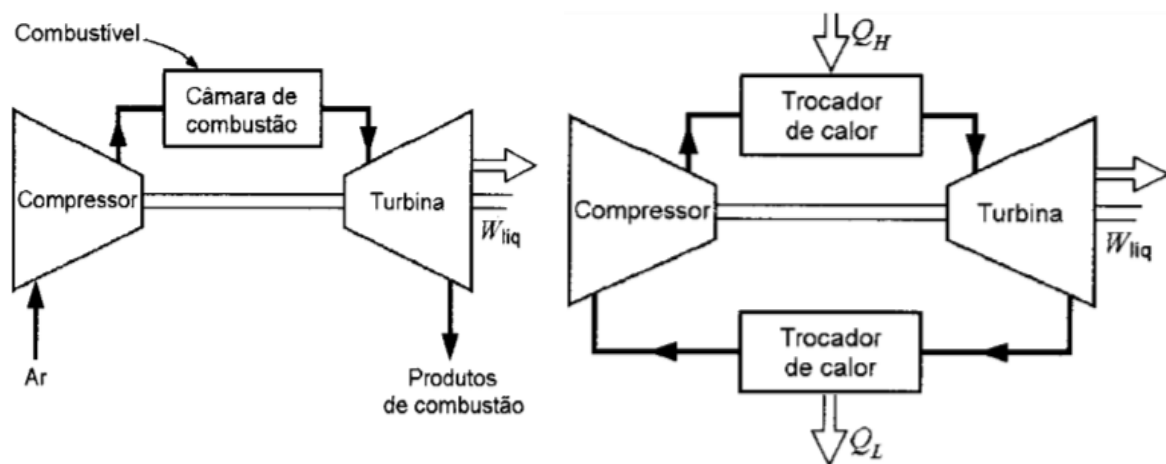


Figura 7 - Turbina a gás ciclo aberto e ciclo fechado. Fonte: Van Wylen, 1999

O ciclo fechado é idealizado por quatro processos internamente reversíveis, dois processos isentrópicos ( $2 \rightarrow 1$  e  $3 \rightarrow 4$ ) e alternados com dois processos isobáricos ( $2 \rightarrow 3$  e  $4 \rightarrow 1$ ) conforme figura 8 abaixo. Na compressão isentrópica, o ar é comprimido adiabaticamente do estado 1 para o estado 2 pelo compressor. Dessa forma, a energia interna aumenta e o ar é comprimido no ambiente, aumentando a pressão. No trocador de calor, entre o estado 2 e 3, há a adição de calor isobárico. A partir de uma fonte externa, há a transferência de calor de pressão constante para o ar. Em um ciclo Brayton ideal aberto, o qual há a câmara de combustão, o ar passa pela mesma. É um processo de pressão constante, já que a câmara está aberta para entrar e sair. Na expansão isentrópica, do estado 3 para o estado 4, o ar comprimido e aquecido se expande adiabaticamente na turbina. No outro trocador de calor, há a rejeição de calor isobárica, do estado 4 para o estado 1. O ciclo é concluído por um processo de pressão constante no qual o calor é rejeitado pelo gás.

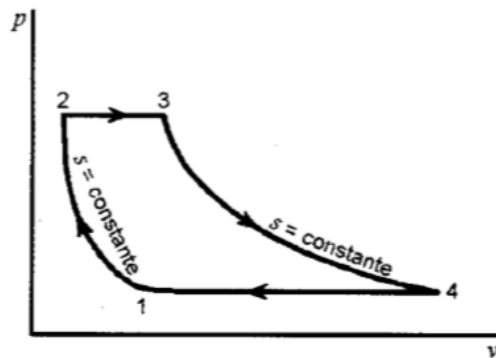


Figura 8 - Gráfico P x v ciclo Brayton. Fonte: Van Wylen, 1999

### 3.2 Volume de Controle

A superfície de controle é uma superfície sempre fechada que envolve um volume de controle, definido com um volume no espaço. As três propriedades que podem atravessar a superfície de controle são massa, calor e trabalho (a primeira podendo variar ao longo do tempo).

Em uma turbina a gás, o volume de controle normalmente é composto por transferência de calor, trabalho de eixo, movimento de fronteira e acumulação de massa.

### 3.3 Lei da conservação de massa

Para a aplicação da lei da conservação de massa, é necessário entender previamente que é impossível criar ou destruir matéria. Dessa forma, considerando um volume de controle, deve-se aceitar que os fluxos de massa que entram, saem do volume de controle da mesma forma. Sendo considerado também o aumento líquido de massa no interior do volume de controle.

Com isso, é definido que a taxa de variação da massa no volume de controle pode ser diferente de zero se a vazão em massa que entra no volume de controle for diferente que a vazão em massa que sai do volume de controle. Considerando vários escoamentos entrando e saindo do volume de controle, pode-se representar por:

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1)$$

A equação (1) acima descreve que a variação de massa por tempo será a diferença entre a massa de entrada e a massa de saída.

### 3.4 1ª lei da termodinâmica

A descrição do sistema termodinâmico é essencial na aplicação da energia e exergia. A primeira lei da termodinâmica é utilizada para determinar a equação para volumes de controle. No caso, será definido que cada componente da turbina a gás será considerado um volume de controle distinto.

Dessa forma, é possível considerar a equação abaixo para uma forma geral, a ser utilizada por cada componente independente:

$$\Delta \dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{E}_e - \sum \dot{E}_s \quad [kW] \quad (2)$$

$$\Delta \dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left[ h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right] - \sum \dot{m}_s \left[ h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right] = 0 \quad (3)$$

Sendo a energia cinética e potencial desprezíveis:

$$\Delta \dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s \quad (4)$$

Na equação (4), tem-se que  $\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor transferida para o volume de controle durante o processo do estado 1 para o estado 2,  $\Delta \dot{E}$  é a taxa de variação da energia do volume de controle e  $\dot{W}$  é a potência realizada pelo volume de controle durante o processo.

### 3.5 Análise exérgica

A análise exérgica para volume de controle pode ser representada pela equação (5) abaixo:

$$\sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) * \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{E}_{x_e} - \sum \dot{E}_{x_s} - \dot{E}_{x_d} = \Delta \dot{E}_x [kW] \quad (5)$$

Sendo  $\dot{Q}_k$ , a taxa de transferência de calor através da fronteira de temperatura  $T_k$ ,  $\dot{W}$  é a potência,  $\dot{E}_{x_e}$  e  $\dot{E}_{x_s}$  são as taxas de exergia de entrada e saída, respectivamente,  $\dot{E}_{x_d}$  é a taxa de destruição de exergia e  $\Delta \dot{E}_x$  é a taxa de variação de exergia dentro do volume de controle. Como no objeto de estudo tem-se a ausência de nuclear e magnetismo, a exergia total para um fluxo de matéria através de um volume de controle, pode ser determinado através de:

$$\dot{E}_x = m(ex^{CN} + ex^{PG} + ex^{QM} + ex^{FS}) \quad (6)$$

Sendo  $ex^{CN}$  a exergia cinética,  $ex^{PG}$  a exergia potencial,  $ex^{QM}$  a exergia química e  $ex^{FS}$  a exergia física.

De acordo com as hipóteses assumidas, as mudanças nas exergias cinéticas e potenciais são quase nulas, ou seja, serão desconsideradas nos cálculos. Dessa forma, para  $ex^{FS}$  tem-se, assumindo que as espécies se comportam como um gás ideal que:

$$ex^{FS} = c_p \left[ T - T_o \ln \left( \frac{T}{T_o} \right) \right] + RT_o \ln \left( \frac{P}{P_o} \right) \quad (7)$$

E  $ex^{QM}$  considerando um combustível líquido genérico ( $C_x H_x O_z S_\sigma$ ) :

$$\frac{ex^{QM}}{LHV} = \gamma_f = 1,041 + 0,01728 \frac{y}{x} + 0,0432 \frac{z}{x} + 0,2196 \frac{\sigma}{x} (1 - 2,0628 \frac{y}{x}) \quad (8)$$

Onde  $\gamma_f$  é a função de exergia de combustível e LHV é o valor calorífico mais baixo.

Considerando gás natural segundo Kotas, 1985:

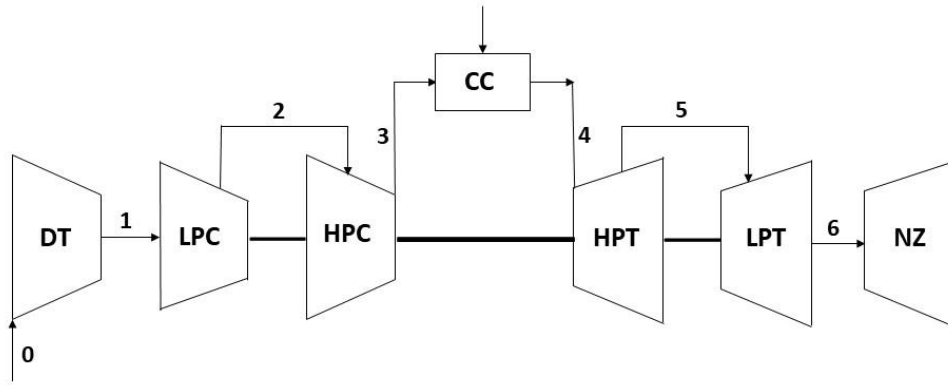
$$\gamma_f = 1,0438 + 0,1882 \frac{y}{x} + 0,0383 \frac{z}{x} + 0,2509 \frac{\sigma}{x} (1 + 0,7256 \frac{y}{x}) \quad (9)$$



### 3.6 Estrutura

A figura abaixo representa basicamente o tipo de turbina a ser estudado. A modelagem constará com um ventilador (DT), um compressor de baixa (LPC) e alta pressão (HPC), a câmara de combustão (CC), uma turbina de baixa (LPT) e alta pressão (HPT) e um bocal na saída (NZ). Em algumas literaturas, foi considerado a injeção de água na câmara de combustão e uma válvula de by-pass. Além disso, algumas literaturas só consideram um compressor e/ou uma turbina).

Figura 9 – esquema do tipo de turbina a ser estudado.



### 3.7 Compressor de baixa pressão

A análise do módulo do compressor de baixa pressão é feita considerando regime permanente e que não há transferência de calor do fluido de trabalho durante a compressão.

Dessa forma, de acordo com a lei de conservação de massa, temos que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{ar} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (10)$$

Onde:  $\dot{m}_{ar}$  é a massa de fluxo de ar

E a potência do compressor de alta pressão pode ser definida como:

$$\dot{W}_{LPC} = \dot{m}_{ar} (c_{p2} * T_2 - c_{p1} * T_1) \quad [kW] \quad (11)$$

Usando:

$$c_{p,ar}(T) = Ra(3,335 + 0,575 * 10^{-3}T - 0,016 * 10^5 * T^{-2}) \quad \left[ \frac{kJ}{kg*K} \right] \quad (12)$$

Também foi utilizado o  $c_{p,ar}$  segundo Van Wylen para melhoria nos resultados também em  $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ :

$$c_{p,ar}(T) = Ra(1,05 - 0,365 * 10^{-3}T + 0,85 * 10^{-6} * T^2 - 0,39 * 10^{-9} * T^3)$$

Onde:

$$Ra = \frac{R}{\text{massa molar do ar}} = \frac{8,3144621 * 10^{-3}}{28,965 * 10^{-3}} \approx 0,287 \text{ kJ/kg.K} \quad (14)$$

Sendo assim, a equação (15) corresponde a equação geral do compressor de alta pressão:

$$\dot{W}_{LPC} + \dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_1} = \dot{E}_{x_{dest,LPC}} \quad (15)$$

Através do conceito de eficiência isentrópica, o rendimento energético do compressor pode ser obtido através das temperaturas de entrada e saída de acordo com a equação (15) abaixo:

$$T_2 = T_1 * \left\{ 1 + \eta_{x_{LPC}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-\mu_{a_{LPC}}}{\mu_{a_{LPC}}}} \right] \right\} [K] \quad (16)$$

Sendo,

$$\mu_{a_{LPC}} = \frac{1}{1 - \frac{Ra}{c_{p,ar} \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right)}} \quad (17)$$

E  $\eta_{LPC}$  a eficiência exergética, a qual é obtida através da equação (x) abaixo segundo a 2ª lei da termodinâmica:

$$\eta_{x_{LPC}} = 1 - \left( \frac{\dot{E}_{x_{d,LPC}}}{\dot{E}_{x_2} + \dot{W}_{LPC}} \right) \quad (18)$$

Onde  $\dot{E}_{x_{d,LPC}}$  é a taxa de exergia destrutiva e  $\dot{E}_{x_2}$  é a taxa de exergia na entrada do compressor.

### 3.8 Compressor de alta pressão

A modelagem do compressor de alta pressão é análoga ao compressor de baixa pressão, tendo como diferença os componentes de entrada e saída e as perdas durante a compressão do ar no compressor de baixa pressão. Além disso, algumas literaturas consideram uma válvula de by-pass acoplada ao compressor de alta pressão. Dessa forma, tem-se que:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{3'} = \dot{m}_{ar} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (19)$$

Sendo  $\dot{m}_{3'}$ , é a vazão mássica do ar que não será direcionada a câmara de combustão (função da razão de by-pass).

A potência do compressor de alta pressão, segundo a equação (20):

$$\dot{W}_{HPC} = \dot{m}_{ar} * (c_{p3} * T_3 - c_{p2} * T_2) \quad [kW] \quad (20)$$

Com isso, o balanço exergético será:

$$\dot{W}_{HPC} + \dot{E}_{x_3} + \dot{E}_{x_{3'}} - \dot{E}_{x_2} = \dot{E}_{x_{dest,HPC}} \quad (21)$$

E de forma similar ao compressor de baixa pressão, é possível obter o rendimento energético através das pressões e temperaturas conhecidas:

$$T_3 = T_2 * \left\{ 1 + \eta_{x_{HPC}} * \left[ 1 - \left( \frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{1-\mu_{a_{HPC}}}{\mu_{a_{HPC}}}} \right] \right\} \quad (22)$$

Sendo,

$$\mu_{a_{HPC}} = \frac{1}{1 - \frac{Ra}{c_{p,ar} \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right)}} \quad (23)$$

E a eficiência exergética:

$$\eta_{x_{HPC}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{d,HPC}}}{\dot{E}_{x_3} + \dot{E}_{x_{3'}} + \dot{W}_{HPC}} \quad (24)$$

### 3.9 Câmara de Combustão

Na câmara de combustão, o fluido de trabalho é mais complexo, porque ocorre uma mistura de ar com combustível e eventualmente com água. Após a saída do compressor, o ar entra na câmara e sai como mistura de gás de combustão após a injeção de combustível pelos bicos injetores.

