

ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA ENTRE MÉTODOS SISTEMÁTICOS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE CIRCUITOS PNEUMÁTICOS

Tales Allan Menegaz de Faveri
Richard de Medeiros Castro
Elvys Mercado Curi

Faculdade SATC

RESUMO

O ar comprimido é uma das principais fontes energéticas utilizadas para o acionamento de circuitos pneumáticos nos diversos setores da cadeia produtiva, sendo fundamental realizar um estudo sobre a eficiência dos circuitos que utilizam essa fonte de energia. Este trabalho tem por objetivo fazer um comparativo teórico e experimental da eficiência relativa sobre o consumo de ar comprimido entre os métodos sistemáticos empregados na construção de circuitos pneumáticos: analítico e minimização dos contatos. Para tanto, foi desenvolvido um circuito com auxílio do software Fluidsim 4.2 Demo, e posteriormente montado em bancada de teste. Na sequência, foi feita a coleta de dados com auxílio de uma placa de aquisição e pelo software LabView, medindo-se as grandezas, tais como, vazão volumétrica, posição, pressão e temperatura. Os testes foram desenvolvidos em diferentes níveis de pressões (5bar, 6bar e 7bar). Além disso, utilizou-se o software MATLAB para tratamento dos dados, aplicando-se os conceitos da transformada de Fourier para redução dos ruídos e, na sequência, Excel para a construção dos gráficos e interpretação dos resultados. Ao final, verificou-se por meio do experimental que o método analítico se mostrou levemente mais eficiente em 6,48% para 5 bar, 7,35% para 6 bar e 9,25% para 7 bar. Os resultados apresentados pelo modelo matemático empregado obtiveram-se uma variação máxima de 12% se comparado ao experimental.

Palavras-chave: Eficiência; Circuito Pneumático; Método Construtivo; Analítico; Minimização dos Contatos; Modelo Matemático.

ABSTRACT

Compressed air is one of the main energy sources used to drive pneumatic circuits in various sectors of the production chain, and it is fundamental to carry out a study on the efficiency of the circuits that use this source of energy. The objective of this work is to make a theoretical and

experimental comparison of the relative efficiency of compressed air consumption among the systematic methods used in the construction of pneumatic circuits: analytical and contact minimization. For this purpose, a circuit was developed with the aid of Fluidsim 4.2 Demo software, and later mounted on test bench. Data were then collected using an acquisition board and LabView software, measuring the quantities such as volumetric flow, position, pressure and temperature. The tests were developed at different pressure levels (5bar, 6bar and 7bar). In addition, MATLAB software was used for data processing, applying the Fourier Transform concepts to reduce noise and in sequence to Excel for the construction of the graphs and interpretation of the results. At the end it was verified through the experimental that the analytical method was slightly more efficient in 6.48% for 5 bar, 7.35% for 6 bar and 9.25% for 7 bar. The results presented by the mathematical model employed obtained a maximum variation of 12% when compared to the experimental one.

Key words: Efficiency; Pneumatic circuit; Constructive method; Analytical; Minimization of contacts; Mathematical model.

1. INTRODUÇÃO

Independentemente do método construtivo empregado para a construção de circuitos pneumáticos (intuitivo, minimização dos contatos, maximização dos contatos ou analítico), todos partem de um único ponto que é a necessidade final do equipamento e, por consequência, a definição do atuador a ser usado. A partir disso pode-se fazer o levantamento da quantidade e especificação de válvulas, sensores e demais componentes (conexões, mangueiras, botoeiras, fios) para a montagem, sendo que, para cada método, será usado um componente diferente e isso influencia diretamente no custo inicial, operacional e de manutenção de cada equipamento.

Levando em consideração o que realmente é utilizado de ar comprimido por um equipamento após a geração e somando os aumentos e instabilidades do custo da energia elétrica nos últimos anos, tem-se um ponto a ser estudado: a eficiência dos equipamentos que é de fundamental importância para a redução dos custos no atual mercado competitivo.

Segundo Meixner (1978,) o ar comprimido, embora muito vantajoso, é sem dúvida um elemento energético relativamente caro mas, mesmo assim, para um cálculo de rentabilidade real não deve ser considerado somente o custo da energia empregada, mas também os custos gerais acumulados (custos de instalação, manutenção, energia).

