

# GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA COMPRESSÃO ADIABÁTICA DO AR COMPRIMIDO

---

Eduardo Henrique dos Santos Rosa<sup>1</sup>

Matheus Madalozo<sup>2</sup>

Wilson José da Silva<sup>3</sup>

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo otimizar uma tecnologia já existente, mas não comumente utilizada, a fim de gerar energia elétrica de forma mais limpa que as atualmente utilizadas no cotidiano (termoelétricas, hidroelétricas, dentre outras). Trata-se do uso do ar comprimido. Também buscamos aprimorar o rendimento de nossa turbina, que é parte fundamental do sistema para a geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Adiabático. Indução Eletromagnética. Energia Elétrica. Ar Comprimido.

---

<sup>1</sup> Aluno do 6º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Voluntário do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2014-2015). *Email:* eduardo-hdos@hotmail.com

<sup>2</sup> Aluno do 7º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2014-2015). *Email:* madalozo893@gmail.com

<sup>3</sup> Phd em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela UTFPR. Professor na FAE Centro Universitário. *Email:* wilson.silva@fae.edu

## INTRODUÇÃO

A civilização aos poucos vem se dando conta de que a saúde do planeta, bem como a degradação dele, são processos irreversíveis, e o alerta já foi dado por meio dos principais indicadores no mundo (BORÉM, 2005). Por essa ótica, faz-se necessário desenvolver estudos voltados à tecnologia limpa, contribuindo para uma atmosfera favorável para os seres humanos e, por que não, de uma forma mais global, para os seres vivos (BORÉM, 2005).

Buscamos, por meio de intenso estudo teórico e criação e análise de um protótipo, melhorar a tecnologia de armazenamento de ar comprimido e o rendimento de nossa turbina, podendo assim gerar mais energia limpa e renovável.

A busca por produção de energia elétrica alternativa sem dúvidas é uma opção memorável, não agride o ambiente e já é economicamente viável. Quanto antes a ciência e tecnologia estudarem a temática envolvendo a possível futura crise energética mundial, com certeza será possível diminuir os agravantes ou até mesmo anulá-los de forma que as futuras gerações possam ter acesso à eletrecidade sem dificuldades (JANUZZI, 2001).

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 PROCESSO ADIABÁTICO

Por definição, um processo adiabático não envolve nenhum fluxo de calor, ou seja, não ocorre troca de energia por radiação, condução e nem por convecção.

Para representarmos essa ausência de troca de calor com o meio, usamos a notação:

$$\sigma Q = 0 \quad (1)$$

A partir daí podemos afirmar, pelo princípio da conservação de energia, que:

$$dU = \sigma Q - \sigma W \quad (2)$$

Sendo  $\sigma Q = 0$ , asseveramos que:

$$dU = -\sigma W \quad (3)$$

Em que  $dU$  representa a Energia Interna do sistema e  $\sigma W$  o trabalho realizado. Ou seja, a energia interna é modificada apenas pelo trabalho realizado. Com a perda de energia interna, há a realização do trabalho (aumento de volume) pelo gás e a diminuição de temperatura dele.

Para certos processos, incluindo todos os reversíveis, as diferenciais do segundo membro da Equação (2) são definidas por:

$$\sigma Q = TdS \text{ e } \sigma W = - \sum_{j=1}^m \Phi^j d\Psi^j \quad (4), (5)$$

Em que T e S são, respectivamente, a temperatura e a entropia do sistema,  $\Phi^j$  e  $\Psi^j$  são, respectivamente, as variáveis forças e deslocamentos generalizados do sistema e  $m$  é o número total de variáveis necessárias para caracterizar o sistema. Desse modo, a Equação (2) pode ser escrita como:

$$dU = TdS - \sum_{j=1}^m \Phi^j d\Psi^j \quad (6)$$

Este tema é amplamente estudado no mundo, pois até hoje não foi possível criar algo perfeitamente adiabático.

Teoricamente, a eficiência do armazenamento adiabático seria de 100%, mas na prática não tem esta eficácia. O armazenamento adiabático é uma idealização e alcançá-lo seria um grande avanço para a tecnologia mundial.

Para conseguirmos atingir o objetivo do projeto, precisamos buscar uma forma de chegarmos o mais perto possível do equilíbrio termodinâmico dentro do nosso sistema. O equilíbrio termodinâmico ocorre quando o sistema não está sujeito a interações com o meio externo (WYLEN, 1995).

Na teoria teríamos que atingir o equilíbrio termodinâmico para podermos estudar nosso sistema de uma melhor maneira. Novamente isso seria apenas de forma teórica, pela mesma razão do processo adiabático. No entanto, podemos buscar chegar mais perto disso.

Para ficar compreendido este estudo, devemos primeiramente entender que um sistema termodinâmico é uma região definida por limites preestabelecidos com o intuito de estudar a sua energia e as suas transformações (KUBO, 1968).

Para podermos chegar o mais perto possível do equilíbrio termodinâmico, precisamos ter conhecimento prévio da teoria de como se chega nesse equilíbrio, quais fatores influenciam negativamente e positivamente no nosso sistema, além das condições de equilíbrio.

## 1.2 EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO

Os sistemas macroscópicos tendem a evoluir para estados nos quais as propriedades são determinadas por fatores intrínsecos do sistema, não por influências externas anteriormente aplicadas. Esses estados terminais são independentes do tempo e são chamados **estados de equilíbrio termodinâmico**. Neles, o potencial termodinâmico é minimizado e a entropia ( $S$ ) é maximizada com base nas condições específicas do sistema.

A termodinâmica busca descrever esses estados de equilíbrio termodinâmico para os quais os sistemas eventualmente evoluem (ESTUDO DIRIGIDO, 2000).

Para se obter o equilíbrio termodinâmico, precisamos aumentar a sua entropia ( $S$ ) para que cheguemos no seu “estado final”. Por definição, entropia é uma grandeza termodinâmica que mede o grau de irreversibilidade de um sistema ou desordem de um sistema.

