

Análise de desempenho de um protótipo de motor pneumático para aplicação em bancada didática

Performance analysis of a prototype pneumatic engine for application on didactic bench



Submetido em 17.08.16 | Aceito em 06.02.17 | Disponível on-line em 25.04.18

Camilo Gustavo Alves Correio*

Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis da Universidade Federal do Rio Grande do Norte | *camiloengmec@gmail.com

RESUMO

A evolução do conhecimento em fenômenos térmicos permitiu que cientistas criassem e aperfeiçoassem máquinas que possibilitaram transformar a energia calorífica em energia mecânica, essas máquinas foram chamadas de motores térmicos. O estopim da pesquisa sobre o assunto foi a criação da primeira máquina térmica com rendimento industrial, a máquina de James Watt, a qual deu início à revolução industrial em meados do século XVIII. Objetivou-se com este artigo fornecer ao leitor o desenvolvimento e a análise de um equipamento didático, denominado protótipo de motor pneumático, que simulou o funcionamento da máquina de Watt. Para que isto fosse possível, primeiramente foram fornecidas as definições, e os conceitos de motor watt, bem como de sistemas pneumáticos, visando maior entendimento sobre o funcionamento do equipamento, posteriormente foi detalhado cada componente do motor e suas características construtivas, a seguir, foi apresentada uma série de aferições com base em ensaios experimentais do protótipo, promovendo assim, a quantificação das variáveis do motor relacionadas ao seu rendimento, por fim, foi obtido o rendimento geral do motor, objeto de estudo, variando a pressão de trabalho. Embora demonstrativo e experimental, o motor é de excelente auxílio ao estudo da pneumática e da transmissão de movimento em motores, fornecendo uma eficiência de 2 à 5%.

Palavras-chaves: Motor Watt, Pneumático, Rendimento

ABSTRACT

The evolution of knowledge in thermal phenomena has allowed scientists to create and perfected machines that enabled, turn heat energy into mechanical energy, these machines are called heat engines. The outbreak of the research on this subject was the creation of the first heat engine with industrial performance, the James Watt's machine. This engine began the industrial revolution. The purpose of this article is to provide the reader with a thorough analysis of a prototype equipment performance, with thermodynamic principles similar to Watt's machine, called pneumatic engine prototype. To make this possible will first be provided the definition and concepts of the pneumatic and thermodynamic principles that embrace the operation of the equipment, after it will be detailed each component of the motor and its constructive characteristics, subsequently, a series of measurements based on the experimental prototype will be presented, promoting, therefore, the quantification of the motor variables related to your income, at last It will be found the general performance of this machine, considering variable the working pressure. Although experimental and demonstrative, the motor is an excellent way to pneumatic and transmission of movement in engines study, the motor provided a efficiency around of 2 to 5%.

Keywords: Motor Watt, Pneumatic, Efficiency

1.Introdução

Com o avanço das tecnologias, observa-se que a humanidade, a cada dia que se passa, compreende mais os fenômenos naturais que a cerca. O estudo destes fenômenos tem aguçado no

homem a sua intelectualidade, promovendo nele a motivação para encontrar as respostas para as dificuldades diárias.

Sempre foi de interesse entender como extrair e transformar a energia. Hoje, pode-se dizer que o avanço tecnológico está intimamente

relacionado a criação de dispositivos que possibilitem, não apenas a extração de energia, mas também máquinas que promovam a transformação desta energia em trabalho mecânico. Para isso ser possível é necessário entender todos os fenômenos relacionados ao processo de transformação.

De acordo Tipler & Mosca (2009), o enunciado da primeira lei da termodinâmica considera que a energia sempre é conservada, ou seja, a energia do universo não pode ser destruída, apenas transformada, mas para a sociedade, algumas formas de energia podem ser mais úteis do que outras, dependendo da aplicação.

É com base nesta questão de aplicabilidade da energia que James Watt, em 1765, cria o primeiro motor para meios industriais, o conhecido motor Watt. Entender seu funcionamento é de vital importância para acadêmicos que procuram compreender a área de motores. Este equipamento foi o precursor de uma série de outras máquinas, que possibilitaram ao homem aprofundar seus conhecimentos tecnológicos na transformação de energia térmica. Sua criação foi tão significativa que marcou o início de uma nova era, a chamada revolução industrial (MORAES & ABREU, 2006).

Devido a necessidade de entender o funcionamento deste equipamento surge uma problemática conveniente: como tornar o motor térmico de Watt um equipamento didático?

Este artigo objetivou solucionar esta questão desenvolvendo um equipamento didático, denominado de protótipo de motor pneumático, e analisando sua eficiência.

Para que isso fosse possível, foi necessário passar por algumas etapas, primeiramente foi preciso entender alguns princípios do equipamento. Procurou-se apresentar, brevemente, a teoria acerca do funcionamento de um motor watt, bem como os princípios pneumáticos específicos para protótipo desenvolvido por este artigo. Isso se tornou necessário para que ficasse clara a possibilidade de desenvolver um motor watt utilizando um sistema pneumático.

Considerando a análise, viu-se a extrema necessidade de apresentar as equações para

realizar os cálculos de rendimento do protótipo, desta forma elas foram mostradas em ordem ao longo do artigo.