Juntamente a isso, também se deve levar em conta fatores que em outrora nem se cogitava, como: o método construtivo, a sele-

ção dos componentes com maior eficiência, os atuadores e válvulas, o consumo de ar comprimido, os custos iniciais dos componentes, a manutenção dos componentes, a eficiência de utilização do equipamento por parte do operador e a segurança operacional, construindo assim, um sistema eficiente para os tempos atuais.

Partindo deste contexto, propõem-se investigar a eficiência relativa entre dois métodos de construção de circuitos pneumáticos, com o intuito de verificar qual método apresenta maior eficiência, pois os estudos atuais se concentram quase que exclusivamente na geração e distribuição do ar comprimido, deixando a eficiência de montagem do equipamento em segundo plano. Levando em consideração que o dimensionamento da geração e distribuição é baseado no consumo de ar comprimido, se existir um menor consumo, menor terá de ser a geração e distribuição, assim reduzindo os custos de instalação e posteriormente de manutenção dos mesmos.

A proposta desta pesquisa é levantar dados experimentais por meio de testes em bancada, realizado no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASPHI) do curso de engenharia mecânica da Faculdade SATC, e compará-los entre si, juntamente com modelos matemáticos para verificar qual método possui melhor eficiência relativa ao dispositivo em questão estudado.

Diante do cenário de escassez de energia que se desdobra, o conhecimento do consumo relativo dos métodos construtivos de circuitos pneumáticos e seu respectivo consumo de ar comprimido para alimentação desses, torna-se importante, pois possibilita fornecer subsídios para a tomada de decisões, principalmente na indústria, que visa à redução de custos na sua aplicação para maior competitividade no mercado. A energia é uma variável determinante que contribui para formação de preço do produto final.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir serão analisados: o consumo de ar comprimido, os métodos de instalação, seus equipamentos e custos.

2.1 Custo da energia e oportunidade de melhoria

O ar comprimido não é utilizado exclusivamente nas indústrias, mas também em outros setores da economia, tais como, transporte, setor energético e agropecuário. Por esse motivo o estudo comparativo da eficiência entre métodos sistemáticos, empregados na construção de circuitos pneumáticos, não é restrito, podendo ser utilizado também em qualquer área.

Segundo Rocha e Monteiro (2014) a produção de ar comprimi-

do pode ser um dos processos mais dispendiosos de uma fábrica. Atualmente, a maior parte do ar comprimido é produzida por compressores acionados por motores elétricos, normalmente de grande porte, onde qualquer melhoria da eficiência, que resulte em redução de custos e de consumo de energia em seu sistema, é válida.

Segundo Motta (1990), eficiência consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto, por meio da modernização de equipamentos e processos, no sentido de reduzir seu consumo, tendo em vista o aumento nos custos da energia elétrica ao longo dos anos, conforme apresentado pela Figura 1.

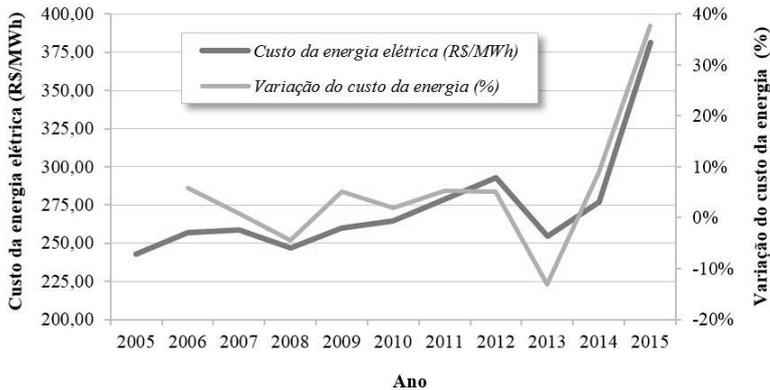


Figura 1 – Custo da energia elétrica x variação do custo da energia elétrica de 2005 a 2015 no Brasil (ANEEL 2015)

Por meio da Figura 1 pode-se verificar que o custo da energia elétrica tem tendência de aumento ao longo dos anos, mas também instabilidade no custo da mesma, fazendo com que o planejamento de qualquer instituição seja afetado.