De acordo com Rudolf Clausius (1865), físico que propôs o conceito de entropia, a variação da entropia de um sistema é obtida pela fórmula:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (7)$$

Em que  $Q$  representa a quantidade de calor do sistema e  $\bar{T}$  a temperatura absoluta na escala Kelvin.

## 1.3 SISTEMA REVERSÍVEL

Segundo Kubo (1968), um processo é reversível quando pode reverter cada etapa, passo a passo, por mudanças infinitesimais da condição do ambiente.

Exemplo:

Quando um fluido (água) muda do estado  $\alpha$  (líquido) para  $\alpha'$  (sólido), e seu ambiente muda de  $\beta$  para  $\beta'$ , ele será reversível apenas se seu estado voltar de  $\alpha'$  para  $\alpha$  ao mesmo tempo em que o ambiente muda de  $\beta'$  para  $\beta$ .

Simplificando:

$(\alpha, \beta) \rightarrow (\alpha', \beta')$  é considerado reversível.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> O processo reversível é uma idealização.

## 1.4 SISTEMA IRREVERSÍVEL

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, em um processo reversível (isentrópico) podemos utilizar:

$$Q = T\Delta S, \text{ sendo } \Delta S = 0 \text{ (não varia a entropia).}$$

Em um processo irreversível utilizamos:

$$Q < T\Delta S$$

A entropia aumenta, tornando necessária a eliminação do calor no sistema.

## 1.5 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA)

Como foi dito anteriormente, o princípio de conservação de energia pode ser expresso matematicamente pela equação 2:

$$dU = -\sigma W + \sigma Q$$

A primeira lei da termodinâmica se baseia neste princípio e diz que o trabalho produzido é proporcional à energia utilizada para gerar esse trabalho.

Este postulado pode ser descrito como:

$$\frac{dU}{dt} = -\sigma W_{dot} + \sigma Q_{dot} + \sum M_{e dot} \left( h_e + \frac{W_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum M_{s dot} \left( h_s + \frac{W_s^2}{2} + gZ_s \right) \quad (8)$$

Observe que foram adicionados dois novos membros na equação

$$\sum M_{e dot} \left( h_e + \frac{W_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum M_{s dot} \left( h_s + \frac{W_s^2}{2} + gZ_s \right)$$

São eles, respectivamente: o somatório das energias cinética e potencial de entrada e de saída do sistema. É importante utilizarmos essa equação, pois ela expressa as variáveis existentes que influenciarão na eficiência do nosso sistema (SHAPIRO, 2009).

## 1.6 LEIS DE FICK

A Lei de Fick é uma lei quantitativa em forma diferencial, criada por Adolf Eugen Fick em 1855. Ela descreve o fenômeno da difusão, em que existe a movimentação de partículas (átomos) ou energia de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração – a matéria é transportada pela própria matéria. Para facilitar o entendimento, podemos considerar que a Lei de Fick estuda o comportamento da movimentação da matéria, seja ela sólida, líquida ou gasosa, podendo ser ela de átomos diferentes (interdifusão) ou átomos iguais (autodifusão). Os processos de difusão são irreversíveis, conseqüentemente aumentando a entropia (CALLISTER, 2008).

Para compreendermos melhor os fenômenos que ocorrem dentro de um sistema, precisamos primeiro definir os tipos de regimes (estados) que regem o sistema.

### 1.6.1 Estado Estacionário (Regime Permanente) – 1ª Lei de Fick

Neste estado a velocidade e a pressão não variam com o tempo, ou seja, terão o mesmo valor em cada ponto móvel do espaço e em qualquer tempo determinado. É um fluxo estável (MARTIN; SALCDO; FONT, 2011).

Primeiramente devemos entender alguns conceitos como o Fluxo de Difusão ( $J$ ), que determina a rapidez com que ocorre o processo de difusão. É definido pela massa difundida por unidade de tempo em uma área unitária perpendicular à direção do movimento:

$$J_{dot} = \frac{M}{At} \quad (9)$$

Forma diferencial:

$$J_{dot} = \frac{dM}{A dt} \quad (10)$$

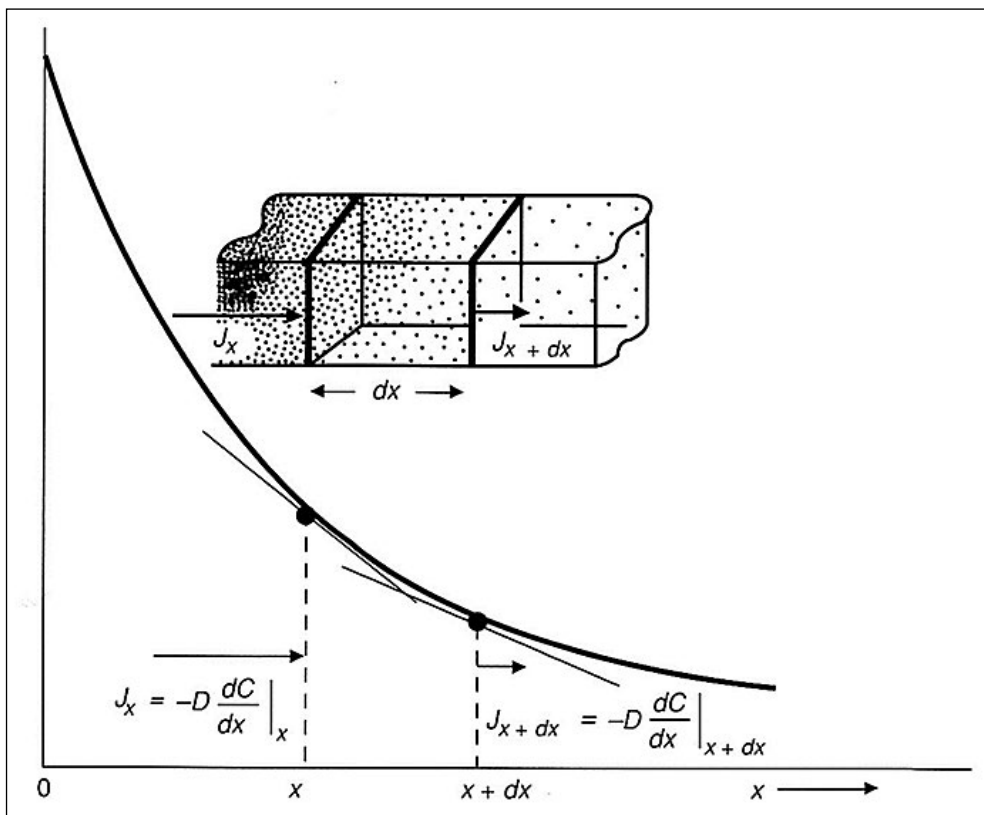
Outro conceito importante que ocorre no caso de uma difusão unidimensional é a Concentração dos átomos ( $C$ ). Essa concentração, descrita a seguir, é função da posição ( $x$ ) e do tempo ( $t$ ):