Dessa forma, segundo a lei de conservação de massa:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_f + \dot{m}_w = \dot{m}_g = \dot{m}_4 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (25)$$

Onde  $\dot{m}_f$  é a massa de combustível,  $\dot{m}_w$  é a massa de água presente em algumas literaturas e  $\dot{m}_g$  a vazão de mistura ar-combustível.

Sendo assim, de acordo com Balli 2013,

$$\dot{m}_3 * c_{p,a,3} * T_3 + \eta_{cc} * \dot{m}_f * LHV + \dot{m}_w c_{p,w} * T_w = \dot{m}_4 * c_{p,a,4} * T_4 [kW] \quad (26)$$

Onde  $\eta_{cc}$  é a eficiência energética da combustão.

Na câmara de combustão, o fluido de trabalho passa a ser a mistura gasosa de produtos de combustão resultante da mistura ar + combustível, como dito acima, desse modo, pode-se considerar que:

$$c_{p_g} = \sum f_i R_i (A + 10^3 B T + 10^{-5} D T^{-2}) \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (27)$$

Sendo,  $R_i$  a constante universal para cada gás da composição do fluido de trabalho ar+combustível.

No caso do gás,

$$R_g = \frac{R}{M_g} \quad (28)$$

Onde,  $M_g$  é a massa molar do gás de combustão calculada por:

$$M_g = f_i * M_i \quad (29)$$

Sendo  $f_i$  a fração molar de cada componente e  $M_i [\frac{kg}{mol}]$ , a massa molar de cada componente.

Os valores de A, B e D estão relacionadas na tabela abaixo:

Tabela 1 - Coeficientes para cálculo da constante universal do gás. Fonte: Smith, J. M.; Van Ness, H. C.; Abbott, 2007.

Espécie química	A	B	D
Ar	3,355	0,575	-0,016
CO <sub>2</sub>	5,457	1,045	-1,157
O <sub>2</sub>	3,639	0,506	-0,227
N <sub>2</sub>	3,28	0,593	0,04
H <sub>2</sub> O	3,47	1,45	0,121
CO	3,376	0,557	-0,031
H <sub>2</sub>	3,141	0,610	-6,85
CH <sub>4</sub>	1,702	9,081	-2,164

Através de uma formulação alternativa e a fim de comparar posteriormente os resultados, foi considerado também uma outra formulação para o  $c_{p_g}$ . Sendo assim, foi criada uma nova modelagem com o mesmo mecanismo original, porém com a alteração dos valores do  $c_{p_g}$  conforme equação abaixo:

$$c_{p_g} = \sum f_i (A + 10^{-3}BT + 10^{-6}CT^2 + 10^{-9}DT^3) \quad (30)$$

Sendo:

Tabela 2 – Fundamentos da Termodinâmica, Van Wylen, Apêndice A, Tabela A.6

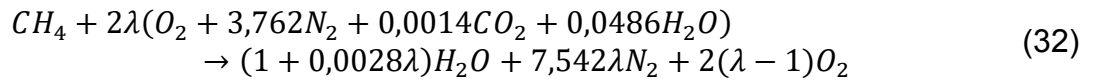
Espécie química	A	B	C	D
Ar	1,05	-0,365	0,85	-0,39
CO <sub>2</sub>	0,45	1,67	-1,27	0,39
O <sub>2</sub>	0,88	-0,0001	0,54	-0,33
N <sub>2</sub>	1,11	-0,48	0,96	-0,42
H <sub>2</sub> O	1,79	0,107	0,586	-0,20
CO	1,10	-0,46	1,00	-0,454
H <sub>2</sub>	13,46	4,6	-6,85	3,79
CH <sub>4</sub>	1,2	3,25	0,75	-0,71

Dessa forma, a eficiência exergética para a câmara de combustão é:

$$\eta_{x_{cc}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{d,cc}}}{\dot{E}_{x_f} + \dot{E}_{x_3} + \dot{E}_{x_w}} \quad (31)$$

### 3.9.1. Combustão completa

A reação de combustão completa pode ser representada pela equação (32) abaixo para o gás natural:



Sendo:

$$y_{N_2} = \frac{7,524\lambda}{1 + 9,624\lambda} \quad (33)$$

$$y_{O_2} = \frac{2(\lambda - 1)}{1 + 9,624\lambda} \quad (34)$$

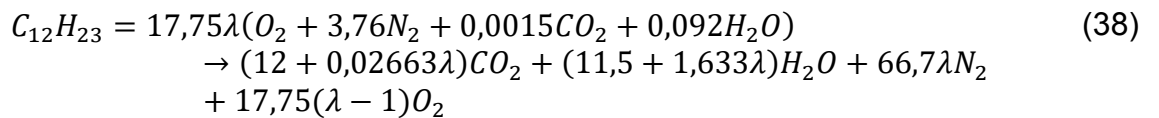
$$y_{CO_2} = \frac{1 + 0,0028\lambda}{1 + 9,624\lambda} \quad (35)$$

$$y_{H_2O} = \frac{2 + 0,0972\lambda}{1 + 9,624\lambda} \quad (36)$$

$$\lambda = \frac{AF}{AF_M^S} = \frac{1}{17,5} \quad (37)$$

Onde,  $y_i$  representa a fração molar de cada elemento químico.

E para o combustível  $C_{12}H_{23}$  de acordo com Turan, 2016:



Sendo a fração molar dos gases de combustão e a fração de cada componente:

$$n_g = 1 + 17,75\lambda(3,76 + 0,0015 + 0,092) = 86,15\lambda + 1 \quad (39)$$

$$f_{N_2} = \frac{66,7\lambda}{86,15\lambda + 1} \quad (40)$$

$$f_{O_2} = \frac{17,75(\lambda - 1)}{86,15\lambda + 1} \quad (41)$$

$$f_{CO_2} = \frac{12 + 0,02663\lambda}{86,15\lambda + 1} \quad (42)$$

$$f_{H_2O} = \frac{11,5 + 1,633\lambda}{86,15\lambda + 1} \quad (43)$$

Para ter estequiometria:

$$AF_M^S = 86,15 \quad (44)$$

Sendo a massa molar do ar e do combustível:

$$M_a = 28,965 \left[ \frac{kg}{kmol} \right] \quad (45)$$

$$M_{C_{12}H_{23}} = 167,311 \left[ \frac{kg}{kmol} \right] \quad (46)$$

Dessa forma:

$$M_a AF_M^S = AF_M^S \frac{M_a}{M_{C_{12}H_{23}}} = 86,15 \frac{28,965}{167,311} = 14,91 \quad (47)$$

### 3.9.2. Minimização da energia de Gibbs

A segunda lei da termodinâmica pode ser rearranjada como uma nova grandeza denominada Energia de Gibbs quando a temperatura T e a pressão P são constantes. Sabendo que a combustão é sempre espontânea, pode-se utilizar da energia livre de Gibbs para determinar a fração de energia que será utilizada para realizar trabalho através da equação (48) abaixo:

$$\Delta G = G_{final} - G_{inicial} \quad (48)$$

Onde  $\Delta G$  é a diferença entre  $G_{final}$ , a energia livre de Gibbs dos produtos e  $G_{inicial}$ , a energia livre de Gibbs dos reagentes.

É possível ainda reescrever a equação de Gibbs em termos da variação de entropia e entalpia:

$$\Delta G_{sistema} = \Delta H_{sistema} - T\Delta S_{sistema} \quad (49)$$

Quando o processo é exotérmico ( $\Delta H_{sistema} < 0$ ), e a entropia do sistema aumenta ( $\Delta S_{sistema} > 0$ ), o sinal de  $\Delta G_{sistema}$  é negativo para todas as temperaturas. Assim, o processo é sempre espontâneo.

Por outro lado, no estado de equilíbrio do sistema a energia livre total de Gibbs é minimizada. Dessa forma, a energia livre total de Gibbs é definida como:

$$G^t = \sum_{i=1}^N n_i \mu_i \quad (50)$$

Onde  $G^t$  é a energia livre total de Gibbs,  $n_i$  é a quantidade de matéria das espécies  $i$  e  $\mu_i$  é o potencial químico das espécies  $i$  e pode ser representado pela expressão (51) abaixo:

$$\mu_i = \underline{G}_i^\circ + RT \ln \left( \frac{f_i}{f_i^\circ} \right) \quad (51)$$

Onde  $R$  é a constante de gás ideal e  $T$  é a temperatura. O termo  $f_i^\circ$  é a fugacidade padrão das espécies  $i$  e  $\underline{G}_i^\circ$  é a energia livre de Gibbs padrão.

De outra forma, o potencial químico  $\mu_i$  das espécies  $i$  também pode ser denominado pela expressão (52):

$$\mu_i = \underline{G}_i^\circ + RT \ln \left( \frac{\phi P_i}{P^\circ} \right) \quad (52)$$

Sendo  $\phi$  o coeficiente de fugacidade.



Por outro lado, não sendo caso deste trabalho, o gás real aproxima-se do gás ideal quando algumas condições são assumidas. Essas são a pressão com o valor aproximadamente 0 e consequentemente, os termos  $f$  e  $P$  sendo o mesmo valor. Se todos os gases forem assumidos como gases ideais na pressão atmosférica, a equação do potencial químico  $\mu_i$  das espécies  $i$  pode ser reescrita como::

$$\mu_i = \Delta \underline{G}_{f,i}^{\circ} + RT \ln \left( \frac{y_i P}{P^{\circ}} \right) \quad (53)$$

Onde  $y_i$  é a fração molar de gás das espécies  $i$ .  $\Delta \underline{G}_{f,i}^{\circ}$  é a energia livre de Gibbs padrão das espécies  $i$ . É necessário escrever equações de conservação dos elementos químicos (C, H, O e N) . Entretanto, não é preciso ter reação química para achar solução através da minimização de energia de Gibbs (Dutta, 2008), dessa forma, essa grandeza pode ser minimizada, facilitando os cálculos para as análises das eficiências.

Dessa forma, pode se concluir que:

$$G^t = \sum_{i=1}^N n_i \Delta \underline{G}_{f,i}^{\circ} + \sum_{i=1}^N n_i RT \ln \left( \frac{n_i}{n_{tot}} \right) \quad (54)$$

### 3.10 Turbina de alta pressão

O módulo a ser equacionado a seguir é a turbina de baixa pressão, conhecida usualmente como *Gas Turbine*. Considera-se regime permanente, a conservação de massa é:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_g \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (55)$$

E a potência da turbina de alta pressão:

$$\dot{W}_{HPT} = \dot{m}_g (c_{p,exh,4} * T_4 - c_{p,exh,5} * T_5) \quad (56)$$

A equação geral da turbina de baixa pressão pode ser representada conforme abaixo:

$$\dot{E}_{x_4} - \dot{E}_{x_5} - \dot{W}_{HPT} = \dot{E}_{x_{dest,HPT}} \quad (57)$$

De forma análoga aos outros componentes,

$$T_5 = T_4 * \left\{ 1 - \frac{1}{\eta_{xHPT}} * \left[ 1 - \left( \frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1-\mu_{gHPT}}{\mu_{gHPT}}} \right] \right\} \quad (58)$$

Sendo,

$$\mu_{gHPT} = \frac{1}{1 - \frac{Rg}{c_{p,g} \left( \frac{T_4 + T_5}{2} \right)}} \quad (59)$$

Desse modo, pode-se obter a eficiência energética conforme a equação (60) abaixo:

$$\eta_{xHPT} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{d,HPT}}}{\dot{E}_{x_4}} \quad (60)$$

### 3.11 Turbina de baixa pressão

Da mesma forma de relação entre os compressores de baixa e alta pressão, estão as turbinas de baixa e alta pressão. A modelagem das mesmas serão semelhantes, tendo como divergências as entradas e saídas e as perdas durante os processos.

Considera-se regime permanente, sendo a conservação de massa:

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_{3'} = \dot{m}_6 = \dot{m}_g + \dot{m}_{3'} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (61)$$

E a potência:

$$\dot{W}_{LPT} = (\dot{m}_g * c_{p,exh,5} * T_5 + \dot{m}_{3'} * c_{p,a,3} * T_3 - (\dot{m}_g + \dot{m}_{3'}) * c_{p,exh,6} * T_6) \quad (62)$$

A equação geral da turbina de alta pressão pode ser representada conforme abaixo:

$$\dot{E}_{x_{3'}} + \dot{E}_{x_5} - \dot{E}_{x_6} - \dot{W}_{LPT} = \dot{E}_{x_{LPT,destr}} \quad (63)$$

E,

$$T_6 = T_5 * \left\{ 1 + \eta_{x_{LPT}} * \left[ 1 - \left( \frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{1-\mu_{g_{LPT}}}{\mu_{g_{LPT}}}} \right] \right\} \quad (64)$$

$$\mu_{g_{LPT}} = \frac{1}{1 - \frac{Rg}{c_{p,g} \left( \frac{T_5 + T_6}{2} \right)}} \quad (65)$$

Tendo  $Rg$  como o mesmo valor da turbina de alta pressão.

Desse modo, pode-se obter a eficiência energética conforme a equação (66) abaixo:

$$\eta_{x_{LPT}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{d,HPT}}}{\dot{E}_{x_5} + \dot{E}_{x_{3'}}} \quad (66)$$

### 3.12 Bocal

No bocal de exaustão, os gases são expandidos à pressão atmosférica, produzindo uma velocidade elevada. Dessa forma,

$$\dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_7} = \dot{E}_{x_{Ex,destr}} \quad (67)$$

Com isso, tem-se que a eficiência exergetica é:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{x_7}}{\dot{E}_{x_6}} \quad (68)$$

### 3.13 Sistema Integrado

#### 3.131 Eficiência Energética

$$\eta_{Ten} = \frac{\dot{W}_T}{mf * LHV} \quad (69)$$

Sendo:

$$\dot{W}_T = \dot{W}_{LPT} + \dot{W}_{HPT} \quad (70)$$

#### 3.132 Eficiência Exergética

$$\eta_{Tex} = \frac{\dot{W}_{LPT} + \dot{W}_{HPT}}{ex_{comb}} \quad (71)$$

Onde:

$$ex_{comb} = ex^{QM} * mf \quad (72)$$

Sendo a  $ex^{QM}$  de acordo com o combustível a ser utilizado.