Continuando, no propósito de fornecer melhor embasamento para o leitor entender o funcionamento e análise do motor, foram mostradas as suas características construtivas e a função de cada elemento específico para o funcionamento do sistema, finalizando com o projeto do mesmo em 2D (vista superior).

Por fim, foi apresentada a metodologia de análise deste motor, considerando todas as variáveis de acionamento sobre regime contínuo. Foram colhidos os dados em forma de tabelas e discutidos todos os resultados obtidos, tendo em mente todos os princípios que foram apresentados, com isso foi possível concluir e justificar de modo realístico o funcionamento do sistema.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Motor de James Watt

O motor de Watt, como já foi mencionado, era uma máquina térmica que produzia trabalho mecânico a partir do aquecimento da água, em que o vapor produzido (que era proveniente do aquecimento da água) fornecia a movimentação de um pistão, através do aumento de pressão dentro de um cilindro.

Este vapor é denominado de fluido de trabalho. Quando se analisa o trabalho realizado por um fluido, Young & Freedman (2009) considera que as variações de estado, ou seja, a passagem de um estado inicial para um final, gera uma série de estados termodinâmicos intermediários do fluido, estes quando unidos caracterizam um caminho, que é considerado por Moran & Shapiro (2011) como sendo um processo termodinâmico.

Um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que começa e termina no mesmo estado. No final do ciclo todas as propriedades têm os mesmos valores que possuíam no início. Consequentemente, terminado o ciclo, o sistema não experimenta nenhuma variação líquida de estado (MORAN & SHAPIRO, 2011).

Existem diversos tipos de ciclos termodinâmicos, historicamente, tem-se que na medida em que foram sendo descobertos e estudados, foi-se dando aplicações reais (práticas) a estes ciclos. Especificamente neste trabalho, foi construído e analisado um equipamento pneumático que simulou o ciclo termodinâmico gerado por um motor de Watt.

Para construí-lo foi necessário entender como funcionava este motor. Foi observado que a máquina térmica de watt utilizava vapor de água como fluido de trabalho, obedecendo a um ciclo termodinâmico, o ciclo Watt. Sabe-se que teoricamente este ciclo é muito semelhante ao ciclo de Carnot que considera transformações (mudanças de fase) dos gases perfeitos (o que o torna um ciclo ideal e não real). O ciclo é composto de duas transformações isométricas e duas transformações isobáricas, em que há rejeição e admissão de calor para produção de trabalho mecânico. O rendimento termodinâmico deste motor dependia das variáveis do processo cíclico.

Para a situação específica do protótipo deste artigo, o fluido de trabalho não foi a água em forma de vapor (comum para o ciclo de watt), mas o ar comprimido, o qual não sofreu transformações ao longo do funcionamento do protótipo, ou seja, o ar comprimido proveniente do compressor forneceu a pressão necessária sem necessitar de mudança de fase. Devido a isto, não foi considerado o rendimento termodinâmico para a análise da sua eficiência.

Além disso, quando se analisa um fluido de trabalho em estado gasoso, algumas ponderações devem ser feitas. A primeira delas é que o fluido é um contínuo para a aplicação a que se destina (protótipo de motor pneumático), suas propriedades não variam ponto a ponto ao longo do volume de controle. Além disso, pelas características do regime de trabalho do fluido também foi possível considerá-lo como compressível. Em relação ao seu regime de escoamento, considerou-se que o fluido (por não variar suas propriedades ao longo do tempo) escoava em regime permanente. Sendo assim a vazão em massa para dentro do volume de controle deve ser igual à vazão mássica para fora deste volume. Esta

observação será importante posteriormente na análise do rendimento volumétrico do equipamento (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

Pode-se resumir o funcionamento do protótipo da seguinte forma: um compressor fornece ar quente adiabático que é em seguida ainda aquecido isobaricamente absorvendo o calor Q_+ . Depois disso, o gás arrefece por expansão adiabática na qual o cilindro de trabalho empurra para um permutador de calor, onde o calor desprende Q_- isobaricamente. Na sua alternância entre adiabática e isobárica as etapas do processo são muito parecidas com o processo da máquina à vapor, mas as isobáricas não são semelhantes às isotérmicas, pois não há mudança de fase (VIEIRA, 2014).

Desta forma, ficou evidente como funciona (termodinamicamente) um motor watt e como o protótipo apresentado por este trabalho fez para simular este motor. Sendo assim, próxima etapa consiste em entender como funciona o sistema pneumático fisicamente.

2.2 *Pneumática*

O sistema pneumático utilizado como alimentador do protótipo de motor Watt possuía características simples, devido às pequenas dimensões do projeto e sua aplicabilidade (projeto com fins didáticos).

Segundo Nazário & Quadros (2013) a análise de sistemas pneumáticos tem por base dois domínios tecnológicos. O primeiro deles é relacionado ao condicionamento e distribuição do ar comprimido, compreendendo o estudo de processos de compressão, filtragem e secagem. O segundo domínio trabalha com os elementos que são alimentados pela fonte de ar comprimido, na qual estão os circuitos pneumáticos.

Com relação ao primeiro princípio o equipamento possuía um sistema específico, que por ser de pequeno porte promovia filtragem, secagem, controle (manômetro e rotâmetro) e instrumentação (válvula de fluxo) integrados ao processo de compressão.