De acordo com a Atlas COPCO – manual do ar comprimido (2010), durante a vida útil de um compressor (aproximadamente 10 anos) os custos são divididos em: 73% em energia, 7% em manutenção, 19% custo inicial do equipamento e 1% água para refrigeração, e do trabalho efetivo de geração de ar comprimido, somente 50% é efetivamente utilizado, sendo que os outros 50% se distribuem entre vazamentos, usos inadequados, aumento de demanda devido ao excesso de pressão e perdas dinâmicas.

Então, sugere-se que antes de atuar na geração, deve-se priorizar as ações de melhorias na utilização final do ar comprimido, pois os ganhos nessa área serão refletidos de modo ampliado na geração. Caso contrário, corre-se o risco de a geração ficar superdimensionada. Pode-se verificar na Tabela 1 as oportunidades de melhorias da efici-

ência em um sistema de ar comprimido.

Tabela 1 – Oportunidade de melhoria da eficiência
(Rocha e Monteiro, 2014)

Medidas de economia de energia	Aplicabilidade (1)	Ganhos (2)	Potencial de contribuição (3)
Instalação ou renovação do sistema			
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	25%	2%	0,50%
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	25%	15%	3,80%
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	30%	7%	2,10%
Uso de sistema de controle sofisticado	20%	12%	2,40%
Recuperação de calor rejeita do para uso em outras funções	20%	20%	4,00%
Melhoria no resfriamento, secagem e filtragem do ar	10%	5%	0,50%
Projeto global do sistema, incluindo sistema de multipressões	50%	9%	4,50%
Redução na perda por queda de pressão	50%	3%	1,50%
Otimização de dispositivos (equipamentos) de uso final	5%	40%	2,00%
Manutenção e operação do sistema			
Redução de vazamentos de ar	80%	20%	16%
Substituição de filtros mais frequente	40%	2%	0,80%
TOTAL			32,90%
(1) Percentual de situações onde esta medida é aplicável			
(2) Percentual de redução no consumo anual de energia			
(3) Potencial de contribuição = aplicabilidade x ganho			

Percebe-se que os ganhos na otimização de equipamentos de uso final, podem chegar a uma redução no consumo anual de energia de até 40%; e isso está diretamente relacionado com o objetivo desse trabalho que é buscar um método construtivo de equipamentos pneumáticos que possua maior eficiência se comparado a outro método.

2.2 Métodos Construtivos de Circuitos Pneumáticos

As técnicas de elaboração de circuitos pneumáticos fazem parte das informações tecnológicas necessárias para o desenho de qualquer circuito de comando, seguro e eficaz, para o controle dos movimentos de atuadores pneumáticos. Para montagem e interpretação

de circuitos existem alguns métodos: intuitivo, minimização de contatos, maximização de contatos e analítico.

2.2.1 Método Intuitivo

Segundo Negri (2010), este método consiste na escolha dos elementos lógicos e das suas interligações baseando-se na experiência, em exemplos e em correções por tentativas e erros. Para um mesmo problema, podem resultar diversas soluções intuitivas, mais simples ou mais complexas, dependendo muito do projetista. Com isto, tornam-se mais difíceis a supervisão, a manutenção e a localização de defeitos à medida que aumenta o número de variáveis de entrada e as condições adicionais de comando. Seu uso é limitado, pois não pode ser utilizado quando ocorrer sobreposição de pressão, o que acontece com sequências indiretas e isso faz com que o sistema não funcione corretamente.

2.2.2 Método de Minimização de Contatos

Segundo a apostila da Parker (2001), o método de minimização de contatos, também conhecido como método cascata ou de sequência mínima, reduz consideravelmente o número de relés auxiliares utilizados no comando elétrico. É aplicado, principalmente, em circuitos sequenciais eletropneumáticos, acionados por válvulas direcionais de duplo solenóide ou duplo servocomando que, por não possuírem mola de reposição, apresentam a característica de memorizar o último acionamento efetuado. Este método consiste em subdividir o comando elétrico em setores, os quais serão energizados um de cada vez, evitando possíveis sobreposições de sinais elétricos que ocorrem, principalmente, quando a sequência de movimentos dos cilindros é indireta.