Além disso, com base na literatura Coban (2017), considera-se uma eficiência alternativa baseada na potência da turbina de baixa:

$$\eta_{Pex} = \frac{\dot{W}_{LPT}}{ex_{comb}} \quad (73)$$

## 4 – Metodologia

No desenvolvimento do trabalho, são aplicados os conceitos de termodinâmica relacionada a 1ª e 2ª leis (balanço energético e exergético) aos dados experimentais obtidos e as hipóteses assumidas.

É desenvolvido um código usando dados de entradas como temperatura, pressão, eficiências isentrópicas que possibilita retornar como resultado eficiência energética e exergética. Sendo assim, é necessário considerar uma temperatura e pressão conhecidas para poder abranger o estudo a diversos tipos de combustíveis e utilizar combustão completa e incompleta na câmara de combustão podendo concluir qual tem melhor rendimento.

A modelagem da operação da turbina a gás escolhida foi desenvolvida através do MATLAB tendo como dados de entrada as temperaturas, pressões, eficiências energéticas e exergéticas de cada parte da turbina (compressor de alta e baixa pressão, câmara de combustão, turbina de alta e baixa pressão) extraídos das literaturas Balli (2017), Coban (2017), Aydin (2013), Balli (2014), Turan (2016) e Sohret (2015). Sendo que na literatura Coban (2017) foram considerados 4 testes e todos os mesmos foram considerados na modelagem.

Devido ao fato de não obter dados nas literaturas analisadas suficientemente detalhadas para o fan e o exaustor, os mesmos foram retirados da modelagem. Sendo assim, a análise e comparação da eficiência exergética será realizada nos componentes: compressor de baixa pressão, compressor de alta pressão, câmara de combustão, turbina de alta pressão e turbina de baixa pressão. Além disso, em algumas literaturas o estudo de caso foi feito em uma turbina a gás com apenas 1 (um) compressor e/ou 1 (uma) turbina. Esses últimos casos também foram adicionados ao modelo.

Os resultados obtidos foram comparados com os valores da literatura Sohret (2016). A análise foi feita para uma turbina a gás pelo método de combustão completa e pelo Método de Gibbs. Através da comparação dos resultados com a literatura, será possível validar o modelo feito através do software Matlab.

Foram feitos dois tipos de modelagem, o primeiro utilizando o cp conforme tabela 1 e a segunda utilizando os valores para cp conforme a tabela 2. A comparação dos resultados com a literatura, foi calculado através do desvio padrão médio quadrático conforme a fórmula abaixo:

$$Er = \left| \frac{[valor\ te\acute{o}rico - valor\ experimental]}{valor\ te\acute{o}rico} \right| \quad (73)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (Er_i)^2}{n} \quad (74)$$

Sendo n o número de componentes do sistema.

O programa utilizado está disponível no anexo 1.

#### 4.1 Dados

Os dados obtidos através das literaturas foram ajustados em uma tabela no programa Excel. Primeiramente foram registrados a quantidade de compressores, a quantidade de turbinas, o valor do LHV e o tipo de combustível presente em cada literatura, conforme tabela abaixo. Para os combustíveis foram definidos “1” como sendo o combustível composto por  $C_{12}H_{23}$  e “2” por  $CH_4$ .

Tabela 3 – Dados utilizados para análise

Literaturas	Comb	LHV	Qtd de Comp	Qtd Turbina
	tipo	btu/lb	un	un
<b>Balli 2017</b>	1	42800	1	2
<b>Aydin 2013</b>	2	44600	2	2
<b>Balli 2014</b>	1	42800	1	2
<b>Turan 2016</b>	1	42800	2	2
<b>Sohret 2015</b>	1	43370	2	1
<b>Coban 2017 test1</b>	1	42800	2	1
<b>Coban 2017 test2</b>	1	42800	2	2
<b>Coban 2017 test3</b>	1	42800	2	2
<b>Coban 2017 test4</b>	1	42800	2	2

Posteriormente, foram preenchidos os valores de temperatura de cada estado utilizado em cada literatura.

Tabela 4 – Dados utilizados para análise

Referência	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Balli 2017	298.15	298.15	592.43	1293.65	1063.15	929.8	926.08
Aydin 2013	288	383	815	1550	1144	770	0
Balli 2014	298.15	298.15	575.24	1111.67	942.3	894.7	876.8
Turan 2016	288	423	613	1373	1063	843	0
Sohret 2015	288.25	455.37	652.59	1144.26	866.48	0	0
Coban 2017 test1	288.15	410.16	546.64	1090.15	863.15	722.23	711.69
Coban 2017 test2	288.15	419.16	573.89	1191.15	930.15	745.45	730.72
Coban 2017 test3	288.15	429.22	599.04	1283.7	1010.55	797.81	782.04
Coban 2017 test4	288.15	433.42	605.67	1327.5	1054.15	833.17	816.75

Sendo T1 a temperatura de entrada no compressor de baixa pressão, T2 a temperatura de saída no compressor de baixa pressão, T3 a temperatura de saída do compressor de alta pressão, T4 a temperatura de saída da câmara de combustão, T5 a temperatura de saída da turbina de alta pressão, T6 a temperatura de saída da turbina de baixa pressão e T7 a temperatura de saída do exaustor. Todas as temperaturas estão na unidade K (Kelvin).

Como dito anteriormente, em algumas literaturas, não há o exaustor e nem 2 compressor e 2 turbinas. Dessa forma, foi repetido o mesmo valor do compressor seguinte (sempre considerando o compressor de alta pressão como dado oficial) e no caso das turbinas, foi considerado valor da turbina para a de alta pressão e assumido o valor 0 para a turbina de baixa pressão. Esses valores encontram-se em cor azul na tabela acima.

De forma análoga à temperatura, foram extraídos das literaturas os dados de pressão na unidade kPa.

Tabela 5 – Dados utilizados para análise

Referência	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Balli 2017	101.33	101.33	911.93	884.57	260.17	104.07	103.55
Aydin 2013	100.7	247	3034	2882	724	0	0
Balli 2014	101.33	101.33	709.28	695.09	125	159.99	157.58
Turan 2016	101.3	340	1040	998	297	109	0
Sohret 2015	101.353	434.37	1378.951	1337.582	193.053	0	0

<b>Coban 2017 test1</b>	92	264.28	669.85	637.12	215.44	97.44	92
<b>Coban 2017 test2</b>	92	286.39	802.06	764.17	255.06	99.52	92
<b>Coban 2017 test3</b>	92	301.62	889.94	848.55	282.67	99.63	92
<b>Coban 2017 test4</b>	92	308.45	912.46	870.87	292.54	99.69	92

As definições de P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7 se repetem da mesma forma que as temperaturas. Sendo também, na cor azul, os casos em que a literatura só considera 1 compressor, 1 turbina e não possui exaustor.

Além disso, foram retirados da literatura os dados do fluxo de ar, fluxo de combustível, vazão de by-pass, e fluxo de água. Sendo os últimos dois dados utilizados quando mencionados na literatura.

Tabela 6 – Dados utilizados para análise

<b>Referência</b>	<b>m_f</b>	<b>m_a</b>	<b>m_ag</b>	<b>m_bp</b>
<b>Balli 2017</b>	0.094	4.18	0	0
<b>Aydin 2013</b>	2.39	119.5	2.3	0
<b>Balli 2014</b>	0.34	18.2	0	1.45
<b>Turan 2016</b>	0.106	5.5	0	0
<b>Sohret 2015</b>	1.213	88.412	0	0
<b>Coban 2017 test1</b>	0.06	4.44	0	0.09
<b>Coban 2017 test2</b>	0.08	5.18	0	0.10
<b>Coban 2017 test3</b>	0.1	5.44	0	0.11
<b>Coban 2017 test4</b>	0.11	5.51	0	0.11



## 5 Resultados e Discussão

Os resultados encontrados através da modelagem foram de acordo com o esperado. Como dito anteriormente, foi feito uma comparação entre o fluxo de exergia e a eficiência exergetica em relação aos dados obtidos em cada literatura.

Além disso, o reajuste no valor do cp do ar possibilitou a melhora nos resultados. Dessa forma, foi possível perceber que refinando o modelo para um valor de cp mais adequado, é possível ter resultados mais precisos.

Por outro lado, os resultados encontrados utilizando a minimização da energia livre de Gibbs não foram conforme o esperado, devido ao fato de que as hipóteses utilizadas para calcular a temperatura na entrada da turbina foram consideradas através da eficiência isentrópica da turbina e não de um modelo de combustão. Com isso, não foi feita uma análise desses resultados, apenas foi considerado que os resultados encontrados não atenderam o esperado. .

### 5.1 Fluxo de Exergia

A tabela abaixo contém os resultados do fluxo de exergia obtidos e o desvio padrão quadrático encontrado considerando os dados do cp conforme a tabela 1.

Tabela 7 – Resultados e erros obtidos para fluxo de exergia

Referência	LPC	HPC	CC	HPT	LPT	Desvio Padrão
Balli 2017	0	1182,67	3678,26	2269,65	1435,50	0,03%
Aydin 2013	10,44	63452,52	156611,50	88118,00	28498,81	0,15%
Balli 2014	0	4225,68	11279,80	6704,84	0	0,40%
Turan 2016	688,21	1687,10	5408,34	3102,45	1579,75	0,09%
Sohret 2015	13880	31278,33	67509,76	31086,20	0	0,09%
Coban 2017 test1	480,07	1052,80	2859,33	1627,14	857,11	0,03%
Coban 2017 test2	609,32	1377,92	3926,74	2265,92	1097,70	0,08%
Coban 2017 test3	681,54	1565,86	4694,53	2823,08	1370,60	0,01%
Coban 2017 test4	708,55	1618,02	5032,58	3103,66	1543,88	0,03%

De acordo com a tabela acima, é possível afirmar que os desvios padrões encontrados são pouco significativos. Ou seja, os resultados obtidos através da modelagem criada, estão de acordo com os dados da literatura, podendo dessa forma validar o modelo utilizado.

Da mesma forma, foi calculado o fluxo de exergia para os valores de  $c_p$  considerados na tabela 2, e o desvio padrão conforme tabela abaixo que demonstra a diferença entre os resultados encontrados na modelagem e os das literaturas.

Tabela 8 – Resultados e erros obtidos para fluxo de exergia

Referência	LPC	HPC	CC	HPT	LPT	Desvio Padrão
<b>Balli 2017</b>	0	1179,50	3448,31	2247,80	1444,35	<b>0,07%</b>
<b>Aydin 2013</b>	10,42	63700,00	135039,86	88020,25	29221,27	<b>0,31%</b>
<b>Balli 2014</b>	0	4212,70	11132,91	6749,32	0	<b>0,47%</b>
<b>Turan 2016</b>	686,58	1682,85	4949,20	3085,58	1599,41	<b>0,09%</b>
<b>Sohret 2015</b>	13840	31229,52	66954,09	31477,60	0	<b>0,10%</b>
<b>Coban 2017 test1</b>	479,02	1049,26	2855,02	1646,62	867,70	<b>0,05%</b>
<b>Coban 2017 test2</b>	607,88	1373,65	3845,72	2287,03	1111,83	<b>0,12%</b>
<b>Coban 2017 test3</b>	679,78	1561,53	4455,91	2826,98	1388,44	<b>0,09%</b>
<b>Coban 2017 test4</b>	706,65	1613,73	4680,59	3086,58	1562,61	<b>0,16%</b>

Com os resultados obtidos na tabela acima, é possível perceber que os valores do  $c_p$  proporcionam uma diferença nos desvios padrões. Com isso, é possível analisar que como cada literatura pode considerar um  $c_p$  distinto, é necessário observar quais valores estão sendo utilizados de base para os cálculos e adequá-los ao modelo criado. Os resultados obtidos com os dois modelos matemáticos para os calores específicos a pressão constante, são considerados excelentes, estando dentro do esperado. Tendo como diferença a precisão de acordo com o  $c_p$  de cada literatura. .

## 5.2 Eficiência Exergética

Além do fluxo de exergia, também foi analisado a eficiência exergética. A eficiência total do motor 1 é a eficiência desejada considerando as potências das turbinas de alta e baixa pressão. Já a eficiência do motor 2 é a eficiência desejada considerando apenas a potência de uma das turbinas. Através da modelagem, os resultados obtidos encontram-se na tabela abaixo:

Tabela 9 – Resultados obtidos para eficiência exergética

Referência	LPC	HPC	CC	HPT	LPT	Eficiência Total do Motor	Eficiência LPT	Desvio Padrão
<b>Balli 2017</b>	0	86,41%	68,53%	99,20%	96,77%	51,14%	18,18%	<b>0,13%</b>
<b>Aydin 2013</b>	85,32%	90,08%	89,84%	103,47%	102,14%	122,15%	55,47%	<b>0,30%</b>

<b>Balli 2014</b>	0	82,03%	58,26%	93,90%	0	0	0	<b>0,08%</b>
<b>Turan 2016</b>	85,49%	89,97%	84,43%	102,65%	103,20%	86,28%	34,37%	<b>1,05%</b>
<b>Sohret 2015</b>	86,24%	92,30%	78,50%	94,95%	0	0	0	<b>2,94%</b>
<b>Coban 2017 test1</b>	81,89%	92,65%	76,79%	102,99%	97,86%	77,21%	27,88%	<b>1,88%</b>
<b>Coban 2017 test2</b>	82,86%	92,85%	79,50%	103,95%	99,63%	83,88%	32,89%	<b>1,78%</b>
<b>Coban 2017 test3</b>	81,84%	92,46%	78,01%	103,84%	99,41%	78,65%	32,56%	<b>1,14%</b>
<b>Coban 2017 test4</b>	81,52%	92,45%	77,25%	103,61%	99,09%	74,66%	31,56%	<b>0,92%</b>

Coban (2017) considera a eficiência total do motor 2 com o uso do by-pass. Por esse motivo, a validação do modelo em comparação a esse artigo foi considerando a eficiência total do motor 2. Além disso, pode-se perceber que Balli (2017), Balli (2014) e Sohret (2015) obtiveram as eficiências esperadas. Em Sohret (2015) o erro de 2,94% se deve ao fato de que na literatura foi encontrado uma eficiência de 70,68% para a turbina de alta pressão.