$$C = f(x, t)$$

É por meio da curva desta função que encontramos o Perfil de Concentração e o Fluxo de Difusão para qualquer ponto no tempo, já que o fluxo num ponto determinado é proporcional ao valor do gradiente. Assim obtemos:

$$J_x = -D \frac{dC}{dX} \Big|_x \quad (11)$$

FIGURA 1 – Função da difusão para determinada posição



FONTE: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP  
(<http://www.pmt.usp.br/pmt5783/Difus%C3%A3o.pdf>)

Quando  $J$  não varia em relação ao tempo,  $C$  também não varia. Entretanto, para que isso ocorra,  $J$  também não pode variar com a posição. Assim obtemos:

$$\frac{dC}{dX} = \text{cte}C \text{ é função linear de } x$$

$$\frac{dC}{dX} = \frac{\Delta C}{\Delta X} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad (12)$$

Com esses conceitos, podemos analisar de forma plena o comportamento da difusão no estado estacionário. Chamamos de 1ª Lei de Fick a equação que correlaciona o Fluxo de Difusão com o Gradiente de Concentração.

$$J_x = -D \frac{dC}{dX} \quad (13)$$

Utilizamos o sinal negativo em D para indicar que o fluxo ocorre na direção oposta do Gradiente de Concentração.

### 1.6.2 Estado não Estacionário (Regime não Permanente) – 2ª Lei De Fick

Neste regime ou estado, a velocidade e a pressão variam com o tempo e também de um ponto a outro. É um fluxo variável ou transitório. É uma função que depende do tempo, um fluxo transitório (CALLISTER, 2008).

A difusão, na prática, acontece maiormente em condições transitórias. Nesse estado não estacionário o fluxo e a concentração da difusão variam com o tempo. Para deduzirmos a fórmula utilizada na 2ª Lei, começaremos pelo Gradiente de Concentração numa determinada situação:

$$\delta C_B = \frac{(J_1 - J_2)A\delta t}{A\delta t} \quad (14)$$

Como a variação da posição  $\delta x$  é pequena, temos:

$$J_2 = J_1 + \frac{\partial J}{\partial x} \delta x \quad (15)$$

Como Gradiente e o Fluxo variam com o tempo ( $\delta t \rightarrow 0$ , para obter uma precisão maior):

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = -\frac{\partial J_B}{\partial x} \quad (16)$$

Substituindo a primeira Lei na segunda, obtemos a equação da 2ª Lei de Fick:

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_B \frac{\partial C_B}{\partial X} \right) \quad (17)$$



Se o Coeficiente de Difusão não depende da posição, obtemos:

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = (D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial X^2}) \quad (18)$$

Após entender como o fluido se difunde em um sistema, precisamos entender como funciona a autodifusão (fluido que se difunde) que ocorre por meio da difusão substitucional. Seu coeficiente é dado por:

$$D_{A^*} = D_A = \frac{1}{6} \alpha^2 r \quad (19)$$

## 1.7 ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Existem dois tipos de escoamento, o viscoso (laminar ou turbulento) e o não viscoso, que se subdividem também em compressível, incompressível, interno e externo.

Como o fluido que alimenta nosso projeto é o ar comprimido, utilizamos o conceito de escoamento compressível, pois este ocorre apenas nos gases, que é o caso do ar. Mas, pela definição, nem todo escoamento gasoso é considerado compressível, pois isso ocorre apenas quando a perda de pressão no fluido é suficiente para determinar uma variação acima de 10% da densidade<sup>5</sup> (MARTIN; SALCDO; FONT, 2011).

Para podermos estudar o comportamento da compressão, vamos deduzir a partir da equação do momento a fórmula a ser utilizada (MARTIN; SALCDO; FONT, 2011):

$$\oint_S [\rho \cdot (\vec{V}, \vec{dS})] \cdot \vec{V} + \iiint_V \frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} dV = \iiint_V \rho \cdot \vec{f} \cdot dV - \oint_S p \cdot \vec{dS} \quad (20)$$

$$\oint_S [\rho \cdot (\vec{V}, \vec{dS})] \cdot \vec{V} = - \oint_S p \cdot \vec{dS} \quad (21)$$

$$\oint_S [[\rho \cdot (\vec{V}), \vec{dS}]] \cdot u = - \oint_S (p \cdot dS)_x \quad (22)$$

<sup>5</sup> Precisamos levar em consideração que ao trabalhar com gases, a densidade e, conseqüentemente, a velocidade podem variar ao longo do sistema.

Integrando, obtemos:

$$\rho_1 \cdot (-u_1 \cdot A) \cdot u_1 + \rho_2 \cdot (u_2 \cdot A) \cdot u_2 = -(p_1 \cdot A + p_2 \cdot A) \quad (23)$$

$$p_1 + \rho_1 \cdot u_1^2 = p_2 + \rho_2 \cdot u_2^2 \quad (24)$$

## 1.8 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A indução eletromagnética, que trata do fato dos campos magnéticos variáveis induzirem corrente, foi descoberta no início da década de 1830, simultaneamente, por Michael Faraday e por Joseph Henry (TIPLER, 1990).