2.2.3 Método de Maximização de Contatos

De acordo com a apostila da Parker (2001), o método de maximização de contatos, também conhecido como método passo a passo ou cadeia estacionária, ao contrário do método cascata, não apresenta a característica de reduzir o número de relés auxiliares utilizados no comando elétrico. Em compensação, pode ser aplicado com segurança em todo e qualquer circuito sequencial eletropneumático, não importando se as válvulas direcionais de comando são acionadas por simples ou duplo solenóide ou servocomando.

A grande vantagem desse comando é que cada acionamento depende da ocorrência do acionamento anterior. Isso significa que o próximo movimento de uma sequência de comando só ocorre, depois

da confirmação do movimento anterior ter ocorrido. Dessa forma, a cadeia estacionária evita totalmente as sobreposições de sinais, típicas das sequências indiretas, além de garantir que os movimentos de avanço e retorno dos cilindros pneumáticos obedeçam rigorosamente à sequência de comando, passo-a-passo.

2.2.4 Analítico

O método sequencial analítico é mais genérico dos que os outros métodos, já há muito tempo conhecido. O método analítico possui uma vantagem que é a definição otimizada dos componentes, portanto mais confiável, no que diz respeito à operação e manutenção. A sequência de operações é retirada da planta do processo automatizado, mediante a observação da atuação dos elementos de trabalho. A sequência de sistematização é realizada conforme a seguinte sequência: diagrama de comando dos atuadores, diagrama de atuação dos relés, diagrama de acionamento dos sensores e diagrama de atuação dos comandos dos relés. Para melhor entendimento, essa sequência está expressa graficamente na Figura 2.

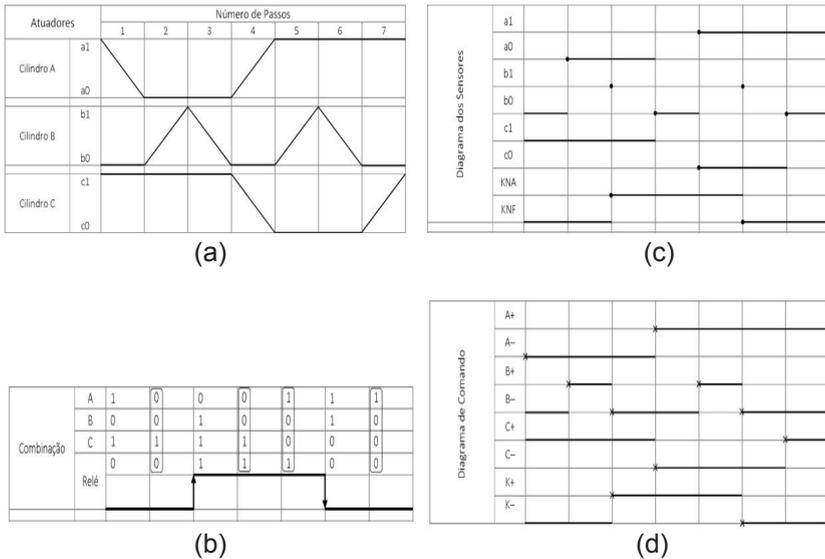


Figura 2 – Esquema gráfico para a montagem do método analítico: comando dos atuadores (a), atuação dos relés (b), acionamento dos sensores (c) e atuação dos comandos dos relés (d)

2.3 Seleção dos componentes e modelo matemático para validação posterior dos dados

Após a escolha do método construtivo, o próximo passo é a seleção dos componentes para a montagem do circuito de acordo com a utilização que será feita. Primeiramente pelo atuador e válvula direcional e desses partem-se para os outros componentes. Também deve-se definir a pressão de trabalho e, com isso, consegue-se mensurar o consumo de ar comprimido, a quantidade de ciclos por segundo e a velocidade de avanço do atuador.

Serão tomadas como base as pressões comumente utilizadas em equipamentos pneumáticos, para a realização desse estudo, que são: 5 bar, 6 bar e 7 bar, pois abaixo desses valores os equipamentos não são eficientes e acima se torna inviável, por parte dos custos dos equipamentos (Bonacorso e Noll, 2006). A Figura 3 nos mostra um desenho esquemático do atuador e válvula.