O compressor que foi utilizado para análise do equipamento era de pistão alternativo

com pistão simples. Seu funcionamento era caracterizado através da utilização de um cilindro que comprimia o ar aspirado por uma válvula de entrada. O ar era então transportado para uma válvula de saída.

Para adaptar a quantidade produzida do compressor à demanda oscilante, era necessário regular o compressor. A quantidade produzida era regulada entre os limites ajustáveis para a pressão máxima e mínima. O tipo de regulagem utilizada no protótipo foi à regulagem livre através de desligamento.

A válvula de pressão associada ao reservatório do sistema possuía um pressostato, o qual funcionava da seguinte forma: quando o valor de pressão chegava a um valor máximo o motor desligava e a pressão dentro do reservatório era considerada constante até que, devido a uma utilização, um valor mínimo fosse atingido pelo sistema controlador de pressão, que dava a partida no equipamento para fornecer ao sistema aumento de pressão até o valor máximo novamente.

De acordo com Fontes (2014) como o compressor funciona dentro de um regime de duas pressões, sendo uma inicial e outra final para um determinado ensaio, é possível obter a vazão deste equipamento utilizando as equações dos gases ideais e a relação de massa específica. Utilizando estas equações obteve-se, a partir de uma dedução específica, a equação de vazão volumétrica do compressor como é apresentada abaixo.

$$Q_{v,comp} = \frac{(P_{f,comp} - P_{i,comp}) \cdot V_{res}}{P_a \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Em que $Q_{v,comp}$ era a vazão volumétrica do compressor, $P_{f,comp}$ era a pressão final, $P_{i,comp}$ era a pressão inicial, V_{res} era o volume do reservatório, Δt era o tempo em que houve o diferencial de pressão e P_a era a pressão atmosférica.

Após analisar o processo de condicionamento do ar, ou seja, o primeiro domínio da análise dos sistemas pneumáticos, resta ponderar sobre o segundo domínio, para tanto este foi dividido em dois conjuntos, válvula

de acionamento e atuador de movimentação linear.

Uma válvula de acionamento tem características específicas de funcionamento, são elas: posição inicial, número de posições, número de vias, tipo de acionamento (comando), tipo de retorno e vazão. Dentre as características apresentadas a válvula do motor protótipo tinha 2 posições, 3 vias, com acionamento em partida manual e mecânico através de uma manivela para trocar a alimentação dos pistões.

O atuador linear é caracterizado pela parte do sistema responsável pela transformação da pressão do gás em movimento, ou seja, trabalho mecânico. No protótipo de motor pneumático foi representado pela figura do cilindro êmbolo do motor.

A força que foi realizada por este equipamento pôde ser equacionada a partir de suas especificações construtivas. Tendo o diâmetro do êmbolo e a pressão de trabalho do sistema foi possível obter a força aplicada pela haste (ligada ao eixo virabrequim) através da seguinte equação.

$$F_{haste} = P_{trabalho} \cdot A_{cilindro} \quad (2)$$

Onde F_{haste} era a força da haste, $P_{trabalho}$ era a pressão de trabalho fornecida pelo compressor e $A_{cilindro}$ era a área do cilindro.

A partir deste mesmo componente também foi possível obter a vazão do sistema (ou do projeto) através da seguinte equação.

$$Q_{v,projeto} = \frac{V \cdot \emptyset^2 \cdot \omega}{4} \cdot 2 \quad (3)$$

Onde $Q_{v,projeto}$ era vazão volumétrica de projeto (ideal), \emptyset era o diâmetro interno do cilindro, V era o comprimento do cilindro e ω era a rotação em RPS, o coeficiente 4 vem da equação de obtenção do volume do cilindro e o coeficiente 2 da quantidade de cilindros do equipamento (protótipo de motor pneumático).

Após encontrar a vazão do cilindro foi possível obter também a potência pneumática. Assim como é apresentada na equação a seguir.

$$P_{\text{pot}} = P_{\text{pot}} \cdot P_{\text{pot}} \quad (4)$$

Onde, P_{pot} era a potência pneumática do sistema, P_{pot} era a vazão específica do cilindro e P_{pot} era a pressão de trabalho do sistema.

2.3 Rendimentos

Toda vez que um máquina realiza um trabalho, parte de sua energia total é dissipada, seja por motivos de falhas na calibração do sistema ou até mesmo devido ao atrito. Pela lei de Conservação da Energia (Lei de Lavousier), essa energia não consumida pelos equipamentos não é destruída, mas sim transformada em outro tipo de energia na natureza, seja ela térmica, sonora, etc. Considera-se a seguinte relação para calcular o rendimento.

$$\eta = \frac{P_{\text{pot}}}{P_{\text{pot}}} \quad (5)$$

Onde η é o rendimento que está sendo analisado. Esta potência representa respectivamente o que é entregue ao motor e o que o motor utiliza, não necessariamente precisa ser a grandeza em forma de potência, ela pode ser vazão ou até mesmo trabalho efetivo.