Conhecida como Lei de Faraday-Neumann-Lenz, a indução eletromagnética faz parte de um conjunto de equações chamadas Equações de Maxwell. Essas equações guiam os estudos sobre o eletromagnetismo clássico e são de grande importância para entender como nosso sistema gerará energia elétrica.

De acordo com a Lei de Faraday-Neumann-Lenz, campos magnéticos em movimento geram uma força eletromotriz (FEM), que é a propriedade de algo gerar corrente elétrica. Para representar a FEM, usa-se a notação:

$$\mathcal{E}$$

Matematicamente, a FEM é descrita como (TIPLER, 1990):

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (25)$$

Quando a distribuição de cargas varia com o tempo, a Lei de Faraday-Neumann-Lenz deve ser descrita como:

$$\mathcal{E} = \oint E \cdot dl = \frac{-d}{dt} \int B \cdot dS \quad (26)$$

O lado direito da Lei de Faraday-Neumann-Lenz é a taxa de variação temporal do fluxo magnético (CLAYTON, 2006).

É importante salientar que a distribuição de cargas no sistema que está sendo proposto por nós variará com o tempo, pois existe um limite de ar comprimido que será lançado na turbina até ele se esgotar, o que gerará uma oscilação na rede.

Uma maneira alternativa de se representar a Lei de Faraday-Neumann-Lenz seria aplicando o Teorema de Stokes, assim, a lei de Faraday-Neumann-Lenz ficaria:

$$\nabla \times E = \frac{-\partial B}{\partial t} \quad (27)$$

## 1.9 ESTUDO DOS ISOLANTES

Para que tenhamos um melhor rendimento, o uso de um isolante térmico no interior do tanque de armazenamento seria ideal. Dentre os isolantes destacamos os que melhor poderiam nos proporcionar esse rendimento favorável. São eles:

- isopor;
- lã de vidro;
- amianto;
- espuma elastomérica;
- poliestireno de alta densidade.

### 1.9.1 Armazenamento

Existem sistemas de armazenamento de energia comumente usados e que possuem qualidades específicas. Um exemplo é uma caverna subterrânea, que possui um grande volume disponível, causando uma elevada quantidade de energia, pouca variação na temperatura e perda de calor.

O nosso objetivo é projetar um sistema de armazenamento de energia que possa, da melhor maneira possível, se igualar ao de uma caverna. Assim, quanto menor a variação, maior será a eficiência do sistema.

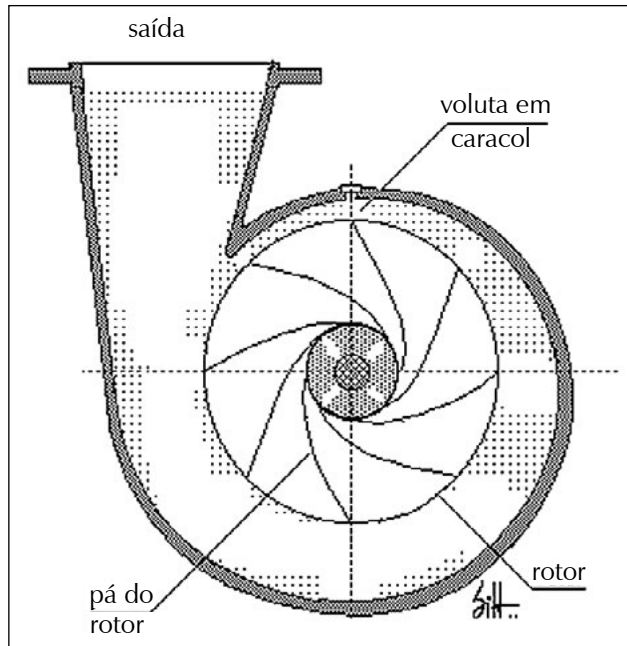
### 1.9.2 Materiais a serem utilizados

Além do ar comprimido, utilizaremos outras tecnologias para montarmos nosso sistema. São elas:

- tanque para o armazenamento do ar comprimido;
- ar comprimido;

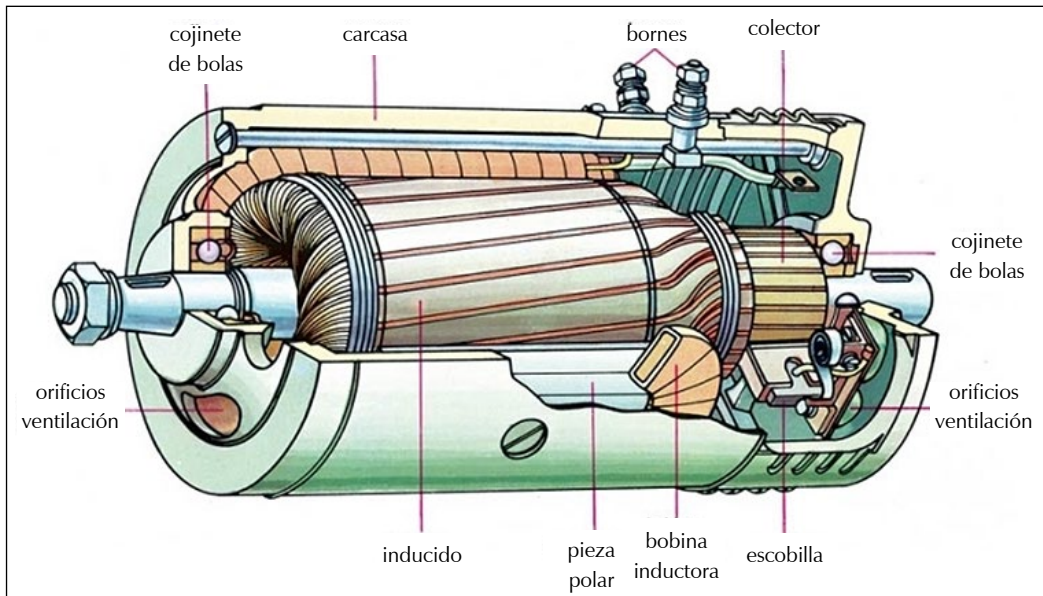
- turbina (FIG. 2);
- dínamo para a geração de energia elétrica (FIG. 3).