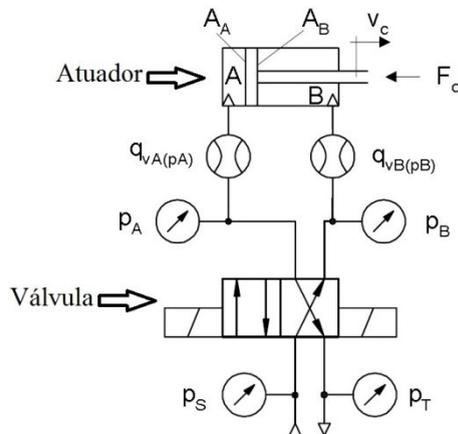


Figura 3 – Desenho esquemático do atuador e válvula (Negri, 2010)

Na Figura 3 estão indicados o atuador e suas respectivas câmaras, áreas do cilindro, vazões e pressões do atuador; a válvula e as pressões do sistema e trabalho. Essas indicações serão úteis para o entendimento das equações que serão apresentadas a seguir.

Com o objetivo de um estudo mais concreto, será comparada a vazão/consumo de ar comprimido prático com alguns modelos matemáticos de uso de sistemas pneumáticos, e para isso se utilizará das seguintes equações (Negri, 2010):

Vazão volumétrica:

$$qV_{A(pA)} = A_A \cdot v_C \quad (1)$$

Onde:

$qV_{A(pA)}$ [l/seg]: vazão volumétrica

A_A [mm²]: área interna do cilindro

v_C [mm/s]: velocidade de deslocamento do atuador

Vazão mássica:

$$qm = qV \cdot \rho_0 \quad (2)$$

$$qm_A = qV_{A(pA)} \cdot \frac{p_A \cdot p_0}{R \cdot T_A} \quad (3)$$

$$qm_A = C \cdot (p_s + p_0) \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{a_n - b}{1 - b} \right)^2} \quad (4)$$

Onde:

qm_A : vazão mássica na câmara A em [kg/s]

$qV_{A(pA)}$: vazão volumétrica na câmara A em [l/seg]

p_A : pressão na câmara A em [Pa]

p_0 : pressão atmosférica em [Pa]

R : constante universal dos gases em [J/kgK]

T_A : temperatura na câmara do atuador em [K]

p_s : pressão do sistema em [Pa]

ρ_0 : densidade do ar em [kg/m³]

T_0 : temperatura ambiente em [K]

T_1 : temperatura na câmara do atuador em [K]

$b = 0,538$: coeficiente da válvula utilizada

$$a_n = \frac{p_{2n}}{p_{1n}}, \text{ sendo } p_{1n} = 7 \text{ bar}_{abs} \text{ e } p_{2n} = 6 \text{ bar}_{abs}$$

Consumo de ar comprimido:

$$C = \frac{Q_N}{60000 \cdot p_{S_n} \cdot w(a_n)} \quad (5)$$

Onde:

C : consumo de ar comprimido em [l/min]

Q_N : vazão em [NL/min]

p_{S_n} : pressão do sistema em [Pa]

$$w(a_n) = \sqrt{1 - \left(\frac{a_n - b}{1 - b} \right)^2}$$

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Serão simulados dois métodos de construção de circuitos pneumáticos (analítico e minimização dos contatos) no *software* Fluidsim 4.2 Demo; posteriormente os mesmos serão montados em bancada. Durante o funcionamento de cada método para cada uma das três diferentes pressões (5 bar, 6 bar e 7 bar) serão adquiridos dados com o auxílio de uma placa de aquisição de dados e de sensores (vazão, posição e pressão). Os dados coletados serão tratados nos *softwares* Excel e MatLab, sendo possível, desta forma, verificar qual dos métodos é mais eficiente e também validar os dados práticos com os modelos matemáticos existentes para pneumática.

3.1 Simulação e seleção dos métodos

Para alcançar o objetivo desse trabalho, primeiramente foi montado e simulado o funcionamento no *software* Fluidsim 4.2 Demo para os métodos, analítico e minimização de contatos, um equipamento que possui três atuadores com uma determinada sequência de acionamento, sendo representada de forma algébrica por $A - B + B - (A + C -) B + B - C +$, onde os circuitos elétricos e pneumáticos para cada método podem ser visualizados por meio das Figura 4, Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