De acordo com Fontes (2014) o rendimento global da máquina pneumática será obtido através da análise da associação entre os diversos sistemas da máquina. Para o protótipo analisado neste artigo considerou-se os rendimentos térmico, global, volumétrico e mecânico. O equacionamento que foi obtido para o rendimento total do sistema encontra-se a seguir.

$$\eta_{\text{pot}} = \eta_{\text{pot}} \cdot \eta_{\text{pot}} \cdot \eta_{\text{pot}} \quad (6)$$

O rendimento global foi calculado considerando a energia que foi recebida e a energia que foi transmitida pelo sistema (assim como qualquer cálculo de rendimento). O

rendimento do motor pneumático foi baseado na entrada de potência pneumática realizada sobre o sistema e no trabalho efetivo de eixo que foi oferecido pelo sistema sobre o virabrequim. Desta forma, foi obtida a seguinte expressão:

$$\eta_{\text{pot}} = \frac{P_{\text{pot}}}{P_{\text{pot}}} \quad (7)$$

Onde η_{pot} era o rendimento global do sistema, P_{pot} era a potência pneumática realizada sobre o sistema e P_{pot} era a potência efetiva realizada sobre o eixo medido através do torque no rotor.

Considerando o ciclo Watt como uma aproximação do ciclo de Carnot, seu rendimento é caracterizado pelo quociente entre as suas fontes de calor. Como o equipamento que foi analisado neste trabalho era uma máquina fria (pois não possuía diferencial de temperatura quando relacionado o sistema com a sua vizinhança) o valor do rendimento térmico foi considerado igual a 1.

O rendimento volumétrico está associado à vazão de projeto. Este rendimento foi obtido através da vazão fornecida pelo atuador linear, onde estava à saída do fluido de trabalho, e a vazão do compressor que era a vazão de entrada do sistema. Em termos de equação, considerou-se que:

$$\eta_{\text{pot}} = \frac{V_{\text{pot}}}{V_{\text{pot}}} \quad (8)$$

Sendo que η_{pot} era rendimento volumétrico, V_{pot} era vazão do cilindro e V_{pot} era vazão do compressor.

O rendimento mecânico foi obtido levando em consideração o funcionamento do sistema do motor. Este parâmetro foi definido a partir das aferições do funcionamento do protótipo, sendo assim, este rendimento era o rendimento real da potência, também conhecido como rendimento geral, fornecido pelo sistema para a potência que foi utilizada.

A equação para obter o valor de rendimento mecânico ficou em função das equações dos rendimentos apresentados anteriormente. Segue abaixo a fórmula para o rendimento mecânico.

$$\eta_{\text{mec}} = \frac{\eta_{\text{comp}}}{\eta_{\text{exp}} + \eta_{\text{comp}}} \quad (9)$$

3. Partes Construtivas do Protótipo

3.1 Válvula de Acionamento

Este componente teve funcionamento crítico no sistema, sua função era direcionar o fluxo de ar comprimido diretamente para o cilindro que estava sendo movimentado.

Esta possuía 2 posições e 3 vias, duas vias direcionadas para o acionamento do cilindro, uma via direcionada para a admissão de ar comprimido do compressor. Seu acionamento era mecânico. No equipamento existia uma haste ligada à base do cilindro do motor que ia diretamente para a válvula onde cada ciclo do motor permitia a comutação do direcionamento do ar comprimido fornecido pelo compressor. Sem este dispositivo seria impossível haver a alternância entre os estágios do cilindro (admissão e escape).

Este equipamento foi construído através da utilização de duas hastes parafusadas em junção. Uma das hastes tinha a função de comutar o direcionamento do ar comprimido entre os dois cilindros, e funcionava com um embolo em sua ponta, feito de borracha. A segunda haste deste sistema estava conectada a uma peça em ãLõ que era acionada por outra haste longa conectada ao eixo virabrequim.

3.2 Cilindros

Este dispositivo era imprescindível na hora de transformar a energia de pressão do ar comprimido no trabalho mecânico no eixo. Quando a válvula abria um dos cilindros entrava no estágio de admissão, o ar comprimido entrava na câmara e empurrava o pistão para fora, que por sua vez transmitia essa energia a biela, para girar o eixo virabrequim.

Os cilindros possuíam (cada um) apenas dois estágios, o de admissão (quando a válvula permitia entrada de ar comprimido no sistema e enchia a câmara do cilindro) e o de escape (quando o sistema chegava ao fim de curso e a válvula era acionada pela haste). A válvula comutava a alimentação de um cilindro para o outro, fazendo com que o cilindro que estava em admissão não fosse mais alimentado, mas fosse forçado a empurrar o ar para fora através do giro do virabrequim. Este transmitia a pressão para a biela e assim esvaziava a câmara no escape.

Este componente era feito por um cilindro de alumínio (camisa externa), que possuía dois lados acoplados a sistemas distintos. Um dos lados era furado para permitir engate da válvula e do sistema de comutação. Na outra extremidade do cilindro existia uma peça de Technyl parafusada para servir de guia para uma haste central de aço (pistão). Essa haste tinha em uma de suas extremidades (a que se localizava dentro do cilindro) uma peça diafragma também feita de Technyl. Na outra ponta da haste havia parafusos que eram rosqueados em arrebites modificados para permitir sua fixação na biela.

A câmara era dividida em duas regiões: compressão e escape. A peça diafragma que dividia estas regiões estava vedada com um Oring de borracha acoplado em seu corpo, sua função era permitir o escape do ar comprimido apenas em um sentido de movimentação.