FIGURA 2 – Turbina



FONTE: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Image160.gif>

FIGURA 3 – Dínamo



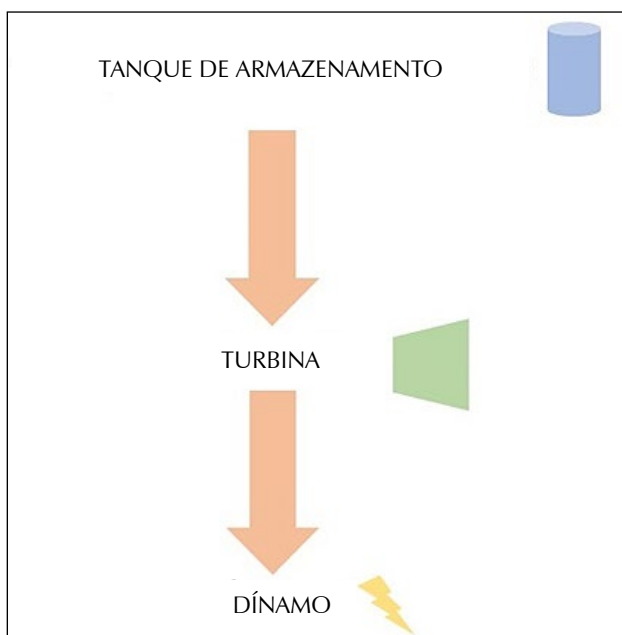
FONTE: <http://www.cobaltus.com/fh/dinamo.jpg>.

Para o funcionamento prático deste projeto serão utilizados todos os componentes descritos.

## 2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO

Primeiramente, o ar será comprimido e armazenado no tanque de armazenamento. Logo depois o ar comprimido será lançado na turbina, que estará conectada, através de um rotor, no dínamo. O ar em contato com a turbina faz com que ela gire, o que conseqüentemente fará o rotor do dínamo girar, que pelo processo de indução eletromagnética gerará energia elétrica.

FIGURA 4 – Esquema representativo do funcionamento do sistema



FONTE: Os autores (2015)

### 2.1 CONSTRUÇÃO DA MICROTURBINA

Para a construção da microturbina, reunimos os materiais que dispúnhamos e adquirimos os que faltavam a fim de elaborar um protótipo em tamanho reduzido, porém houve certa dificuldade em juntar alguns materiais (rolamento, eixo e carcaça), o que nos levou a adaptar e fabricar algumas peças para a montagem inicial:

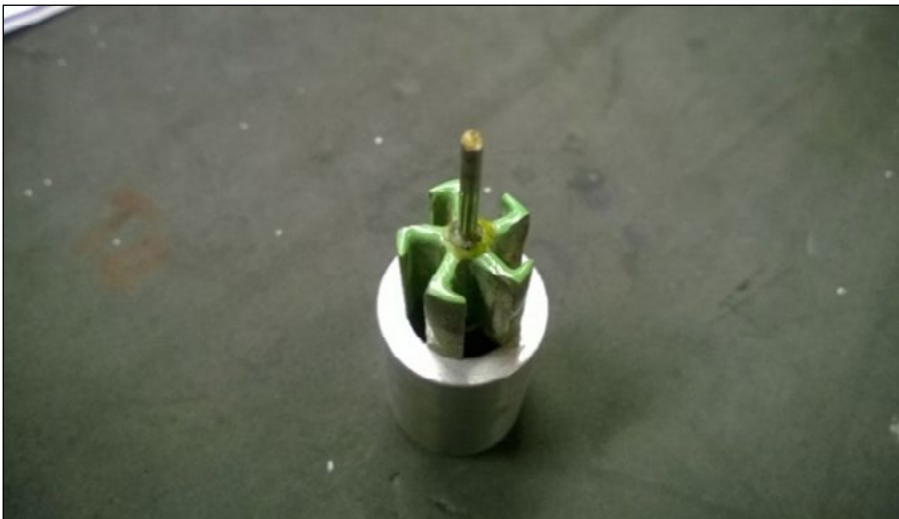
1. Retiramos o rotor de um motor elétrico pequeno para utilizar como a roda da turbina;

2. Com uma minirretífica modificamos o rotor para criar a turbina;
3. Fabricamos uma carcaça sob medida para abrigar esta roda;
4. Não encontramos os rolamentos ideais, por isso tivemos que modificar o projeto inicial;
5. Efetuamos dois furos na carcaça da turbina, um para a entrada e outro para a saída de ar;
6. Como o rolamento não era ideal para o eixo do rotor, fabricamos um eixo para a montagem;
7. Logo após a montagem da turbina, fizemos alguns testes e percebemos que os rolamentos estavam com alguns problemas, pois não cumpriam sua função satisfatoriamente;
8. Constatamos erros de fabricação no eixo, pois o rolamento estava folgado, fazendo com que o eixo girasse em falso;
9. Desmontamos a turbina para avaliar peça a peça e encontramos defeitos nos rolamentos.

Logo após o levantamento dos defeitos e erros constatados na construção deste primeiro protótipo recomeçamos a construção da turbina.

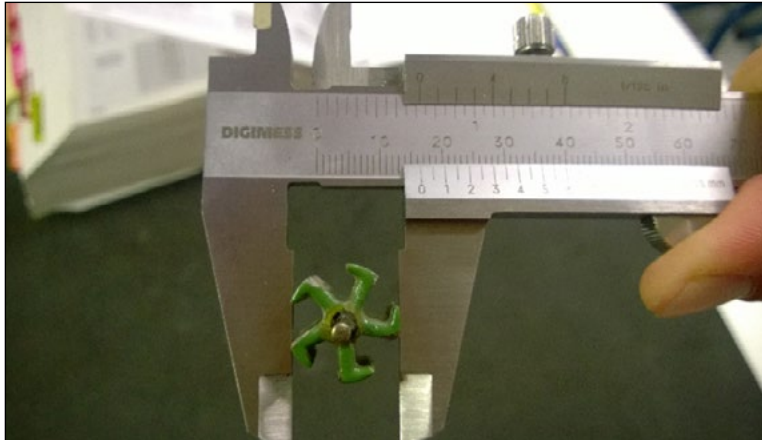
A seguir são apresentadas algumas imagens do processo de fabricação da turbina.