Em Aydin (2013) e Turan (2016) a variação das eficiências das turbinas de alta e baixa pressão em relação ao esperado se deve ao fato de que foi considerado na literatura um cp diferente do que assumido na modelagem.

Por esse motivo, foi considerado um novo cp conforme mencionado anteriormente, a fim de obter resultados mais precisos. Os valores utilizados para o novo cp encontram-se na tabela 2.

Dessa forma, foram obtidos os seguintes resultados para as eficiências exergéticas:

Tabela 10 – Resultados obtidos para eficiência exergética

<b>Referência</b>	<b>LPC</b>	<b>HPC</b>	<b>CC</b>	<b>HPT</b>	<b>LPT</b>	<b>Eficiência Total do Motor</b>	<b>Eficiência LPT</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Balli 2017</b>	0	87,47%	64,29%	91,47%	94,17%	37,73%	16,07%	<b>0,07%</b>
<b>Aydin 2013</b>	88,82%	88,75%	77,35%	88,25%	99,62%	80,83%	52,73%	<b>0,39%</b>
<b>Balli 2014</b>	0	83,21%	57,54%	90,90%	0	0	0	<b>0,17%</b>
<b>Turan 2016</b>	88,57%	89,63%	77,31%	92,69%	100,76%	63,81%	31,99%	<b>0,53%</b>
<b>Sohret 2015</b>	88,97%	91,54%	77,90%	92,31%	0	0	0	<b>2,53%</b>
<b>Coban 2017 test1</b>	84,97%	92,86%	76,74%	101,20%	98,44%	75,08%	28,56%	<b>1,52%</b>

<b>Coban 2017 test2</b>	85,88%	92,81%	77,93%	99,96%	99,56%	76,77%	33,05%	<b>1,35%</b>
<b>Coban 2017 test3</b>	84,71%	92,18%	74,10%	97,08%	97,94%	64,98%	31,31%	<b>0,53%</b>
<b>Coban 2017 test4</b>	84,34%	92,10%	71,89%	95,34%	96,66%	57,39%	29,30%	<b>0,31%</b>

É possível observar que em Aydin (2013), Coban (2017) e Turan (2016), os valores das eficiências exergeticas encontram-se com um resultado mais perto do esperado em relação aos valores obtidos na tabela 9. Isso se deve ao fato, conforme dito anteriormente, da utilização de valores distintos para cp na literatura em relação ao utilizado na modelagem. Em Coban (2017) no teste 1, percebe-se uma eficiência acima de 100% na turbina de alta pressão, essa variação deve se ao fato da possível composição do combustível, da umidade do ar, entre outros fatores que podem afetar o resultado. As outras literaturas Balli (2017), Balli (2014) e Sohret (2015) continuam com os resultados conforme o esperado.

## 6 Conclusão

Com a análise dos resultados é possível concluir que o modelo matemático criado é válido para qualquer tipo de turbina que tenha como componentes pelo menos 1 (um) compressor, uma câmara de combustão, 1 (uma) turbina de alta pressão e 1 (uma) turbina de baixa pressão. Além disso, é válido para qualquer tipo de combustível que se deseje adicionar na mistura com o ar na câmara de combustão.

Os valores encontrados nos resultados, demonstram que os valores obtidos através da simulação do modelo matemático criado estão de acordo com os resultados obtidos nas literaturas. O desvio padrão máximo foi 2,94% em Sohret (2015) o que é considerado ideal (abaixo de 3%). O objetivo principal do trabalho era poder validar o modelo desenvolvido realizando a comparação com os valores das literaturas de base e o mesmo foi cumprido com êxito.

Dessa forma, os projetos futuros que necessitem do valor da eficiência exergética dos componentes de uma turbina a gás, podem usufruir desse modelo matemático padrão elaborado. Com isso, o projeto poderá ser executado em menos tempo e com maior precisão dos resultados já que através de um software matemático para a realização de cálculos, as chances de erros operacionais são menores. Sendo assim, o projeto poderá ter seu orçamento reduzido por obter a praticidade da execução dos cálculos a serem realizados.

Além disso, como uma possível continuidade no projeto, é de interessante pesquisa aprimorar o modelo matemático para casos em que as turbinas a gás tenham calores específicos a pressão constante diferentes. Dessa forma, o modelo será realmente adaptado para qualquer tipo de turbina a gás. Seria também interessante propor uma alternativa ao cálculo da temperatura na saída da câmara de combustão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Turbinas – Histórias, Conceitos e empregos – Parte 2, Final. **AEROentusiastas**. Disponível em: <<https://autoentusiastas.com.br/2017/01/turbinas-historia-conceitos-empregos-parte/>> Acesso em: nov. 2020.
- [2] Aydin, H. **Component-based exergetic measures of an experimental turboprop/turboshaft engine for propeller aircrafts and helicopters**. Exergy 57 (2012): 766-774
- [3] Aydin, H. **Exergo-sustainability indicators of a turboprop aircraft for the phases of a flight**. Energy 58 (2013): 550-560
- [4] Balli, O. **Energetic and exergetic analyses of T56 turboprop engine**. Energy 73 (2013): 106-120
- [5] Balli, O. **Exergetic and exergoeconomic analysis of an Aircraft Jet Engine (AJE)**. Exergy 5 (2008)
- [6] Balli, O. **Advanced exergy analyses of an aircraft turboprop engine (TPE)**. Energy 124 (2017): 599-612
- [7] Chamone Aviação Executiva. **Manutenção de Aeronaves**. Disponível em: <<https://www.chamoneaviacao.com.br/>> Acesso em: nov. 2020
- [8] Chiavegatto, R. M. **Comparação das eficiências energética e exergética de turbina a gás aeronáuticas. Monografia**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Departamento de Engenharia Mecânica (2018)
- [9] Coban, K. **Application of thermodynamic laws on a military helicopter engine**. Energy 140 (2017): 1427-1436
- [10] Eller, R. **Jatos ou Turboélices: Eficiência no consumo de combustível através da análise envoltória de dados**. ANPET. 2018.

- [11] Etele, J. **Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environment selection.** Exergy (2001): 91-99
- [12] Ibrahim, T.K. et al. **Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis.** Applied thermal engineering, Energy 115 (2017): 977-985
- [13] Gonçalves, A. **Estudo de uma turbina a gás de dimensões reduzidas de único estágio.** INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS. 2019.
- [15] Nebra, S. **Máquinas Térmicas - Compressores.** UNICAMP. 2017.
- [14] Şohret, Y. et al. **Advanced exergy analysis of an aircraft gas turbine engine: splitting exergy destructions into parts.** Energy 90 (2015): 1219-1228
- [15] Şohret, Y. et al. **Exergy as a useful tool for the performance assessment of aircraft gas turbine engines: A key review.** Progress in Aerospace Sciences. Energy 83 (2016): 57-69
- [16] Turan, Ö. **Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications.** Energy 46 (2012) 51-61
- [17] Turan, Ö. **Numerical calculation of energy and exergy flows of a turboshaft engine for power generation and helicopter applications.** Energy 115 (2016), 914-923
- [18] Van Wylen, G.J. **Fundamentos da Termodinâmica**, 5ª edição. VIR: Edgar Blücher, 2003
- [19] Yucer, C.T. **Thermodynamic analysis of the part load performance for a small-scale gas turbine jet engine by using exergy analysis method.** Energy 111 (2016), 251-259

## Anexo 1

```
clc
close all
clear all

save lista

load lista

syms G

% ENGINE TECHNICAL DATA
R=8.3144621*10^-3; % the universal gas constant of air [kJ./(mol*K)]
M_C12H23 = 167.311E-3; %[kg./mol] massa molar do querosene
M_CH4 = 16.04E-3; %[kg./mol]
M_ar = 28.965E-3; %[kg./mol] massa molar do ar
M_N2 = 28.01E-3; %[kg./mol] massa molar do N2
M_O2 = 32E-3; % [kg./mol] massa molar do O2
M_CO2 = 44.01E-3; % [kg./mol] massa molar do CO2
M_H2O = 18.02E-3; % [kg./mol] massa molar do H2O
R_N2=0.2968;
R_O2=0.2598;
R_CO2=0.1889;
R_H2O=0.287;

%for i=1:26
    %dados_a_1er = sprintf(['I',num2str(i),':','AG',num2str(i)]);
    %dados=xlsread('tabela_dados.xlsx',dados_a_1er);

% vazão de bypass
m_bp = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AG15:AG23'));

% Volumetric air flow (lb./sec) [kg/sec]
m_a =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AE15:AE23')); %fluxo de ar

% fluxo de combustível pph [kg/sec]
m_f =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AD15:AD23'));

% fluxo de água
m_ag = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AF15:AF23'));

% FUEL
```



```
LHV = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','J15:J23')); %Lower Heating Value [kJ/kg]
```

```
COMB= xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','I15:I23');  
QDE_COMP = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','K15:K23');  
QTDE_TURB = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','V15:V23');
```

```
t1 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','W15:W23'));  
t2 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','X15:X23'));  
t3 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Y15:Y23'));  
t4 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Z15:Z23'));  
t5 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AA15:AA23'));  
t6 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AB15:AB23'));  
t7 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AC15:AC23'));
```

```
% Pressures [kPa]
```

```
p1 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','L15:L23'));  
p2 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','M15:M23'));  
p3 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','N15:N23'));  
p4 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','O15:O23'));  
p5 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','P15:P23'));  
p6 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Q15:Q23'));  
p7 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','R15:R23'));
```

```
for i=1:9
```

```
    if (COMB(i) == 1) %C12H23
```

```
        AF_mol(i) = 86.15; %relação ar - combustível para haver estequiometria
```

```
        AF_mar(i) = AF_mol(i) .* M_ar ./ M_C12H23;%relação ar - combustíveilmássica
```

```
        lambda(i) = (1 ./ AF_mar(i)) .* ((m_a(i)-m_bp(i))./m_f(i));
```

```
        f_N2(i) = 66.7 .* lambda(i) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75* max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i)); %fração de N2 nos gases de combustão
```

```
        f_O2(i) = 17.75 .* max(0,(lambda(i) - 1)) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75* max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i));
```

```
%fração de O2 nos gases de combustão
```

```
        f_CO2(i) = (12 + 0.02663 .* lambda(i)) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75* max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i));
```

```
%fração de CO2 nos gases de combustão
```

```
        f_H2O(i) = (11.5 + 1.633 .* lambda(i)) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75* max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i));
```

```
%fração de H2O nos gases de combustão
```

```
    else %CH4
```

```
        AF_mol(i) = 11.56; %relação ar - combustível para haver estequiometria
```

```
        AF_mar(i) = AF_mol(i) .* M_ar ./ M_CH4;%relação ar - combustíveilmássica
```

```
        lambda(i) = (1 ./ AF_mar(i)) .* ((m_a(i)-m_bp(i))./m_f(i));
```

```

    f_N2(i) = 3*3.76 .* lambda(i) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .* max(0,(lambda(i)
- 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i)); %fração de N2 nos gases
de combustão
    f_O2(i) = 3 .* max(0,(lambda(i) - 1)) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .*
max(0,(lambda(i) - 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i));
%fração de O2 nos gases de combustão
    f_CO2(i) = (1 + 3*0.015 .* lambda(i)) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .*
max(0,(lambda(i) - 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i));
%fração de CO2 nos gases de combustão
    f_H2O(i) = (2 + 3*0.092.* lambda(i)) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .*
max(0,(lambda(i) - 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i));
%fração de H2O nos gases de combustão
end
end

M_g = (f_N2 .* M_N2 + f_O2 .* M_O2 + f_CO2.* M_CO2 + f_H2O .*M_H2O);%massa
molar do gás de combustão
Rg=R./M_g;
Ra=R./M_ar;

% Novo cp do gás a partir do van wylen e florian
fm_N2=f_N2*M_N2./M_g;
fm_O2=f_O2*M_O2./M_g;
fm_CO2=f_CO2*M_CO2./M_g;
fm_H2O=f_H2O*M_H2O./M_g;

% DATA COLLECTION
esn=xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','E15:E23');
[~, reg] = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','G15:G23');
[~, versao]=xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','F15:F23');

for i=1:9
    if QDE_COMP(i)==2

% Temperatures [K]
T_ref(i)= t1(i);
T1(i) = t1(i);
T2(i) = t2(i);
T3(i) = t3(i);
T4(i) = t4(i);
T5(i) = t5(i);
T6(i) = t6(i);
T7(i) = t7(i);

% Pressures [kPa]
P_ref(i)=p1(i);
P1(i)=p1(i);

```

```

P2(i)=p2(i);
P3(i)=p3(i);
P4(i)=p4(i);
P5(i)=p5(i);
P6(i)=p6(i);
P7(i)=p7(i);

else
    if QTDE_TURB == 1
        % Temperatures (°F) [K]
        T_ref(i)=t2(i);
        T1(i)= t2(i);
        T2(i)= t2(i);
        T3(i)= t3(i);
        T4(i)= t4(i);
        T5(i)= t5(i);
        T6(i)= t5(i);
        T7(i)= t5(i);

        % Pressures [kPa]
        P_ref(i)=p2(i);
        P1(i)=p2(i);
        P2(i)=p2(i);
        P3(i)=p3(i);
        P4(i)=p4(i);
        P5(i)=p5(i);
        P6(i)=p5(i);
        P7(i)=p5(i);

    else

        T_ref(i)=t2(i);
        T1(i)= t2(i);
        T2(i)= t2(i);
        T3(i)= t3(i);
        T4(i)= t4(i);
        T5(i)= t5(i);
        T6(i)= t6(i);
        T7(i)= t7(i);

        % Pressures [kPa]
        P_ref(i)=p2(i);
        P1(i)=p2(i);
        P2(i)=p2(i);
        P3(i)=p3(i);
        P4(i)=p4(i);
        P5(i)=p5(i);
        P6(i)=p6(i);
        P7(i)=p7(i);