O protótipo também possuía um sistema de realimentação de ar na região de escape. Este mecanismo de realimentação era feito com um tubo que ligava dois furos feitos nas regiões posteriores dos dois cilindros. A alternância do ar nestas regiões proporcionava ao motor uma realimentação em sentido oposto ao de aplicação de força no embolo. O Objetivo era melhorar o deslocamento do êmbolo na camisa no sentido de retorno do mesmo. Para melhor entendimento observe a figura 1.

3.3 Biela

Cada cilindro possuía a sua biela específica que era o elemento que fazia a interligação entre o eixo virabrequim e o cilindro. Sua característica construtiva permitia a sua rotação relativa com o eixo virabrequim (a partir da utilização de um rolamento) e também com o pino de associação do pistão (utilização de outro rolamento).

Esta peça foi feita a partir de peças de alumínio furadas em suas extremidades, onde foram inseridos os rolamentos de aço para permitir a rotação relativa dos elementos a ele ligados.

3.4 Eixo Virabrequim

Foi feito a partir da associação de um varão de parafuso de 4 mm de aço, juntamente com arruelas de pressão e placas de aço, este eixo possuía a finalidade de transmitir a translação vinda das bielas em forma de rotação para um volante que se encontrava em sua extremidade.

Seu caráter construtivo com base em dobras em formato de ão permitia a alternância entre os ciclos de admissão e escape dos cilindros, também era um elemento fundamental para aplicação da pressão ao ar comprimido dentro do cilindro promovendo o escape do mesmo.

Era justamente esta alternância de ciclos entre os dois cilindros que provocava no virabrequim a rotação necessária para transmissão do trabalho mecânico.

3.5 Suporte

Era considerado o componente de estabilidade, sua função é integrar todos os componentes do motor minimizando o máximo possível a vibração, mantendo a funcionalidade dos componentes do sistema quanto a sua rotação e translação.

Consistia em uma base de madeira que possuía duas estruturas feitas com placas de aço, uma em cada extremidade. No lado da transmissão tinha-se duas placas de aço com rolamentos soldados na ponta para segurar o eixo virabrequim mantendo a sua rotação. No lado da

base existia uma placa única de aço que segurava a base dos cilindros completando a sustentação do equipamento.

3.6 Volante

O volante do motor era a peça em forma de disco ligada em uma das extremidades do virabrequim ou árvore de manivelas. Ela servia de peso ou massa para o eixo virabrequim nos intervalos das explosões dos cilindros, desta forma mantinha o eixo balanceado na incidência e ausência de energia cinética.

Para efeito de análise das variáveis do sistema esse volante tinha uma película monocromática e um adesivo reflexivo na sua região frontal, para que dessa forma um tacômetro de medição de velocidade pudesse ser utilizado para aferição desta variável de processo.

Importante ressaltar que na ponta do volante existia uma haste que era ligada ao eixo de rotação do motor. Sua função era de promover um torque de rotação para análise do motor. Esta haste possibilitava, através de um mecanismo composto de parafuso com mola e porca (freio), modificação na carga. Com o aperto deste sistema o volante passava a travar na haste dificultando a rotação relativa. O percentual de carga pôde ser obtido através da equação 10, levando em consideração um percentual de carga característico onde se sabe que era o percentual zero.

$$\% \text{Carga} = 100 \frac{P_{\text{aplicada}} - P_{\text{zero}}}{P_{\text{referencia}} - P_{\text{zero}}} \quad (10)$$

Onde, %Carga era o percentual de carga aplicada, P_{aplicada} era a potencia de referencia a qual se deseja encontra o percentual e P_{zero} era a potência obtida considerando o percentual de carga zero.

Através da equação abaixo era obtido o torque do rotor.

$$\tau_{\text{rotor}} = \tau_{\text{referencia}} \frac{P_{\text{aplicada}}}{P_{\text{referencia}}} \quad (11)$$

Onde, T_{rotor} era o torque do rotor, F_{haste} era a força aplicada pela haste que foi medida e L_{haste} era o comprimento da haste, comumente chamado de braço de alavanca. Estes valores foram extremamente importantes para a análise do processo. Como era uma variável a parte, a força do rotor foi calculada por meio de outra equação, como pode ser observado a seguir.

$$T_{rotor} = F_{haste} \cdot L_{haste} \cdot g \quad (12)$$

Em que: F_{haste} era a força aplicada pelo rotor, m era a massa a qual era aplicada através da haste (mais na frente será apresentado como foi aferida essa variável) e g era a gravidade (que foi fixada neste presente trabalho como sendo $9,81 \text{ m/s}^2$).

Tendo estas variáveis em mãos, o trabalho efetivo do eixo virabrequim pôde ser encontrado facilmente através da fórmula a baixo.