FIGURA 5 – Montagem da turbina



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 6 – Medida do rotor



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 7 – Polimento



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 8 – Usinagem turbina



FONTE: Os autores (2015)



FIGURA 9 – Estabelecendo a entrada e a saída de ar



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 10 – Montagem: turbina e dínamo



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 11 – Turbina montada (vista lateral I)



FONTE: Os autores (2015)



FIGURA 12 – Turbina montada – superior



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 13 – Turbina montada – inferior



FONTE: Os autores (2015)

### 3 CÁLCULOS E SIMULAÇÕES

Para fins de cálculo, foi idealizada uma turbina teórica que é operada em regime permanente.

A) Definição da pressão do tanque de ar comprimido.

Fez-se o uso da pressão de 1Mpa (10 bar), que é a pressão de um extintor de incêndio simples, para o uso do tanque de armazenamento.

Recorrendo à tabela termodinâmica do Ar, foi realizada a seguinte interpolação, em que o valor achado em Kelvin para a pressão de 10 bar foi de 524,606 K, assim como a entalpia e entropia de entrada na turbina.

TABELA 1 – Tabela de interpolação entre pressão e temperatura

Temperatura (K)	Pressão (bar)
520	9.684
<b>524.606</b>	10
530	10.37

FONTE: Os autores (2015)

TABELA 2 – Entalpia de entrada: Tabela de interpolação entre entalpia e temperatura

Temperatura (K)	Entalpia (KJ/kg)
520	523.63
524.606	<b>528.42(h1)</b>
530	533.98

FONTE: Os autores (2015)

TABELA 3 – Entalpia de entrada: Tabela de interpolação entre entropia e temperatura

Temperatura (K)	Entropia (kJ/kg K)
520	2.25997
524.606	<b>2.26909</b>
530	2.27967

FONTE: Os autores (2015)

Vazão volumétrica:

A vazão volumétrica foi calculada a partir do volume do extintor e do seu tempo de descarga completo.<sup>6</sup>

Volume = 4 litros

Tempo de descarga total = 16 segundos

$$Vdot = \frac{V}{t} = \frac{4l}{16s} = 0.25 \frac{l}{s} = \frac{0.00025m^3}{s}$$

<sup>6</sup> Dados obtidos a partir de um boletim técnico de extintores (BOLETIM TÉCNICO).

B) Velocidade de entrada do ar comprimido na turbina:

A partir dos dados de diâmetro da saída do ar do tanque (3mm) e da vazão volumétrica encontrada (0,00025m<sup>3</sup>/s), foi possível definir a velocidade de entrada do ar do tanque de armazenamento.

$$w_e = \frac{V\dot{d}ot}{A} = \frac{0.00025m^3/s}{(0.0015m)^2 \cdot \pi} = \mathbf{35.3677m/s}$$

C) Velocidade de saída do ar comprimido na turbina:

A partir dos dados de diâmetro da saída do ar do tanque (5mm) e da vazão volumétrica encontrada, foi feito o cálculo da velocidade de saída do ar que passa pela turbina.

$$w_s = \frac{V\dot{d}ot}{A} = \frac{0,00025m^3/s}{(0,0025m)^2 \cdot \pi} = \mathbf{12.7323m/s}$$

D) Vazão mássica de entrada:

$$M\dot{e}d\dot{o}t = \rho \cdot W_e \cdot A$$

↓

$$M\dot{e}d\dot{o}t = 1.2754 \frac{Kg}{m^3} \cdot 35.3677 \frac{m}{s} \cdot 7.0685 \cdot 10^{-6} m^2$$

↓

$$M\dot{e}d\dot{o}t = \mathbf{3,1885 \cdot \frac{10^{-4}Kg}{s}}$$

E) Vazão mássica de saída:

$$M\dot{s}d\dot{o}t = \rho \cdot W_s \cdot A$$

↓

$$M\dot{s}d\dot{o}t = 1.2754 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{12.7323m}{s} \cdot 1.9635 \cdot 10^{-5} m^2$$

↓

$$M\dot{s}d\dot{o}t = \mathbf{3,1885 \cdot \frac{10^{-4}Kg}{s}}$$

F) Pressão de saída:

$$\Delta w_{dot} = a \cdot t \rightarrow \frac{12.7323m}{s} - \frac{35.3677m}{s} = a \cdot 1s$$

↓

$$a = -22.6354m/s^2$$

$$F = m \cdot a = 3,1885 \cdot 10^{-4}Kg \cdot -22.6354m/s^2$$

↓

$$F = -72.1729 N$$

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow \frac{-72.1729 N}{(0.0025m)^2 \cdot \pi} = -367.5739 Pa = |367.5739 Pa|$$

G) Entalpia de saída

Como está sendo considerado um sistema ideal, diz-se que ele está em regime permanente, o que implica na conservação da energia. Sendo assim, recorrendo novamente à tabela termodinâmica do ar e fazendo a interpolação necessária, acha-se o valor de **377.81kJ/kg** para a energia interna.