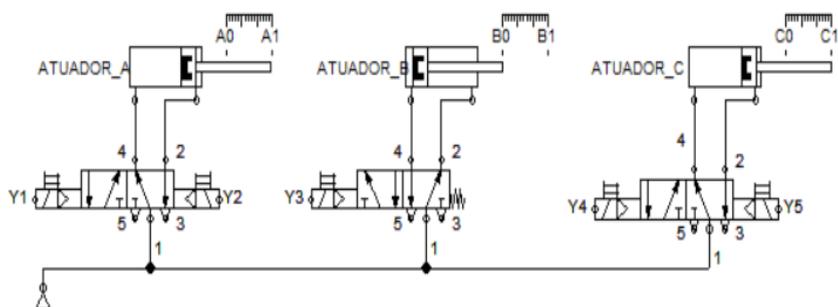


Figura 4 – Circuito pneumático do método analítico

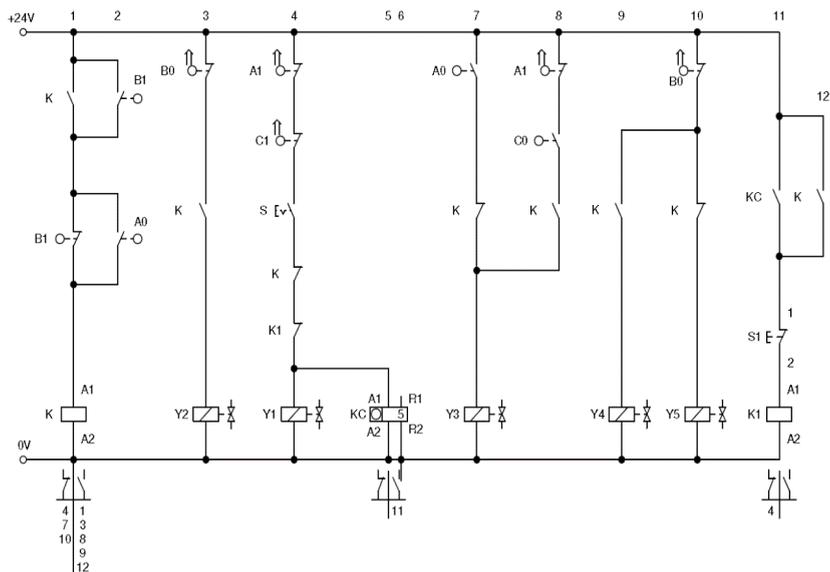


Figura 5 – Circuito elétrico (com contador de ciclos) do método analítico

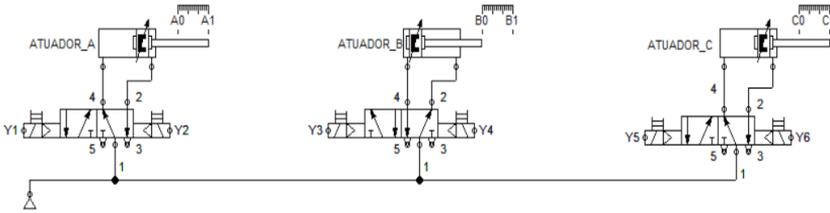


Figura 6 – Circuito pneumático do método minimização dos contatos

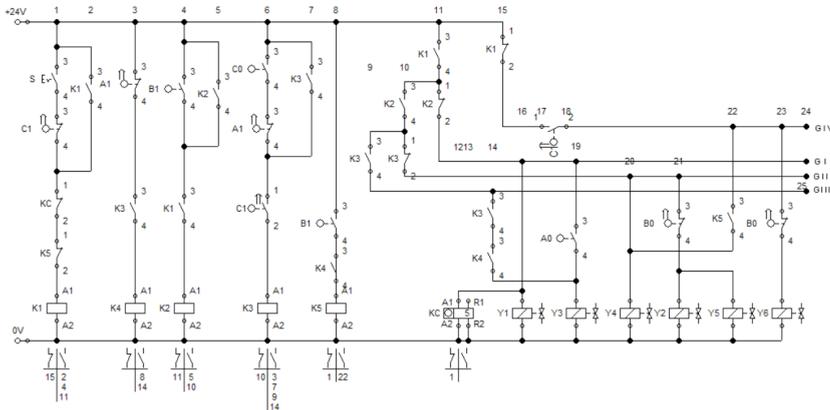


Figura 7 – Circuito elétrico (com contador de ciclos) do método minimização dos contatos

Percebe-se pelas Figuras (4, 5, 6 e 7) as diferenças construtivas entre os métodos. Na parte pneumática, uma única diferença é observada: que no método analítico, a válvula utilizada no atuador B é de simples solenóide com retorno por mola, já na minimização dos contatos foi utilizada uma válvula de duplo solenóide. Já no circuito elétrico as diferenças são maiores; além do solenóide, por causa da válvula de duplo solenóide, há quatro relés a mais no método de minimização dos contatos. Com isso pode-se dispender um maior tempo para a montagem desse último, se comparado com o analítico.