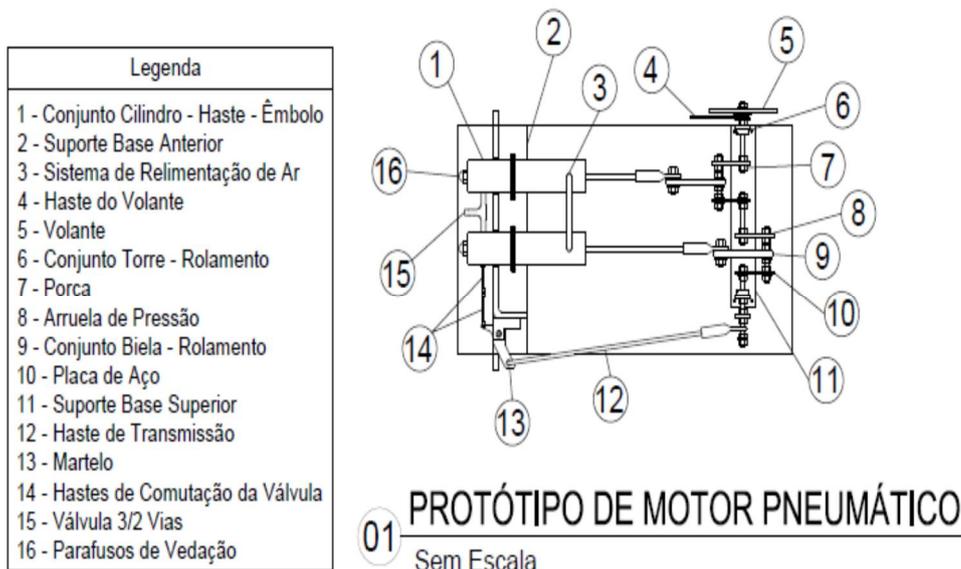
$$P_{efetiva} = T_{rotor} \cdot \omega \quad (13)$$

Em que: $P_{efetiva}$ era a potência efetiva, T_{rotor} era o torque do rotor e ω era a velocidade angular observada no volante.

3.7 Vistas do Projeto do Protótipo de Motor Pneumático

Para melhor visualização do conteúdo exposto anteriormente, a seguir têm-se a vista superior sem escala do protótipo de motor pneumático com suas partes construtivas.

Figura 1. Desenho Esquemático do Protótipo de Motor Pneumático e Legenda



Fonte: Elaborado pelo Autor

4. Metodologia dos Ensaios

A proposta deste trabalho era obter o rendimento mecânico do protótipo de motor pneumático construído. Para isso foi considerada a aferição das seguintes variáveis: pressão inicial e final, rotação do eixo virabrequim, tempo para alcance da pressão desejada no compressor e torque aplicado pela haste do volante.

A metodologia para obtenção dos dados necessários foi relativamente simples e rápida, em termos de materiais, para funcionar o equipamento, foi utilizado um compressor Motormil® interligado ao motor através de mangueiras.

Para medições foram utilizados os seguintes equipamentos um tacômetro digital, uma balança digital, um cronômetro digital, um paquímetro digital e uma régua.

Inicialmente foram verificados dados construtivos do motor (com o auxílio de régua e paquímetro) como curso e diâmetro do cilindro, para conhecer qual a vazão do sistema, o comprimento da haste do volante para obter o torque aplicado e após isso foi verificado o volume do reservatório.

Com as devidas informações obtidas foi ligado o compressor para que o mesmo chegasse às condições de pressão inicial, admitida como ideal para o experimento, e logo foi liberado o fluxo de ar dentro da mangueira que rapidamente entrou nos cilindros e passou a funcionar o motor, com o cronômetro foi verificado o tempo necessário para chegar a pressão final no ensaio.

Com auxílio da balança verificou-se a massa aplicada pela haste rotacionada pelo eixo virabrequim. Utilizando um medidor de rotações digital (tacômetro) foi obtido às rotações por unidade de tempo deste motor e por fim o tempo inicial e final do experimento foi cronometrado.

Para análise do protótipo de motor pneumático o procedimento foi realizado com três levantamentos de dados, com pressão de trabalho de 1; 1,5 e 2 bar. Com percentual de carga constante em 0%. A critério de organização todas as unidades utilizadas nas aferições foram com base no sistema internacional de unidades SI.

5. Resultados e Discussão

Para a análise em questão todas as variáveis aferidas foram no sistema internacional de unidades, ou foram transformadas para este sistema. Os valores finais utilizados foram obrigatoriamente no sistema internacional.

A tabela 1 considerou os valores construtivos dos cilindros e suas dimensões físicas, elas estão apresentadas como segue.

Tabela 1. Variáveis Dimensionais do Motor Pneumático

Variável	Valor
\emptyset	0,025 m
h	0,04 m
L	0,09 m
V	0,024 m ³

Fonte: Elaborado Pelo Autor

Como já foi abordado os ensaios consideraram a variação da pressão de trabalho no equipamento, mantendo o percentual de carga aplicada no volante constante e nulo. Neste caso têm-se 2 objetivos. O primeiro foi analisar a resposta dada pelo motor através dos rendimentos calculados e o segundo foi obter pontos para produzir dois gráficos de dispersão da potência pela rotação e do torque pela rotação.

Os dados do ensaio foram relacionados na tabela 2, são eles: rotações, tempo para atingir as pressões específicas, pressões iniciais e finais e massa proporcionada pela movimentação da haste.