```

```

        end
    end
end

% LPC
%trabalho e rendimento energético
cp_a_1=Ra.*(3.355+(0.575.*T1.*10.^-3)-(0.016.*T1.^-2.*10.^5));
cp_a_2=Ra.*(3.355+(0.575.*T2.*10.^-3)-(0.016.*T2.^-2.*10.^5));
for i=1:9
    W_dot_LPC(i)=m_a(i).*(cp_a_2(i).*T2(i)-cp_a_1(i).*T1(i)); %potência gerada
pela LPC [kW]
end
    cp_a_LPC=Ra.*(3.355+(0.575.*((T2+T1)./2).*10.^-3)-(0.016.*((T2+T1)./2).^-
2.*10.^5));
    mi_a_LPC=1./(1-(Ra./cp_a_LPC));
    eta_LPC=((P2./P1).^((mi_a_LPC-1)./mi_a_LPC))-1./((T2./T1)-1);
%rendimento energético [%]

%HPC
%trabalho e rendimento energético
cp_a_3=Ra.*(3.355+(0.575.*T3.*10.^-3)-(0.016.*T3.^-2.*10.^5));
for i=1:9
    W_dot_HPC(i)=(m_a(i)-m_bp(i)).*(cp_a_3(i).*T3(i)-cp_a_2(i).*T2(i));
%potência gerada pela HPC [kW]
end
    cp_a_HPC=Ra.*(3.355+(0.575.*((T2+T3)./2).*10.^-3)-(0.016.*((T2+T3)./2).^-
2.*10.^5));
    mi_a_HPC=1./(1-(Ra./cp_a_HPC));
    eta_HPC=((P3./P2).^((mi_a_HPC-1)./mi_a_HPC))-1./((T3./T2)-1);
%rendimento energético

%HPT
%constante dos gases
cp_g_4=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*T4.*10^(-3)))+(0.040.*T4.^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*T4.*10^(-3)))-(0.227.*T4.^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T4.*10^(-3)))-(1.157.*T4.^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*T4.*10^(-3)))+(0.121.*T4.^(-
2).*10^(5)))));
cp_g_5=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*T5.*10^(-3)))+(0.040.*T5.^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*T5.*10^(-3)))-(0.227.*T5.^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T5.*10^(-3)))-(1.157.*T5.^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*T5.*10^(-3)))+(0.121.*T5.^(-
2).*10^(5)))));

%cp HPT
cp_g_HPT=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*((T4+T5)/2).*10^(-
3)))+(0.040.*((T5+T4)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*((T5+T4)/2).*10^(-3)))-
(0.227.*((T5+T4)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*((T5+T4)/2).*10^(-3))-

```

```

(1.157.*((T5+T4)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*((T5+T4)/2).*10^(-
3)))+(0.121.*((T5+T4)/2).^(-2).*10^(5))));
mi_g_HPT=1./(1-(Rg./cp_g_HPT));
cv_g_HPT=cp_g_HPT-Rg;
gam1=cp_g_HPT./cv_g_HPT;
sub=1-mi_g_HPT;
eta_HPT=0.80; %Definido porém precisa ser visto

for i=1:9
W_dot_HPT(i)=-((m_a(i)-m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i)).*(cp_g_5(i).*T5(i)-
cp_g_4(i).*T4(i))); %potência gerada pela HPT [kW]
end

% LPT
%trabalho e rendimento energético

for i=1:9
fm2_N2(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_N2(i)+m_bp(i)./M_ar*3.762/4.812)./((m_a(i)
)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
fm2_O2(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_O2(i)+m_bp(i)./M_ar*1.000/4.812)./((m_a(i)
)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
fm2_CO2(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_CO2(i)+m_bp(i)./M_ar*0.0014/4.812)./((m_a
(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
fm2_H2O(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_H2O(i)+m_bp(i)./M_ar*0.0486/4.812)./((m_a
(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
end

cp_g_6=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*T6.*10^(-3)))+(0.040.*T6.^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*T6.*10^(-3)))-(0.227.*T6.^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T6.*10^(-3)))-(1.157.*T6.^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*T6.*10^(-3)))+(0.121.*T6.^(-
2).*10^(5))));

cp_g_LPT= fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*((T6+T5)/2).*10^(-
3)))+(0.040.*((T6+T5)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*((T6+T5)/2).*10^(-3)))-
(0.227.*((T6+T5)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*((T6+T5)/2).*10^(-3))-
(1.157.*((T6+T5)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*((T6+T5)/2).*10^(-
3)))+(0.121.*((T6+T5)/2).^(-2).*10^(5))));
cv_g_LPT=cp_g_LPT-Rg;
gam2=cp_g_LPT./cv_g_LPT;

```

```

mi_g_LPT=1./(1-(Rg./cp_g_LPT));
eta_LPT=-1*(((T6./T5)-1)./(1-(P5./P6).^((1-
mi_g_LPT)./mi_g_LPT)));%rendimento energético

for i=1:9
    W_dot_LPT(i)=-((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i)).*cp_g_6(i).*T6(i)-(m_a(i)-
m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i)).*cp_g_5(i).*T5(i)-(m_bp(i).*cp_a_2(i).*T2(i)));
%potência gerada pela LPT [kW]
end

%MOTOR
% Potência líquida no motor
%W_dot_TT_net=W_dot_HPT+W_dot_LPT-W_dot_LPC;
W_dot_TT=(W_dot_HPT+W_dot_LPT);

%rendimento energético
%eta_TT_net = W_dot_TT_net ./ (m_f.* LHV); %eficiência energética total
líquida
eta_TT = W_dot_TT ./ (m_f .* LHV); % eficiência energética total

%EXERGIA
% XI
%exergia química do combustível
if (COMB==1)
    ex_Q_fuel=(1.0401+0.1728*23/12).*LHV;%considerando o C12h23
else
    ex_Q_fuel=1.0401.*LHV; %considerando o Ch4
%química do combustível [kJ/mol]
Q_N2 = 0.72; %exergia química do N2
Q_O2 = 3.97; %exergia química do O2
Q_CO2 = 19.87; %exergia química do CO2
Q_H2O = 9.49; % exergia química do H2O

%exergias físicas relacionadas à temperatura
for i=1:9
    ex_Tref(i) = 0;
    ex_T1(i) = cp_a_1(i) .* ((T1(i) - T_ref(i)) - T_ref(i).* log(T1(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T2(i) = cp_a_2(i) .* ((T2(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T2(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T3(i) = cp_a_3(i).* ((T3(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T3(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T4(i) = cp_g_4(i).* ((T4(i)- T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T4(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T5(i) = cp_g_5(i).* ((T5(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T5(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T6(i) = cp_g_6(i).* ((T6(i) - T_ref(i)) - T_ref(i).* log(T6(i) ./
T_ref(i)));

```

```
end
```

```
%exergias físicas relacionadas à pressão
```

```
for i=1:9
```

```
ex_P1(i) = R .* T_ref(i) .* log(P1(i) ./ P_ref(i)) ./ M_ar;
```

```
ex_P2(i) = R .* T_ref(i) .* log(P2(i) ./ P_ref(i)) ./ M_ar;
```

```
ex_P3(i) = R .* T_ref(i) .* log(P3(i) ./ P_ref(i)) ./ M_ar;
```

```
ex_P4(i) = R .* T_ref(i) .* log(P4(i) ./ P_ref(i)) ./ M_g(i);
```

```
ex_P5(i) = R .* T_ref(i) .* log(P5(i) ./ P_ref(i)) ./ M_g(i);
```

```
ex_P6(i) = R .* T_ref(i) .* log(P6(i) ./ P_ref(i)) ./ M_g(i);
```

```
end
```

```
%exergias físicas
```

```
for i=1:9
```

```
ex_F1(i) = ex_P1(i) + ex_T1(i);
```

```
ex_F2(i) = ex_P2(i) + ex_T2(i);
```

```
ex_F3(i) = ex_P3(i) + ex_T3(i);
```

```
ex_F4(i) = ex_P4(i) + ex_T4(i);
```

```
ex_F5(i) = ex_P5(i) + ex_T5(i);
```

```
ex_F6(i) = ex_P6(i) + ex_T6(i);
```

```
if m_ag(i)==0
```

```
    ex_Fw(i) = 0;
```

```
else
```

```
    ex_Fw(i) = 84.884-83.278 -T_ref(i)*(0.29399-0.29432);
```

```
end
```

```
end
```

```
%taxa de exergia física
```

```
for i=1:9
```

```
ex_d_F1(i) = ex_F1(i).*m_a(i);
```

```
ex_d_F2(i) = ex_F2(i).*m_a(i);
```

```
ex_d_F21(i) = ex_F2(i).*m_bp(i); %exergia bypass
```

```
ex_d_F3(i) = ex_F3(i).*(m_a(i)-m_bp(i));
```

```
ex_d_F4(i) = ex_F4(i).*(m_a(i)-m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i));
```

```
ex_d_F5(i) = ex_F5(i).*(m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i));
```

```
ex_d_F6(i) = ex_F6(i).*(m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i));
```

```
ex_d_w(i) = ex_Fw(i)*m_ag(i);
```

```
end
```

```
%Exergias químicas
```

```
for i=1:9
```

```
ex_Q(i)= ((f_N2(i).* Q_N2 + f_O2(i).* Q_O2+ f_CO2(i).* Q_CO2 + f_H2O(i)
.*Q_H2O) + (R .* T_ref(i)) .* (f_N2(i) .* log(f_N2(i)) + f_O2(i) .* log(f_O2(i))
+f_CO2(i) .* log(f_CO2(i)) + f_H2O(i) .* log(f_H2O(i)))) ./ M_g(i);
```

```
%exergiaquímica da combustão
```

```
ex_d_Q(i)= ex_Q(i) .*(m_a(i)-m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i)); %taxa exergetica do
combustível
```

```
ex_d_comb(i) = ex_Q_fuel(i) .* m_f(i); %exergia total do combustível
```

```

end

%Balanco exergetico [kW]
for i=1:9
    ex_dd_1(i)= ex_d_F1(i)+ W_dot_LPC(i) - ex_d_F2(i); %balanco exergetico no
LPC
    ex_dd_2(i) = ex_d_F2(i) + W_dot_HPC(i) - ex_d_F3(i) - ex_d_F21(i); %balanco
exergetico no HPC
    ex_dd_3(i)= ex_d_F3(i) + ex_d_comb(i) + ex_d_w(i) - ex_d_F4(i); %balanco
exergetico da cc
    ex_dd_4(i) = ex_d_F4(i) - W_dot_HPT(i) - ex_d_F5(i); %balanco exergetico
no HPT
    ex_dd_5(i) = ex_d_F5(i) + ex_d_F21(i) - W_dot_LPT(i) - ex_d_F6(i); %balanco
exergetico no LPT
end

%Eficiencias exergeticas [%]
for i=1:9
    eta_x_LPC(i) = 1 - (ex_dd_1(i)./ (W_dot_LPC(i) + ex_d_F1(i))); %eficiencia
exergetica do LPC
    eta_x_HPC(i) = 1 - (ex_dd_2(i)./ (W_dot_HPC(i) + ex_d_F2(i))); %eficiencia
exergetica do HPC
    eta_x_CC(i)= 1 - (ex_dd_3(i)./ (ex_d_F3(i) + ex_d_comb(i)+ex_d_w(i))); %
eficiencia exergetica da CC
    eta_x_HPT(i) = 1 - (ex_dd_4(i)./ (ex_d_F4(i))); %eficiencia exergetica da
HPT
    eta_x_LPT(i) = 1 - (ex_dd_5(i) ./ (ex_d_F5(i)+ex_d_F21(i))); %eficiencia
exergetica da LPT
    %eta_x_net = W_dot_TT_net ./ (ex_d_comb); %eficiencia exergetica total
liquida do motor
    eta_x_TT(i) = (W_dot_HPT(i) + W_dot_LPT(i)) ./ (ex_d_comb(i)); %eficiencia
exergetica total do motor
    eta_x2_TT(i) = (W_dot_LPT(i)) ./ (ex_d_comb(i)); %eficiencia exergetica
total do motor
end

filename = 'resultadofinal2.xlsx';
A1 = [P1',P2',P3',P4',P5',P6',T1',T2',T3',T4',T5',T6'];];
sheet = 1;
xlswrite(filename,A1,sheet);
filename = 'resultadofinal3.xlsx';
A2
=[eta_x_LPC',eta_x_HPC',eta_x_CC',eta_x_HPT',eta_x_LPT',eta_x_TT',eta_x2_TT',e
x_dd_1',ex_dd_2',ex_dd_3',ex_dd_4',ex_dd_5'];];
xlswrite(filename,A2,sheet);
end

```

```

clc
close all

```



```

clear all

save lista

load lista

syms G

% ENGINE TECHNICAL DATA
R=8.3144621*10^-3; % the universal gas constant of air [kJ./(mol*K)]
M_C12H23 = 167.311E-3; %[kg./mol] massa molar do querosene
M_CH4 = 16.04E-3; %[kg./mol]
M_ar = 28.965E-3; %[kg./mol] massa molar do ar
M_N2 = 28.01E-3; %[kg./mol] massa molar do N2
M_O2 = 32E-3; % [kg./mol] massa molar do O2
M_CO2 = 44.01E-3; % [kg./mol] massa molar do CO2
M_H2O = 18.02E-3; % [kg./mol] massa molar do H2O
R_N2=0.2968;
R_O2=0.2598;
R_CO2=0.1889;
R_H2O=0.287;

%for i=1:26
    %dados_a_ler = sprintf(['I',num2str(i),':','AG',num2str(i)]);
    %dados=xlsread('tabela_dados.xlsx',dados_a_ler);

% vazão de bypass
m_bp = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AG15:AG23'));

% Volumetric air flow (lb./sec) [kg/sec]
m_a =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AE15:AE23')); %fluxo de ar

% fluxo de combustível pph [kg/sec]
m_f =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AD15:AD23'));

% fluxo de água
m_ag = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AF15:AF23'));

% FUEL
LHV = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','J15:J23')); %Lower Heating
Value [kJ/kg]