TABELA 4 – Tabela de interpolação entre energia interna e temperatura

Temperatura (K)	Energia interna (kJ/kg)
520	374.36
524.606	<b>377.81</b>
530	381.84

FONTE: Os autores (2015)

$$h = u + pv$$

↓

$$h_2 = u + pv$$

↓

$$h_2 = 377.81 \frac{kJ}{kg} + 367.5739 Pa \cdot 0.00025m^3$$

↓

$$h_2 = 377.901 \frac{kJ}{kg}$$

H) Trabalho realizado pela turbina:

$$W = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2)$$

↓

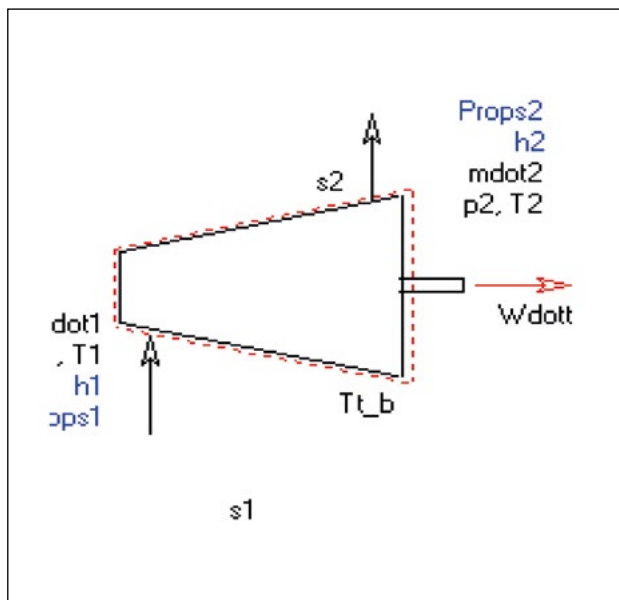
$$W = 3,1885 \cdot \frac{10^{-4} \text{ Kg}}{\text{s}} \cdot \left( 528.42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 377.901 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

↓

$$W = 0.04799 \text{ kW} \approx 0.05 \text{ kW}$$

A partir deste ponto foi feito o uso do *software* Interactive Thermodynamics, em que foram inseridos os dados de pressão, entalpia, entropia e temperatura, tanto para a entrada quanto para a saída da turbina. Desse modo, o *software* nos auxiliou nos cálculos referentes às propriedades da turbina.

FIGURA 14 – Turbina idealizada no *software*



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 15 – Resultados obtidos no Interactive Thermodynamics

Data Browser		
C	D	E
Work	A	B
Variable	Value	
s2	3,545	
T2	377,3	
Wdott	479,9	
h1	528,4	
h2	377,9	
mdot	3,189	
p1	10	
p2	0,003676	
s1	2,269	
T1	524,6	
V1	35,37	
V2	12,73	

Stats Warnings Residuals ?

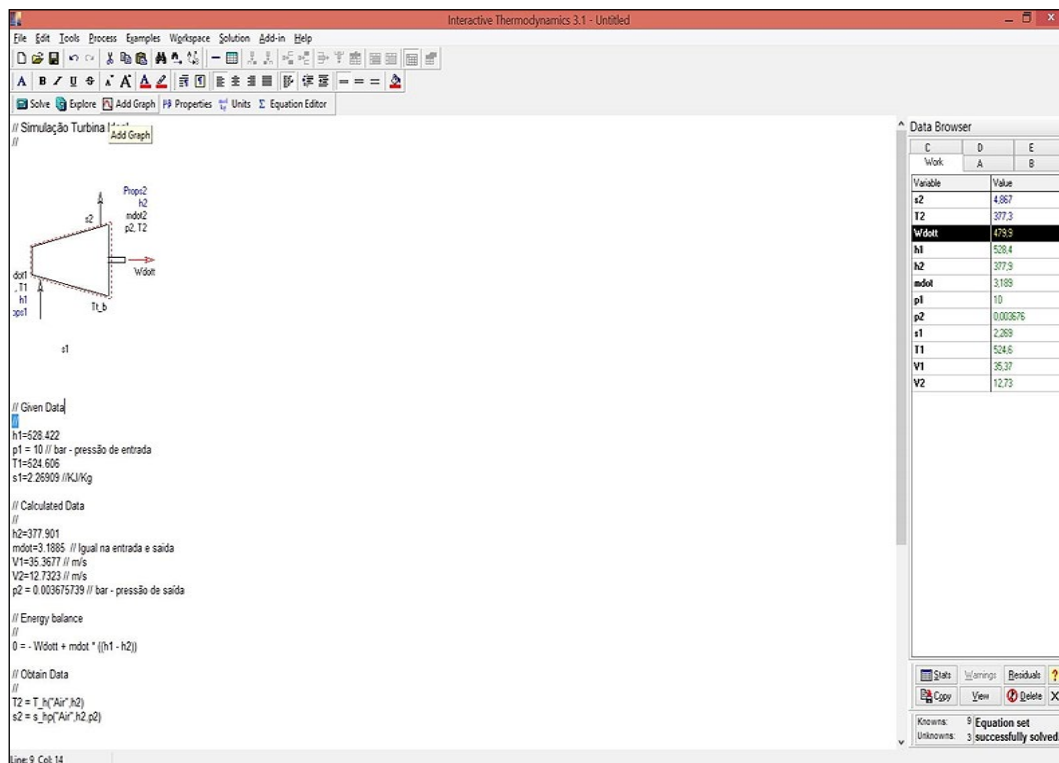
Copy View Delete X

Knowns: 9 **Equation set**  
Unknowns: 3 **successfully solved.**

FONTE: Os autores (2015)

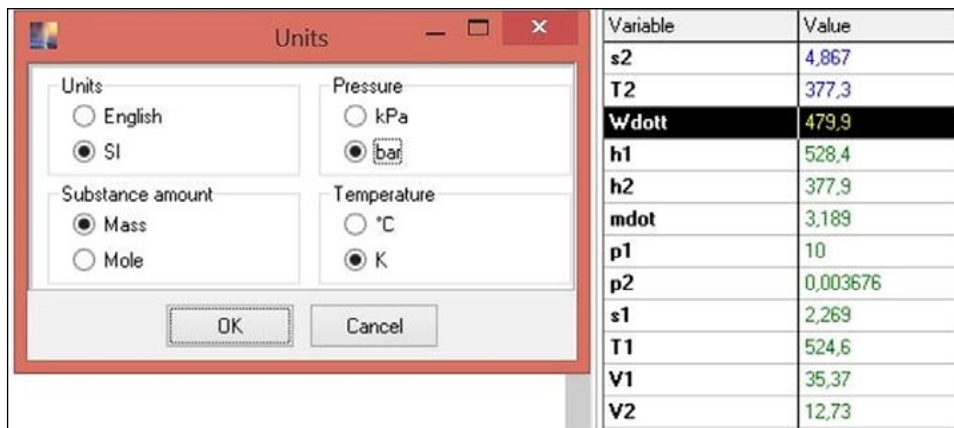
NOTA: “1” é referente à entrada e “2” à saída