Com base nas equações apresentadas anteriormente foi possível obter a tabela 3 que trouxe os seguintes valores respectivamente: vazão volumétrica do compressor, vazão de projeto, potência pneumática, força do rotor, torque do rotor e trabalho efetivo. Foi considerado a constante gravitacional, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela 2. Variáveis Obtidas de Observações Experimentais para Primeira Situação

Variável	Pressão de Trabalho 1 bar	Pressão de Trabalho 1,5 bar	Pressão de Trabalho 2 bar
\dot{V} (RPS)	10,83	11,67	11,83
$\dot{V}_{\text{teórico}} / \dot{V}_{\text{real}} (\%)$	35	35	35
$\dot{V}_t / \dot{V}_r (\%)$	6 / 2,5	6 / 2	7 / 2,2
η (%)	0,034	0,036	0,037

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 3. Variáveis de Operação Obtidas das Equações 12 a 18 para Primeira Situação

Variável	Pressão de Trabalho 1 bar	Pressão de Trabalho 1,5 bar	Pressão de Trabalho 2 bar
$\dot{V}_{\text{teórico}}$ (m ³ /s)	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,74 \cdot 10^{-3}$	$3,29 \cdot 10^{-3}$
\dot{V}_{real} (m ³ /s)	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$4,64 \cdot 10^{-3}$
$\dot{W}_{\text{potencial}} \text{ (w)}$	240	411	658
F_{atrito} (N)	0,333	0,353	0,362
τ_{atrito} (N.m)	0,03	0,0317	0,0326
\dot{W}_{atrito} (w)	2,042	2,33	2,43

Fonte: Elaborado pelo Autor

À medida que a pressão de trabalho aumentava o compressor fornecia uma vazão maior, conseqüentemente, o equipamento seguia a proporcionalidade em todas as outras variáveis de processo. Como o equipamento estava sendo colocado em um regime de insumo cada vez maior quantitativamente, suas respostas ao meio externo eram maiores. Com estes valores em mãos calculou-se os rendimentos volumétrico, global e térmico. Na tabela 4 foram apresentados estão os rendimentos.

Interessante ressaltar que à medida que a pressão de trabalho aumentava o rendimento global diminuía, isso ocorria, pois, a variação de potência pneumática fornecida pelo compressor era mais efetiva do que o trabalho proporcionado pelo equipamento.

Haja vista que no meio do processo existiam muitas perdas, as hipóteses relacionadas à razão dessas perdas são: desalinhamento de

eixo, atrito desnecessário nos rolamentos (vinculado a falta de lubrificação), condições de perda com deslizamento da haste no volante ou qualquer outro movimento de perda com atrito entre os outros componentes da linha de ação que proporcionava a movimentação do eixo virabrequim.

Também observou-se que o rendimento volumétrico diminuía. O que acontecia era que o equipamento não oferecia uma resposta tão boa quanto o que era fornecida para ele, ou seja, a variação da vazão de ar do compressor era mais efetiva com o aumento da pressão de trabalho do que a vazão de projeto proporcionada pelos cilindros.

A hipótese que foi levantada para justificar isto era relacionada à perda de ar quando se considerava a vedação do sistema. Neste caso, o desperdício de ar, proporcionado pela falta de vedação eficaz dentro do cilindro, gerava uma

massa específica de ar que não produzia deslocamento do eixo, e, portanto, diminuía o valor ideal de rotação.

Com os valores de rendimento volumétrico e global obtidos chegou-se ao final

das observações do protótipo com o valor do rendimento mecânico motor, calculado com base na equação e condições propostas.

Tabela 4. Variáveis de Rendimentos Obtidas das Equações 21 e 23 para Primeira Situação

Variável	Pressão de Trabalho 1 bar	Pressão de Trabalho de 1,5 bar	Pressão de trabalho de 2 bar
η_{vol}	1	1	1
η_{mech}	0,85%	0,56%	0,36%
η_{glob}	17%	16%	14%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 5. Rendimento Motor do Protótipo de Motor Pneumático para Primeira Situação

Variável	Pressão de Trabalho 1 bar	Pressão de Trabalho 1,5 bar	Pressão de Trabalho 2 bar
η_{mech}	5%	3,5%	2,6%

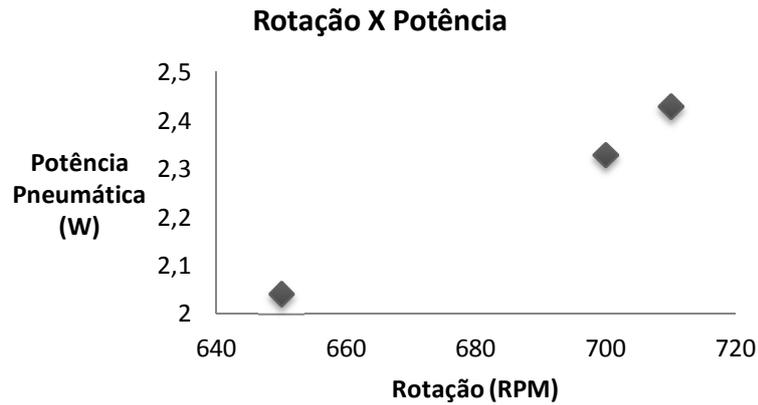
Fonte: Elaborado pelo Autor

Neste caso, assim como foi observado nos rendimentos dados anteriormente, o valor do rendimento mecânico também diminuiu com o acréscimo da pressão de trabalho. Isso ocorreu, pois quanto mais severo o regime de funcionamento do motor se tornava, maiores foram as perdas do equipamento para o ambiente.