```

```

COMB= xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','I15:I23');
QDE_COMP = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','K15:K23');
QTDE_TURB = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','V15:V23');

t1 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','W15:W23'));
t2 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','X15:X23'));
t3 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Y15:Y23'));
t4 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Z15:Z23'));
t5 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AA15:AA23'));
t6 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AB15:AB23'));
t7 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AC15:AC23'));

% Pressures [kPa]

p1 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','L15:L23'));
p2 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','M15:M23'));
p3 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','N15:N23'));
p4 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','O15:O23'));
p5 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','P15:P23'));
p6 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Q15:Q23'));
p7 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','R15:R23'));

for i=1:9

if (COMB(i) == 1) %C12H23
AF_mol(i) = 86.15; %relação ar - combustível para haver estequiometria
AF_mar(i) = AF_mol(i) .* M_ar ./ M_C12H23;%relação ar - combustíveilmássica
lambda(i) = (1 ./ AF_mar(i)) .* ((m_a(i)-m_bp(i))./m_f(i));
f_N2(i) = 66.7 .* lambda(i) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75* max(0,(lambda(i)
- 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i)); %fração de N2
nosgases de combustão
f_O2(i) = 17.75 .* max(0,(lambda(i) - 1)) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75*
max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i));
%fração deO2 nos gases de combustão
f_CO2(i) = (12 + 0.02663 .* lambda(i)) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75*
max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i));
%fração de CO2 nos gases de combustão
f_H2O(i) = (11.5 + 1.633 .* lambda(i)) ./ (66.7 .* lambda(i) + 17.75*
max(0,(lambda(i) - 1)) + 12 + 0.02663 .* lambda(i) + 11.5 + 1.633 .* lambda(i));
%fração de H2O nos gases de combustão
else %CH4
AF_mol(i) = 11.56; %relação ar - combustível para haver estequiometria
AF_mar(i) = AF_mol(i) .* M_ar ./ M_CH4;%relação ar - combustíveilmássica
lambda(i) = (1 ./ AF_mar(i)) .* ((m_a(i)-m_bp(i))./m_f(i));
f_N2(i) = 3*3.76 .* lambda(i) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .* max(0,(lambda(i)
- 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i)); %fração de N2 nosgases
de combustão
f_O2(i) = 3 .* max(0,(lambda(i) - 1)) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .*
max(0,(lambda(i) - 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i));
%fração deO2 nos gases de combustão

```

```

    f_CO2(i) = (1 + 3*0.015 .* lambda(i)) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .*
max(0,(lambda(i) - 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i));
%fração de CO2 nos gases de combustão
    f_H2O(i) = (2 + 3*0.092.* lambda(i)) ./ (3*3.76 .* lambda(i) +3 .*
max(0,(lambda(i) - 1))+1 + 3*0.015 .* lambda(i) + 2 + 3*0.092.* lambda(i));
%fração de H2O nos gases de combustão
end
end

M_g = (f_N2 .* M_N2 + f_O2 .* M_O2 + f_CO2.* M_CO2 + f_H2O .*M_H2O);%massa
molar do gás de combustão
Rg=R./M_g;
Ra=R./M_ar;

% Novo cp do gás a partir do van wylen e florian
fm_N2=f_N2*M_N2./M_g;
fm_O2=f_O2*M_O2./M_g;
fm_CO2=f_CO2*M_CO2./M_g;
fm_H2O=f_H2O*M_H2O./M_g;

% DATA COLLECTION
esn=xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','E15:E23');
[~, reg] = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','G15:G23');
[~, versao]=xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','F15:F23');

for i=1:9
    if QDE_COMP(i)==2

% Temperatures [K]
T_ref(i)= t1(i);
T1(i) = t1(i);
T2(i) = t2(i);
T3(i) = t3(i);
T4(i) = t4(i);
T5(i) = t5(i);
T6(i) = t6(i);
T7(i) = t7(i);

% Pressures [kPa]
P_ref(i)=p1(i);
P1(i)=p1(i);
P2(i)=p2(i);
P3(i)=p3(i);
P4(i)=p4(i);
P5(i)=p5(i);
P6(i)=p6(i);
P7(i)=p7(i);

```

```

else
    if QTDE_TURB == 1
        % Temperatures (°F) [K]
        T_ref(i)=t2(i);
        T1(i)= t2(i);
        T2(i)= t2(i);
        T3(i)= t3(i);
        T4(i)= t4(i);
        T5(i)= t5(i);
        T6(i)= t5(i);
        T7(i)= t5(i);

        % Pressures [kPa]
        P_ref(i)=p2(i);
        P1(i)=p2(i);
        P2(i)=p2(i);
        P3(i)=p3(i);
        P4(i)=p4(i);
        P5(i)=p5(i);
        P6(i)=p5(i);
        P7(i)=p5(i);

    else

        T_ref(i)=t2(i);
        T1(i)= t2(i);
        T2(i)= t2(i);
        T3(i)= t3(i);
        T4(i)= t4(i);
        T5(i)= t5(i);
        T6(i)= t6(i);
        T7(i)= t7(i);

        % Pressures [kPa]
        P_ref(i)=p2(i);
        P1(i)=p2(i);
        P2(i)=p2(i);
        P3(i)=p3(i);
        P4(i)=p4(i);
        P5(i)=p5(i);
        P6(i)=p6(i);
        P7(i)=p7(i);

    end
end
end
end

```

```

% LPC
%trabalho e rendimento energético
cp_a_1=(1.05-(0.365.*T1.*10^(-3)))+(0.85.*(T1.^2)).*10^(-6))-
(0.39.*(T1.^3)).*10^(-9));
cp_a_2=(1.05-(0.365.*T2.*10^(-3)))+(0.85.*(T2.^2)).*10^(-6))-
(0.39.*(T2.^3)).*10^(-9));
for i=1:9
W_dot_LPC(i)=m_a(i).*(cp_a_2(i).*T2(i)-cp_a_1(i).*T1(i)); %potência gerada
pela LPC [kW]
end
cp_a_LPC=(1.05-(0.365.*((T2+T1)./2)).*10^(-
3)))+(0.85.*((T2+T1)./2).^2)).*10^(-6))-(0.39.*((T2+T1)./2).^3)).*10^(-
9));
mi_a_LPC=1./(1-(Ra./cp_a_LPC));
eta_LPC=((P2./P1).^(mi_a_LPC-1)./mi_a_LPC)-1)./((T2./T1)-1);
%rendimento energético [%]

%HPC
%trabalho e rendimento energético
cp_a_3=(1.05-(0.365.*T3.*10^(-3)))+(0.85.*(T3.^2)).*10^(-6))-
(0.39.*(T3.^3)).*10^(-9));
for i=1:9
W_dot_HPC(i)=(m_a(i)-m_bp(i)).*(cp_a_3(i).*T3(i)-cp_a_2(i).*T2(i));
%potência gerada pela HPC [kW]
end
cp_a_HPC=(1.05-(0.365.*((T2+T3)./2)).*10^(-
3)))+(0.85.*((T2+T3)./2).^2)).*10^(-6))-(0.39.*((T2+T3)./2).^3)).*10^(-
9));
mi_a_HPC=1./(1-(Ra./cp_a_HPC));
eta_HPC=((P3./P2).^(mi_a_HPC-1)./mi_a_HPC)-1)./((T3./T2)-1);
%rendimento energético

% HPT
%constante dos gases
cp_g_4=fm_N2.*((1.11-(0.48.*T4.*10^(-3)))+(0.96.*T4.^2).*10^(-6)))-
(0.42.*T4.^3).*10^(-9)))+fm_O2.*((0.88-(0.0001.*T4.*10^(-
3)))+(0.54.*T4.^2).*10^(-6))-(0.33.*T4.^3).*10^(-
9)))+fm_CO2.*((0.45+(1.67.*T4.*10^(-3)))-(1.27.*T4.^2).*10^(-
6)+0.39.*T4.^3).*10^(-9)))+fm_H2O.*((1.79+(0.107.*T4.*10^(-
3)))+(0.586.*T4.^2).*10^(-6)-0.20.*T4.^3).*10^(-9))));
cp_g_5=fm_N2.*((1.11-(0.48.*T5.*10^(-3)))+(0.96.*T5.^2).*10^(-6)))-
(0.42.*T5.^3).*10^(-9)))+fm_O2.*((0.88-(0.0001.*T5.*10^(-
3)))+(0.54.*T5.^2).*10^(-6))-(0.33.*T5.^3).*10^(-
9)))+fm_CO2.*((0.45+(1.67.*T5.*10^(-3)))-(1.27.*T5.^2).*10^(-
6)+0.39.*T5.^3).*10^(-9)))+fm_H2O.*((1.79+(0.107.*T5.*10^(-
3)))+(0.586.*T5.^2).*10^(-6)-0.20.*T5.^3).*10^(-9))));

%cp HPT
cp_g_HPT=fm_N2.*((1.11-(0.48.*((T4+T5)/2)).*10^(-
3)))+(0.96.*((T4+T5)/2).^2).*10^(-6)))-(0.42.*((T4+T5)/2).^3).*10^(-9)))+
fm_O2.*((0.88-(0.0001.*((T4+T5)/2)).*10^(-3)))+(0.54.*((T4+T5)/2).^2).*10^(-
6))-(0.33.*((T4+T5)/2).^3).*10^(-

```

```

9))))+fm_CO2.*((0.45+(1.67.*((T4+T5)/2).*10^(-3))-
(1.27.*((T4+T5)/2).^2.*10^(-6)+0.39.*((T4+T5)/2).^3.*10.^(-9))))
+fm_H2O.*((1.79+(0.107.*((T4+T5)/2).*10^(-3))+(0.586.*((T4+T5)/2).^2.*10^(-
6)-0.20.*((T4+T5)/2).^3.*10.^(-9))));
mi_g_HPT=1./(1-(Rg./cp_g_HPT));
cv_g_HPT=cp_g_HPT-Rg;
gam1=cp_g_HPT./cv_g_HPT;
sub=1-mi_g_HPT;
eta_HPT=0.80; %Definido porém precisa ser visto

for i=1:9
W_dot_HPT(i)=-((m_a(i)-m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i)).*(cp_g_5(i).*T5(i)-
cp_g_4(i).*T4(i))); %potência gerada pela HPT [kW]
end

% LPT
%trabalho e rendimento energético

for i=1:9
fm2_N2(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_N2(i)+m_bp(i)./M_ar*3.762/4.812)./((m_a(i)
)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
fm2_O2(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_O2(i)+m_bp(i)./M_ar*1.000/4.812)./((m_a(i)
)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
fm2_CO2(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_CO2(i)+m_bp(i)./M_ar*0.0014/4.812)./((m_a
(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
fm2_H2O(i) =
((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i).*fm_H2O(i)+m_bp(i)./M_ar*0.0486/4.812)./((m_a
(i)+m_f(i)+m_ag(i))./M_g(i)+m_bp(i)./M_ar);
end

cp_g_6=fm2_N2.*((1.11-(0.48.*T6.*10^(-3)))+(0.96.*T6.^2.*10^(-6)))-
(0.42.*T6.^3.*10^(-9)) +fm2_O2.*((0.88-(0.0001.*T6.*10^(-
3)))+(0.54.*T6.^2.*10.^(-6))-(0.33.*T6.^3.*10.^(-
9))))+fm2_CO2.*((0.45+(1.67.*T6.*10^(-3))-(1.27.*T6.^2).*10^(-
6)+0.39.*T6.^3.*10.^(-9)))+fm2_H2O.*((1.79+(0.107.*T6.*10^(-
3)))+(0.586.*T6.^2.*10^(-6)-0.20.*T6.^3.*10.^(-9))));

cp_g_LPT=fm2_N2.*((1.11-(0.48.*((T6+T5)/2).*10^(-
3)))+(0.96.*((T6+T5)/2).^2.*10^(-6))-(0.42.*((T6+T5)/2).^3.*10^(-9))
+fm2_O2.*((0.88-(0.0001.*((T6+T5)/2).*10^(-3)))+(0.54.*((T6+T5)/2).^2.*10.^(-
6))-(0.33.*((T6+T5)/2).^3.*10.^(-
9))))+fm2_CO2.*((0.45+(1.67.*((T6+T5)/2).*10^(-3))-
(1.27.*((T6+T5)/2).^2.*10^(-6)+0.39.*((T6+T5)/2).^3.*10.^(-9)))+
fm2_H2O.*((1.79+(0.107.*((T6+T5)/2).*10^(-3)))+(0.586.*((T6+T5)/2).^2.*10^(-
6)-0.20.*((T6+T5)/2).^3.*10.^(-9))));
cv_g_LPT=cp_g_LPT-Rg;

```

```

gam2=cp_g_LPT./cv_g_LPT;

mi_g_LPT=1./(1-(Rg./cp_g_LPT));
eta_LPT=-1*(((T6./T5)-1)./(1-(P5./P6).^(1-
mi_g_LPT)./mi_g_LPT)));%rendimento energético

for i=1:9
    W_dot_LPT(i)=-((m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i)).*cp_g_6(i).*T6(i)-(m_a(i)-
m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i)).*cp_g_5(i).*T5(i)-(m_bp(i).*cp_a_2(i).*T2(i)));
%potência gerada pela LPT [kW]
end

%MOTOR
% Potência líquida no motor
%W_dot_TT_net=W_dot_HPT+W_dot_LPT-W_dot_LPC;
W_dot_TT=(W_dot_HPT+W_dot_LPT);

%rendimento energético
%eta_TT_net = W_dot_TT_net ./ (m_f.* LHV); %eficiência energética total
líquida
eta_TT = W_dot_TT ./ (m_f .* LHV); % eficiência energética total

%EXERGIA
% XI
%exergia química do combustível
if (COMB==1)
    ex_Q_fuel=(1.0401+0.1728*23/12).*LHV;%considerando o C12h23
else
    ex_Q_fuel=1.0401.*LHV; %considerando o Ch4
%química do combustível [kJ/mol]
Q_N2 = 0.72; %exergia química do N2
Q_O2 = 3.97; %exergia química do O2
Q_CO2 = 19.87; %exergia química do CO2
Q_H2O = 9.49; % exergia química do H2O

%exergias físicas relacionadas à temperatura
for i=1:9
    ex_Tref(i) = 0;
    ex_T1(i) = cp_a_1(i) .* ((T1(i) - T_ref(i)) - T_ref(i).* log(T1(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T2(i) = cp_a_2(i) .* ((T2(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T2(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T3(i) = cp_a_3(i).* ((T3(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T3(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T4(i) = cp_g_4(i).* ((T4(i)- T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T4(i) ./
T_ref(i)));
    ex_T5(i) = cp_g_5(i).* ((T5(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T5(i) ./
T_ref(i)));