FIGURA 16 – Panorama geral do simulador com os dados da turbina idealizada



FONTE: Os autores (2015)

FIGURA 17 – Unidades utilizadas no simulador



FONTE: Os autores (2015)

l) Programação utilizada no Interactive Thermodynamics:

```
// Given Data
//
h1=528.422
p1 = 10 // bar - pressão de entrada
T1=524.606
s1=2.26909
// Calculated Data
//
h2=377.901
mdot=3.1885 // Igual na entrada e saída
V1=35.3677
V2=12.7323
p2 = 0.003675739 // bar - pressão de saída

// Obtain Data
//
T2 = T_h("Air",h2)
s2 = s_hp("Air",h2,p2)

// Energy balance
//
0 = - Wdott + mdot * ((h1 - h2))
```

## CONCLUSÃO

É de nosso conhecimento que a tecnologia está sempre em constante transformação, adaptando-se à realidade e à necessidade do ser humano, que hoje em dia percebe a escassez dos recursos naturais que utiliza. Com isso em mente, muitos pesquisadores estudam maneiras alternativas de gerar energia elétrica com o intuito de denegrir menos o meio ambiente e até mesmo cessar essa degradação que hoje é um fato inerente. Estudos voltados para essa área certamente contribuem para que o meio científico possa atingir seu objetivo quanto à geração alternativa de energia elétrica.



## REFERÊNCIAS

- BORÉM, A. O maior desafio é a conservação da megadiversidade existente no território nacional. **Revista Biotecnologia, Ciência e desenvolvimento**, Minas Gerais, n. 34, v. 71-7, jun. 2005.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.
- CLAYTON, P. **Eletromagnetismo para engenheiros**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006.
- FUNDAMENTOS de termodinâmica: estudo dirigido, capítulo 22, 2000. Disponível em: <[http://www.fisica.ufmg.br/ftermodinamica/eds/ed01\\_r5.htm](http://www.fisica.ufmg.br/ftermodinamica/eds/ed01_r5.htm)>. Acesso em: 14 ago. 2015.
- JANNUZZI, G. de M. Planejando a crise de energia elétrica. **Newsletter AmbienteBrasil**, n.20, maio 2001. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/planejandoacrisedeenergia.htm>>. Acesso em: 12 nov. 2014.
- KUBO, R. **Thermodynamics: an advanced course**. Amsterdam: an advanced course, with problems and solutions. Amsterdam: North-Holland, 1968.
- MARTIN, I.; SALCDO, R.; FONT, R. **Mecânica de fluidos: Tema 1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles**. Alicante: Universitat d'Alicant, 2011. Disponível em: <[http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/1/tema1\\_Flujo%20interno.pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/1/tema1_Flujo%20interno.pdf)>. Acesso em: 14 ago. 2015.
- SEITO, A. I.; Silva, S. B. Extintor Portátil de Incêndio. **Boletim técnico**, v. 1, n. 1, set. 2005. Disponível em: <[www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/boletim/1-1.pdf](http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/boletim/1-1.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- SHAPIRO, H.; MORAN, M. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2009.
- TIPLER, P. A. **Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1990. v. 2A.
- WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. van; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4. ed. São Paulo: E. Blucher, 1995.

## ANEXO

TABELA DE GRANDEZAS

GRANDEZA	NOME	UNIDADE
$Q$	Quantidade de calor	Caloria (Cal) ou Joule (J)
$\Delta U$	Varição de energia	Joule (J)
$W$	Trabalho	Joule (J)
$\Delta S$	Varição de entropia	Joule por Kelvin (J/K)
$T$	Temperatura	Kelvin (K)
$\frac{dU}{dt}$	Taxa de variação da energia no volume de controle com o tempo	Joule por segundo (J/s)
$-\sigma W \dot{}$	Taxa de Trabalho/Potência	Joule (J)
$\sigma Q \dot{}$	Taxa de transferência de calor	Joule (J)
$h_e$	Entalpia de entrada	Quilo Joule por Quilograma (KJ/Kg)
$h_s$	Entalpia de saída	Quilo Joule por Quilograma (KJ/Kg)
$W_s$	Velocidade de saída	Metro por segundo (m/s)
$W_e$	Velocidade de entrada	Metro por segundo (m/s)
$g$	Gravidade	Metro por segundo ao quadrado (m/s <sup>2</sup> )
$Z$	Altura	Metro (m)
$\vec{E}$	Vetor Campo Elétrico	Newton por Coulomb (N/C)
$\Phi^j$	Força	Newton (N)
$\Psi^j$	Deslocamento	Metro (m)
$S$	Entropia	Joule por Kelvin (J/K)
$M \dot{}$	Fluxo de massa de entrada	Quilograma por segundo (Kg/s)
$M_s \dot{}$	Fluxo de massa de saída	Quilograma por segundo (Kg/s)
$\epsilon$	Força Eletromotriz (FEM)	Joule por Coulomb (J/C)
$\vec{B}$	Campo Magnético	Ampère por metro (A/m)

GRANDEZA	NOME	UNIDADE
$J_{dot}$	Fluxo de Difusão	Quilograma por metro quadrado segundo (Kg/m <sup>2</sup> s)
$M$	Massa	Quilograma (Kg)
$A$	Área	Metro quadrado (m <sup>2</sup> )
$D$	Constante de proporcionalidade	Metro quadrado por segundo (m <sup>2</sup> /s)
$J_x$	Fluxo de difusão (J) em determinado ponto x	Quilograma por metro quadrado segundo (Kg/m <sup>2</sup> s)
$r$	Frequência de pulos	Metros por segundo (m/s)
$A^*$	Átomos radioativos de A	-