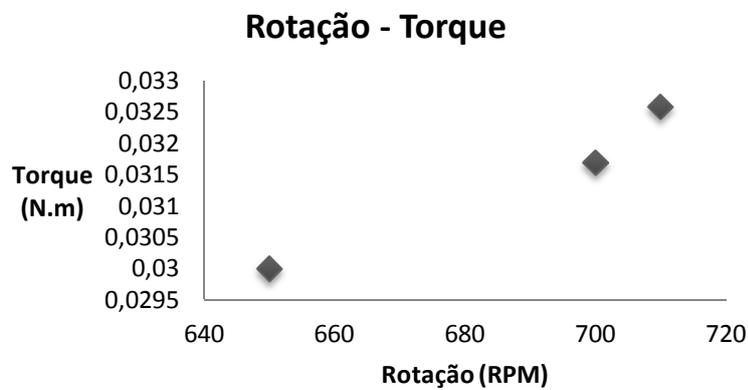
A possível justificativa encontrada para este rendimento ser pequeno estava na porcentagem de carga que foi acionada. Quanto menor foi a carga acionada por este motor, menor foi seu trabalho efetivo aplicado pelo eixo, e

consequentemente, menor foi o valor do seu rendimento global. Como a potência pneumática era muito alta, a forma mais apropriada de fazer esse motor fornecer um rendimento melhor seria aumentar o percentual de carga aplicada (que iria elevar a potência efetiva).

Nas figuras a seguir têm-se a ilustração dos pontos que foram observados considerando no primeiro a potência pneumática (Watts) e as rotações (RPM), e no segundo o torque aplicado pelo equipamento (N.m) pela rotação (RPM).

Figura 2. Gráfico de Dispersão dos Valores Experimentais Rotação pela Potência Pneumática

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 3. Gráfico de Dispersão dos Valores Experimentais Rotação pelo Torque Aplicado

Fonte: Elaborado Pelo Autor

6. Conclusões

Este estudo forneceu completo comprimento com os objetivos propostos pelo trabalho e solucionou a problemática descrita anteriormente. Através deste foi possível desenvolver e analisar um equipamento capaz de facilitar o entendimento do funcionamento do

motor de ciclo Watt, apresentando o rendimento de motor por meio de equações específicas.

Em outras palavras este artigo fornece três grandes contribuições para o ambiente acadêmico: permitiu compreender o funcionamento de um motor, tomando por base a característica específica de transformação da energia pneumática em movimento de eixo;

permitiu analisar as variáveis de processo relacionadas a esta transformação; e permitiu avaliar a interação destas variáveis com os rendimentos volumétrico, global e mecânico motor.

Ao longo dos ensaios foi verificado uma resposta muito peculiar no rendimento mecânico do motor. Quando foram variadas as pressões de trabalho, com carga zero, o rendimento à pressões crescentes variou de 5% a 2%. Como foi discutido, isso foi observado, pois quanto maior a pressão de trabalho, as características das perdas do sistema forneceram uma variação mais significativa do que o ganho, provocando decréscimo em todos os rendimentos. Porém é importante ressaltar que o rendimento global decresceu mais significativamente que o rendimento volumétrico.

Para que o equipamento fosse mais eficiente, seriam necessárias algumas modificações construtivas. Uma delas seria a mudança do eixo virabrequim, em que o ideal seria fazer uma peça única evitando todo tipo de desalinhamento.

Seria pertinente uma alteração dos rolamentos da base, procurando substituí-los por outros que possuam classe de ajuste interferente ou incerto quando relacionado ao eixo virabrequim, não permitindo movimentos relativos para que a rotação seja otimizada.

Outra modificação seria a utilização de uma melhor vedação na válvula de comutação do cilindro e um sistema diafragma que permita um vazamento mais eficaz, principalmente em grandes pressões de trabalho.

Para todos os efeitos o equipamento atingiu com excelência o objetivo esperado de fornecer uma análise, uma avaliação e a compreensão do processo de transformação de energia pneumática em energia mecânica de eixo, disponibilizando para o ambiente acadêmico um novo equipamento que vai elucidar satisfatoriamente todos que precisam entender mais sobre o motor Watt e sistemas de transmissão em motores.

7. Referências bibliográficas

- EBEL, F; CROSER, P. **Apostila pneumática: nível básico**. São Paulo: FESTO, 2002. 35 p.
- FONTES, F. A. O. **Capítulo 1: Introdução aos motores de combustão interna**. Rio Grande do Norte: UFRN, 2014;
- FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2010. 710 p
- MORAES, C; ABREU, C. M. **A história das máquinas: ABIMAQ 70 anos**. 1 ed. São Paulo: Magma, 2006.
- MORAN, M. J; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- NAZARIO, C. Z; QUADROS, M. L. **Apostila Desenvolvimento de sistemas de controle: série automação industrial**. Rio Grande do Sul: SENAI, 2013. 144 p.
- SOUSA, Z. **Elementos de máquinas térmicas**. 3 ed. Rio de Janeiro: EFEI, 1980.
- TIPLER, P; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros: mecânica, oscilações e termodinâmicas**. Vol 1. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- VAN WYLEN, G. J; SONNTAG, R. E; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4 ed. São Paulo: E. Blucher, 2008.
- VIEIRA, A. N. **Apostila motores térmicos**. Rio Grande do Norte: UFRN, 2014. 59 p.
- YOUNG, H. D; FREEDMAN, R. A. **Física II: termodinâmica e ondas**. Vol 2. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.