```

```

    ex_T6(i) = cp_g_6(i).* ((T6(i) - T_ref(i)) - T_ref(i).* log(T6(i) ./
T_ref(i)));

end

%exergias físicas relacionadas à pressão
for i=1:9
ex_P1(i) = R .* T_ref(i) .* log(P1(i) ./ P_ref(i)) ./ M_ar;
ex_P2(i) = R .* T_ref(i) .* log(P2(i)./ P_ref(i)) ./ M_ar;
ex_P3(i) = R .* T_ref(i) .* log(P3(i) ./ P_ref(i)) ./ M_ar;
ex_P4(i) = R .* T_ref(i) .* log(P4(i) ./P_ref(i)) ./ M_g(i);
ex_P5(i) = R .* T_ref(i) .* log(P5(i)./ P_ref(i)) ./ M_g(i);
ex_P6(i) = R .* T_ref(i) .* log(P6(i)./ P_ref(i)) ./ M_g(i);
end

%exergias físicas
for i=1:9
ex_F1(i) = ex_P1(i) + ex_T1(i);
ex_F2(i) = ex_P2(i) + ex_T2(i);
ex_F3(i) = ex_P3(i) + ex_T3(i);
ex_F4(i) = ex_P4(i) + ex_T4(i);
ex_F5(i) = ex_P5(i) + ex_T5(i);
ex_F6(i) = ex_P6(i) + ex_T6(i);
if m_ag(i)==0
    ex_Fw(i) = 0
else
    ex_Fw(i) = 84.884-83.278 -T_ref(i)*(0.29399-0.29432);
end
end

%taxa de exergia física
for i=1:9
ex_d_F1(i) = ex_F1(i).*m_a(i);
ex_d_F2(i) = ex_F2(i).*m_a(i);
ex_d_F21(i) = ex_F2(i).*m_bp(i); %exergia bypass
ex_d_F3(i) = ex_F3(i).*(m_a(i)-m_bp(i));
ex_d_F4(i) = ex_F4(i).*(m_a(i)-m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i));
ex_d_F5(i) = ex_F5(i).*(m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i));
ex_d_F6(i) = ex_F6(i).*(m_a(i)+m_f(i)+m_ag(i));
ex_d_w(i) = ex_Fw(i)*m_ag(i);
end

%Exergias químicas
for i=1:9
    ex_Q(i)= ((f_N2(i).* Q_N2 + f_O2(i).* Q_O2+ f_CO2(i).* Q_CO2 + f_H2O(i)
.*Q_H2O) + (R .* T_ref(i)) .* (f_N2(i) .* log(f_N2(i)) + f_O2(i) .* log(f_O2(i))
+f_CO2(i) .* log(f_CO2(i)) + f_H2O(i) .* log(f_H2O(i)))) ./ M_g(i);
%exergiaquímica da combustão

```



```

    ex_d_Q(i)= ex_Q(i) .*(m_a(i)-m_bp(i)+m_f(i)+m_ag(i)); %taxa exergética do
    combustível
    ex_d_comb(i) = ex_Q_fuel(i) .* m_f(i); %exergia total do combustível

end

%Balanco exergético [kW]
for i=1:9
    ex_dd_1(i)= ex_d_F1(i)+ W_dot_LPC(i) - ex_d_F2(i); %balanco exergético no
    LPC
    ex_dd_2(i) = ex_d_F2(i) + W_dot_HPC(i) - ex_d_F3(i) - ex_d_F21(i); %balanco
    exergético no HPC
    ex_dd_3(i)= ex_d_F3(i) + ex_d_comb(i) + ex_d_w(i) - ex_d_F4(i); %balanco
    exergético da cc
    ex_dd_4(i) = ex_d_F4(i) - W_dot_HPT(i) - ex_d_F5(i); %balanco exergético
    no HPT
    ex_dd_5(i) = ex_d_F5(i) + ex_d_F21(i) - W_dot_LPT(i) - ex_d_F6(i); %balanco
    exergético no LPT
end

%Eficiências exergéticas [%]
for i=1:9
    eta_x_LPC(i) = 1 - (ex_dd_1(i)./ (W_dot_LPC(i) + ex_d_F1(i))); %eficiência
    exergética do LPC
    eta_x_HPC(i) = 1 - (ex_dd_2(i)./ (W_dot_HPC(i) + ex_d_F2(i))); %eficiência
    exergética do HPC
    eta_x_CC(i)= 1 - (ex_dd_3(i)./ (ex_d_F3(i) + ex_d_comb(i)+ex_d_w(i))); %
    eficiência exergética da CC
    eta_x_HPT(i) = 1 - (ex_dd_4(i)./ (ex_d_F4(i))); %eficiência exergética da
    HPT
    eta_x_LPT(i) = 1 - (ex_dd_5(i) ./ (ex_d_F5(i)+ex_d_F21(i))); %eficiência
    exergética da LPT
    %eta_x_net = W_dot_TT_net ./ (ex_d_comb); %eficiência exergética total
    líquida do motor
    eta_x_TT(i) = (W_dot_HPT(i) + W_dot_LPT(i)) ./ (ex_d_comb(i)); %eficiência
    exergética total do motor
    eta_x2_TT(i) = (W_dot_LPT(i)) ./ (ex_d_comb(i)); %eficiência exergética
    total do motor
end

filename = 'resultadofinal2.xlsx';
A1 = [P1',P2',P3',P4',P5',P6',T1',T2',T3',T4',T5',T6'];];
sheet = 1;
xlswrite(filename,A1,sheet);
filename = 'resultadofinal3.xlsx';
A2
=[eta_x_LPC',eta_x_HPC',eta_x_CC',eta_x_HPT',eta_x_LPT',eta_x_TT',eta_x2_TT',e
x_dd_1',ex_dd_2',ex_dd_3',ex_dd_4',ex_dd_5'];];
xlswrite(filename,A2,sheet);
end

```

```

clc
close all
clear all

save lista

load lista

%syms T45 T4 P4 temp temp2 T cpg_n
%syms X y
syms G

% ENGINE TECHNICAL DATA
R=8.3144621*10^-3; % the universal gas constant of air [kJ./(mol*K)]

% Volumetric air flow (lb./sec) [kg/sec]
m_a =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AE15:AE69')); %fluxo de ar

% fluxo de combustível pph [kg/sec]
m_f =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AD15:AD69'));
m_f(1) = 0.094; % Para testar o resto do código

%fluxo de combustível [kg/sec]
m_g=m_a+m_f;

for i=1:6
    comb(i)=1;
end

% FUEL
LHV = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','J15:J69')); %Lower Heating
Value [kJ/kg]
M_C12H23 = 167.311E-3; %[kg./mol] massa molar do querosene
M_CH4 = 16.04E-3; %[kg./mol]
M_ar = 28.965E-3; %[kg./mol] massa molar do ar
M_N2 = 28.01E-3; %[kg./mol] massa molar do N2
M_O2 = 32E-3; % [kg./mol] massa molar do O2
M_CO2 = 44.01E-3; % [kg./mol] massa molar do CO2
M_CO = 28.01E-3;
M_H2O = 18.02E-3; % [kg./mol] massa molar do H2O
M_CH4 = 16.04E-3;
M_H2 = 2.02E-3;
R_N2=0.2968;
R_O2=0.2598;

```

```

R_CO2=0.1889;
R_H2O=0.287;
R_CH4=0.5183;
R_H2=4.124;

for i=1:1
if comb(i) == 1 %C12H23
AF_mol = 86.15; %relação ar - combustível para haver estequiometria
AF_mar = AF_mol .* M_ar ./ M_C12H23;%relação ar - combustívebmássica
lambda = (1 ./ AF_mar) .* (m_a ./m_f);
n_N2(i) = 66.7 .* lambda(i); %fração de N2 nosgases de combustão

else %CH4
AF_mol = 11.56; %relação ar - combustível para haver estequiometria
AF_mar = AF_mol .* M_ar ./ M_CH4;%relação ar - combustívebmássica
lambda = (1 ./ AF_mar) .* (m_a ./m_f);
n_N2(i) = 3*3.76 .* lambda(i); %fração de N2 nosgases de combustão
end
end

Ra=R./M_ar;

% cp_N2= (R_N2.*(3.28+(0.593.*T.*10.^-3)+(0.040.*T3.^-2.*10.^5)));
% cp_O2=(R_O2.*(3.639+(0.506.*T.*10.^-3)-(0.227.*T3.^-2.*10.^5)));
% cp_CO2=(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T.*10.^-3)-(1.157.*T3.^-2.*10.^5)));
% cp_H2O=(R_H2O.*(3.47+(1.045.*T.*10.^-3)+(0.121.*T3.^-2.*10.^5)));
%      cpg_n=fm_N2.(R_N2.*(3.28+(0.593.*T.*10.^-3)+(0.040.*T3.^-2.*10.^5)))
+fm_O2.* (R_O2.*(3.639+(0.506.*T.*10.^-3)-(0.227.*T3.^-2.*10.^5))) +fm_CO2.*
(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T.*10.^-3)-(1.157.*T3.^-
2.*10.^5)))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.045.*T.*10.^-3)+(0.121.*T3.^-2.*10.^5)));

COMB= xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','I15:I69');
QDE_COMP = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','K15:K69');
QTDE_TURB = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','V15:V69');

t1 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','W15:W69'));
t2 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','X15:X69'));
t3 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Y15:Y69'));
t4 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Z15:Z69'));
t5 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AA15:AA69'));
t6 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AB15:AB69'));
t7 = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','AC15:AC69'));

% Pressures [kPa]

```

```

p1 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','L15:L69'));
p2 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','M15:M69'));
p3 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','N15:N69'));
p4 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','O15:O69'));
p5 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','P15:P69'));
p6 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','Q15:Q69'));
p7 =(xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','R15:R69'));

% Thrust (pounds of thrust [lbf]) [N]
FN = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','I15:I69'));
% Speed (rpm)
N1 = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','H15:H69');

% DATA COLLECTION
esn=xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','E15:E69');
[~, reg] = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','G15:G69');
[~, versao]=xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','F15:F69');

for i=1:5
    if QDE_COMP(i)==2

% Temperatures [K]
T_ref(i)= t1(i);
T1(i) = t1(i);
T2(i) = t2(i);
T3(i) = t3(i);
T4(i) = t4(i);
T5(i) = t5(i);
T6(i) = t6(i);
T7(i) = t7(i);

% Pressures [kPa]
P_ref(i)=p1(i);
P1(i)=p1(i);
P2(i)=p2(i);
P3(i)=p3(i);
P4(i)=p4(i);
P5(i)=p5(i);
P6(i)=p6(i);
P7(i)=p7(i);

    else

        % Temperatures(°F) [K]
T_ref(i)=t2(i);
T1(i)= t2(i);
T2(i)= t2(i);

```

```

T3(i)= t3(i);
T4(i)= t4(i);
T5(i)= t5(i);
T6(i)= t6(i);
T7(i)= t7(i);

% Pressures [kPa]
P_ref(i)=p2(i);
P1(i)=p2(i);
P2(i)=p2(i);
P3(i)=p3(i);
P4(i)=p4(i);
P5(i)=p5(i);
P6(i)=p6(i);
P7(i)=p7(i);

    end
end

% Thrust (pounds of thrust [lbf]) [N]
FN = (xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','H15:H69'));
% Speed (rpm)
N1 = xlsread('tabela_dados.xlsx','Valores','G15:G69');

% LPC
%trabalho e rendimento energético
cp_a_1=Ra.*(3.355+(0.575.*T1.*10.^-3)-(0.016.*T1.^-2.*10.^5));
cp_a_2=Ra.*(3.355+(0.575.*T2.*10.^-3)-(0.016.*T2.^-2.*10.^5));
for i=1:5
    W_dot_LPC(i)=m_a(i).*(cp_a_2(i).*T2(i)-cp_a_1(i).*T1(i)); %potência gerada
pela LPC [kW]
end
    cp_a_LPC=Ra.*(3.355+(0.575.*((T2+T1)./2).*10.^-3)-(0.016.*((T2+T1)./2).^-
2.*10.^5));
    mi_a_LPC=1./(1-(Ra./cp_a_LPC));
    eta_LPC=((P2./P1).^((mi_a_LPC-1)./mi_a_LPC))-1./((T2./T1)-1);
%rendimento energético [%]

%HPC
%trabalho e rendimento energético
cp_a_3=Ra.*(3.355+(0.575.*T3.*10.^-3)-(0.016.*T3.^-2.*10.^5));
for i=1:5
    W_dot_HPC(i)=m_a(i).*(cp_a_3(i).*T3(i)-cp_a_2(i).*T2(i)); %potência gerada
pela HPC [kW]
end
    cp_a_HPC=Ra.*(3.355+(0.575.*((T2+T3)./2).*10.^-3)-(0.016.*((T2+T3)./2).^-
2.*10.^5));
    mi_a_HPC=1./(1-(Ra./cp_a_HPC));

```

```

eta_HPC=((P3./P2).^((mi_a_HPC-1)./mi_a_HPC))-1./((T3./T2)-1);
%rendimento energético
for i=1:1
    % CO %H2O %CO2 %H2 %CH4 %O2 %N2
    Aeq = [ 1 0 1 0 1 0 0 ; % C balance
            1 1 2 0 0 2 0 ; % O balance
            0 2 0 2 4 0 0 ; % H balance
            0 0 0 0 0 0 2]; % N balance

    if comb(i) == 1 %C12H23
        beq = [ 12 % C fed
                17.75*lambda(i)*2 % O fed
                23 % H fed
                2*n_N2(i)]; % N fed
    else
        beq = [ 1 % C fed
                3*lambda(i)*2 % O fed
                4 % H fed
                2*n_N2(i)]; % N fed
    end
    LB=[1e-18 1e-18 1e-18 1e-18 1e-18 1e-18 1e-18];
    x0 = [1 1 1 1 1 1 1];
    param = [T4(i) P4(i)];
    options1 = optimset('Display','off','Algorithm','sqp');
    [r,fval,exitflag]=
fmincon(@(r)func(r,param),x0,[],[],Aeq,beq,LB,[],[],options1);
    f_CO(i)=
abs(r(1))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
    f_H2O(i)=
abs(r(2))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
    f_CO2(i)=
abs(r(3))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
    f_H2(i)=
abs(r(4))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
    f_CH4(i)=
abs(r(5))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
    f_O2(i)=
abs(r(6))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
    f_N2(i)=
abs(r(7))/(abs(r(1))+abs(r(2))+abs(r(3))+abs(r(4))+abs(r(5))+abs(r(6))+abs(r(7)
)));
end

M_g = (f_CO.* M_CO + f_H2O .*M_H2O + f_CO2.* M_CO2 + f_H2 .* M_H2 + f_CH4
.* M_CH4 + f_O2 .* M_O2 + f_N2 .* M_N2);%massa molar do gás de combustão
Rg=R./M_g;

```

% Novo cp do gás a partir do van wylen e florian

```
fm_CO=f_CO*M_CO./M_g;  
fm_H2O=f_H2O*M_H2O./M_g;  
fm_CO2=f_CO2*M_CO2./M_g;  
fm_H2=f_H2*M_H2./M_g;  
fm_CH4=f_CH4*M_CH4./M_g;  
fm_O2=f_O2*M_O2./M_g;  
fm_N2=f_N2*M_N2./M_g;
```

% CC

%rendimento energético fixo 99.95%

%eta\_CC=0.9995;

%P4

%P4=0.95.\*P3;

% HPT

%constante dos gases

```
cp_g_4=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*T4.*10^(-3)))+(0.040.*T4.^(-  
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*T4.*10^(-3)))-(0.227.*T4.^(-  
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T4.*10^(-3)))-(1.157.*T4.^(-  
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*T4.*10^(-3)))+(0.121.*T4.^(-  
2).*10^(5)))));  
cp_g_5=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*T5.*10^(-3)))+(0.040.*T5.^(-  
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*T5.*10^(-3)))-(0.227.*T5.^(-  
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T5.*10^(-3)))-(1.157.*T5.^(-  
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*T5.*10^(-3)))+(0.121.*T5.^(-  
2).*10^(5)))));
```

%cp HPT

```
cp_g_HPT=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*((T4+T5)/2).*10^(-  
3)))+(0.040.*((T5+T4)/2).^(-  
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*((T5+T4)/2).*10^(-3)))-  
(0.227.*((T5+T4)/2).^(-  
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*((T5+T4)/2).*10^(-3))-  
(1.157.*((T5+T4)/2).^(-  
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*((T5+T4)/2).*10^(-  
3)))+(0.121.*((T5+T4)/2).^(-2).*10^(5)))));
```

mi\_g\_HPT=1./(1-(Rg./cp\_g\_HPT));

cv\_g\_HPT=cp\_g\_HPT-Rg;

gam1=cp\_g\_HPT./cv\_g\_HPT;

sub=1-mi\_g\_HPT;

eta\_HPT=0.80; %Definido porém precisa ser visto

x= (T5./T4)-1;

```

z= (1-mi_g_HPT)./mi_g_HPT;
y = 1 - ((P5./P4).^(z));
ef_isent_HPT = x./y

for i=1:5
W_dot_HPT(i)=m_g(i).*(cp_g_5(i).*T5(i)-cp_g_4(i).*T4(i)); %potência gerada
pela HPT [kW]
end

% LPT
%trabalho e rendimento energético

cp_g_6=fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*T6.*10^(-3)))+(0.040.*T6.^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*T6.*10^(-3)))-(0.227.*T6.^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*T6.*10^(-3)))-(1.157.*T6.^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*T6.*10^(-3)))+(0.121.*T6.^(-
2).*10^(5)))));

cp_g_LPT= fm_N2.*(R_N2.*(3.28+(0.593.*((T6+T5)/2).*10^(-
3)))+(0.040.*((T6+T5)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_O2.*(R_O2.*(3.639+(0.506.*((T6+T5)/2).*10^(-3))-
(0.227.*((T6+T5)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_CO2.*(R_CO2.*(5.457+(1.045.*((T6+T5)/2).*10^(-3))-
(1.157.*((T6+T5)/2).^(-
2).*10^(5))))+fm_H2O.*(R_H2O.*(3.47+(1.45.*((T6+T5)/2).*10^(-
3)))+(0.121.*((T6+T5)/2).^(-2).*10^(5)))));
cv_g_LPT=cp_g_LPT-R;
gam2=cp_g_LPT./cv_g_LPT;

mi_g_LPT=1./(1-(Rg./cp_g_LPT));
eta_LPT=-1*(((T6./T5)-1)./(1-(P5./P6).^((1-
mi_g_LPT)./mi_g_LPT))));%rendimento energético
for i=1:5
W_dot_LPT(i)=m_g(i).*(cp_g_6(i).*T6(i)-cp_g_5(i).*T5(i)); %potência gerada
pela LPT [kW]
end

%MOTOR
% Potência líquida no motor
%W_dot_TT_net=W_dot_HPT+W_dot_LPT-W_dot_LPC;
W_dot_TT=(W_dot_HPT+W_dot_LPT);

%rendimento energético

```



```
%eta_TT_net = W_dot_TT_net ./ (m_f.* LHV); %eficiência energética total  
líquida
```

```
eta_TT = W_dot_TT ./ (m_f .* LHV); % eficiência energética total
```

```
%EXERGIA
```

```
% XI
```

```
%exergia química do combustível
```

```
ex_Q_fuel=(1.0401+0.01728*23/12).*LHV;
```

```
%química do combustível [kJ/mol]
```

```
Q_N2 = 0.72; %exergia química do N2
```

```
Q_O2 = 3.97; %exergia química do O2
```

```
Q_CO2 = 19.87; %exergia química do CO2
```

```
Q_H2O = 9.49; % exergia química do H2O
```

```
%exergias físicas relacionadas à temperatura
```

```
for i=1:5
```

```
ex_Tref(i) = 0;
```

```
ex_T1(i) = cp_a_1(i) .* ((T1(i) - T_ref(i)) - T_ref(i).* log(T1(i) ./  
T_ref(i)));
```

```
ex_T2(i) = cp_a_2(i) .* ((T2(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T2(i) ./  
T_ref(i)));
```

```
ex_T3(i) = cp_a_3(i).* ((T3(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T3(i) ./  
T_ref(i)));
```

```
ex_T4(i)= cp_g_4(i).* ((T4(i)- T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T4(i) ./  
T_ref(i)));
```

```
ex_T5(i) = cp_g_5(i).* ((T5(i) - T_ref(i)) - T_ref(i) .* log(T5(i) ./  
T_ref(i)));
```

```
ex_T6(i) = cp_g_6(i).* ((T6(i) - T_ref(i)) - T_ref(i).* log(T6(i) ./  
T_ref(i)));
```

```
end
```

```
%exergias físicas relacionadas à pressão
```

```
ex_P1 = R .* T_ref .* log(P1 ./ P_ref) ./ M_ar;
```

```
ex_P2 = R .* T_ref .* log(P2./ P_ref) ./ M_ar;
```

```
ex_P3 = R .* T_ref .* log(P3 ./ P_ref) ./ M_ar;
```

```
ex_P4 = R .* T_ref .* log(P4 ./P_ref) ./ M_g;
```

```
ex_P5 = R .* T_ref .* log(P5./ P_ref) ./ M_g;
```

```
ex_P6 = R .* T_ref .* log(P6./ P_ref) ./ M_g;
```

```
%exergias físicas
```

```
for i=1:5
```

```
ex_F1(i)= ex_P1(i) + ex_T1(i);
```

```
ex_F2(i)= ex_P2(i) + ex_T2(i);
```

```
ex_F3(i) = ex_P3(i)+ ex_T3(i);
```

```
ex_F4(i)= ex_P4(i) + ex_T4(i);
```

```
ex_F5(i)= ex_P5(i) + ex_T5(i);
```

```
ex_F6(i)= ex_P6(i) + ex_T6(i);
```

```
end
```

```

%taxa de exergia física
for i=1:5
    ex_d_F1(i) = ex_F1(i) .* m_a(i);
    ex_d_F2(i) = ex_F2(i) .* m_a(i);
    ex_d_F3(i) = ex_F3(i) .* m_a(i);
    ex_d_F4(i) = ex_F4(i) .* m_g(i);
    ex_d_F5(i) = ex_F5(i) .* m_g(i);
    ex_d_F6(i) = ex_F6(i) .* m_g(i);
end

%Exergias químicas
ex_Q= ((f_N2.* Q_N2 + f_O2 .* Q_O2+ f_CO2.* Q_CO2 + f_H2O .*Q_H2O) + (R .*
T_ref) .* (f_N2 .* log(f_N2) + f_O2 .* log(f_O2) +f_CO2 .* log(f_CO2) + f_H2O
.* log(f_H2O)))) ./ M_g; %exergiaquímica da combustão
ex_d_Q = ex_Q .* m_g; %taxa exergética na combustão

%Exergias totais
for i=1:5
    ex_d_1(i)= ex_d_F1(i); %exergia total no ponto 1
    ex_d_2(i) = ex_d_F2(i); %exergia total no ponto 2
    ex_d_3(i) = ex_d_F3(i) + ex_d_Q(i); %exergia total no ponto 3
    ex_d_4(i) = ex_d_F4(i); %exergia total no ponto 4
    ex_d_5(i) = ex_d_F5(i); %exergia total no ponto 5
    ex_d_6(i)= ex_d_F6(i); %exergia total no ponto 6
    ex_d_comb(i) = ex_Q_fuel(i) .* m_f(i); %exergia total do combustível
end

%Balanço exergético [kW]
for i=1:5
    ex_dd_1(i)= ex_d_1(i)+ W_dot_LPC(i) - ex_d_2(i); %balanço exergético no LPC
    ex_dd_2(i) = ex_d_2(i) + W_dot_HPC(i) - ex_d_3(i); %balanço exergético no
HPC
    ex_dd_3(i)= ex_d_3(i) + ex_d_comb(i)- ex_d_4(i); %balanço exergético da cc
    ex_dd_4(i) = ex_d_4(i) + W_dot_HPT(i) - ex_d_5(i); %balanço exergético no
HPT
    ex_dd_5(i) = ex_d_5(i) + W_dot_LPT(i) - ex_d_6(i); %balanço exergético no
LPT
end

%Eficiências exergéticas [%]
for i=1:5
    eta_x_LPC(i) = 1 - (ex_dd_1(i)./( W_dot_LPC(i) + ex_d_1(i))); %eficiência
exergética do LPC
    eta_x_HPC(i) = 1 - (ex_dd_2(i)./( W_dot_HPC(i) + ex_d_2(i))); %eficiência
exergética do HPC
    eta_x_CC(i)= 1 - (ex_dd_3(i)./( ex_d_3(i) + ex_d_comb(i))); % eficiência
exergética da CC
    eta_x_HPT(i) = 1 - (ex_dd_4(i)./ ex_d_4(i)); %eficiência exergética da HPT
    eta_x_LPT(i) = 1 - (ex_dd_5(i) ./ ex_d_5(i)); %eficiência exergética da LPT

```

```

    %eta_x_net = W_dot_TT_net ./ (ex_d_comb); %eficiência exergética total
    líquida do motor
    eta_x_TT(i) = -(W_dot_HPT(i) + W_dot_LPT(i)) ./ (ex_d_comb(i)); %eficiência
    exergética total do motor
end

filename = 'resultadofinal2.xlsx';
A1 = [P1',P2',P3',P4',P5',P6',T1',T2',T3',T4',T5',T6'];];
sheet = 1;
xlswrite(filename,A1,sheet);
filename = 'resultadofinal3.xlsx';
A2
=[eta_x_LPC',eta_x_HPC',eta_x_CC',eta_x_HPT',eta_x_LPT',eta_x_TT',ex_dd_1',ex_
dd_2',ex_dd_3',ex_dd_4'];];
xlswrite(filename,A2,sheet);
%end

```

```

function G = func(nj,p)

R = 8.314e-3; % kJ/mol K
Po = 101.325; % atm, this is the standard state pressure

% Calor de Formacao das Especies a 298K em kJ/mol
Hf298 = [
    -110.525 % CO
    -241.818 % H2O
    -393.509 % CO2
     0.0 % H2
    -74.520 % CH4
     0.0 % O2
     0.0]; % N2

Gf298 = [
    -137.169 % CO
    -228.572 % H2O
    -394.359 % CO2
     0.0 % H2
    -50.460 % CH4
     0.0 % O2
     0.0]; % N2

% Entropia de Formacao das Especies a 298K em kJ/mol

Sf298 = (Hf298-Gf298)/298.15;

% % Energia de Gibbs

```

```

%      %      'CO'      'H2O'      'CO2' 'H2'      'CH4' 'O2'
'N2';
%      %      A      B      C      D
E(em J/mol K)
%      A      B      C      D
E(em J/mol K)
WB = 1e-3*[28.16      1.675*10^(-3)      0.5372*10^(-5)      -
2.2220*10^(-9)      0.089360      % CO
32.24      0.1923*10^(-2)      1.0550*10^(-5)      -
3.5950*10^(-9)      -0.044300      % H2O
22.26      5.9810*10^(-2)      -3.501*10^(-5)      -
7.4690*10^(-9)      0.002851      % CO2
29.11      -1.916*10^(-3)      0.4003*10^(-5)      -
0.8704*10^(-9)      0      % H2
19.89      5.204*10^(-2)      1.2690*10^(-5)      -
11.010*10^(-9)      -0.080700      % CH4
25.48      1.5200*10^(-2)      -0.7155*10^(-5)
1.3120*10^(-9)      0      % O2
28.90      -1.571*10^(-3)      0.8081*10^(-5)      -
2.8730*10^(-9)      0];
%      %      'CO'      H2O'      'CO2' 'H2'      'CH4' 'N2'}; %% AQUI NÃO
%      %      SÃO AS ESPECIES
t = p(1)/298.15;
T_H = [(p(1)-298.15); (p(1)^2-(298.15^2))/2; (p(1)^3-
(298.15^3))/3; (p(1)^4-(298.15^2))/4;0];
T_S = [log(p(1)/298.15); (p(1)-298.15); (p(1)^2-(298.15^2))/2;
(p(1)^3-(298.15^3))/3;0];
H = Hf298 + WB*T_H; % (H - H_298.15) kJ/mol
S = Sf298 + WB*T_S; % absolute entropy kJ/mol/K

Gjo = H - p(1)*S; % Gibbs energy of each component at 1000 K

% Equações
%      'CO'      H2O'      'CO2' 'H2'      'CH4' 'O2' 'N2'};
nj
Enj = sum(abs(nj))
G = abs(nj(1)).*((Gjo(1)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(1))/Enj*p(2)/Po)))...
+ abs(nj(2)).*((Gjo(2)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(2))/Enj*p(2)/Po)))...
+ abs(nj(3)).*((Gjo(3)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(3))/Enj*p(2)/Po)))...
+ abs(nj(4)).*((Gjo(4)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(4))/Enj*p(2)/Po)))...
+ abs(nj(5)).*((Gjo(5)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(5))/Enj*p(2)/Po)))...
+ abs(nj(6)).*((Gjo(6)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(6))/Enj*p(2)/Po)))...
+ abs(nj(7)).*((Gjo(7)/(R*p(1)))
+ log(abs(nj(7))/Enj*p(2)/Po)));
end

```