Optou-se por esses dois circuitos por exclusão, pois com o intuitivo não é possível realizar o teste, pois a sequência de acionamento é indireta e ocorreria sobrepressão de pressão e o método de maximização dos contatos foi inviabilizado pelo fator tempo.

Cada método foi testado em três diferentes pressões (5bar, 6bar e 7bar), isso porque comumente são pressões amplamente utilizadas em equipamentos pneumáticos e será comparado o consumo

de ar comprimido entre os métodos. Esse consumo foi mensurado pela média do consumo de litros por minuto e relacionado com o número de ciclos por minutos, que foi adquirido durante o teste, retornando o consumo absoluto de litros por ciclo, assim podendo comparar os métodos.

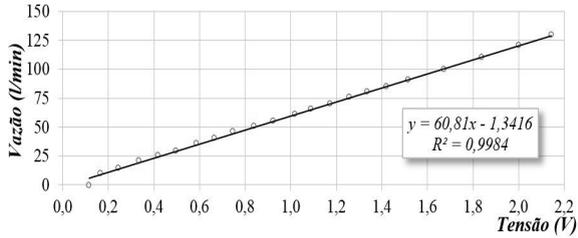
3.2 Aquisições dos dados

Para a aquisição dos dados gerados pelos transdutores/sensores (utilizar-se-á a nomenclatura - sensores) de pressão, posição e vazão, foi utilizada uma placa de aquisição de dados modelo NI USB 6009 (possui: 8 entradas e 2 saídas analógicas; 12 entradas/saídas digitais, contadores de 32 bits; alimentação por barramento, para maior mobilidade; conectividade de sinais integrada; compatível com *LabVIEW*, *LabWindows™ /CVI* e *Measurement Studio for Visual Studio .NET*), fabricada pela *National Instruments*, e está conectada a um computador, conforme Figura 8.

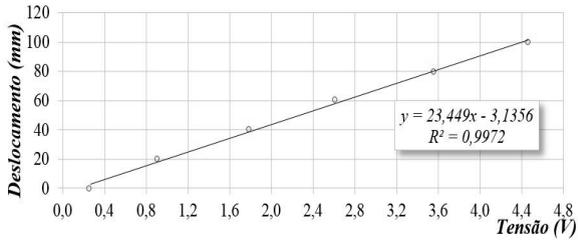


Figura 8 - Sistema de aquisição de dados para obtenção dos resultados

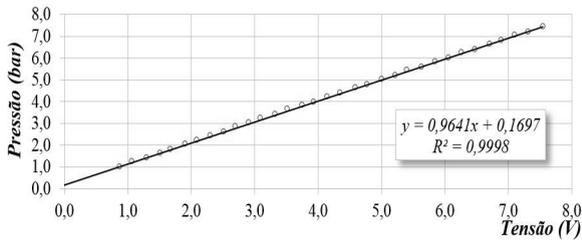
Com cada sensor, adquiriu-se a informação a qual foi transmitida em volts para a placa de aquisição de dados; em seguida foi realizada a calibração e a linearização para cada um dos sensores, com auxílio do *software* Excel. A calibração dos sensores foi realizada alterando gradativamente a vazão, para o sensor de vazão, a posição, para o sensor de posição e a pressão, para o transdutor de pressão. A cada alteração um valor de tensão era emitido pelo sensor, o qual foi medido com um multímetro e, com esses valores, obteve-se os pontos experimentais e posteriormente foi realizada a linearização, gerando uma equação, conforme Figura 9.



(a)



(b)



(c)

Figura 9 – Curvas de calibração para cada sensor: (a) vazão, (b) posição e (c) pressão

As equações de linearização geradas, que estão descritas na Figura 9 foram utilizadas no *software LabView Student Edition 2015* (*software* de programação por blocos), conforme Figura 10.

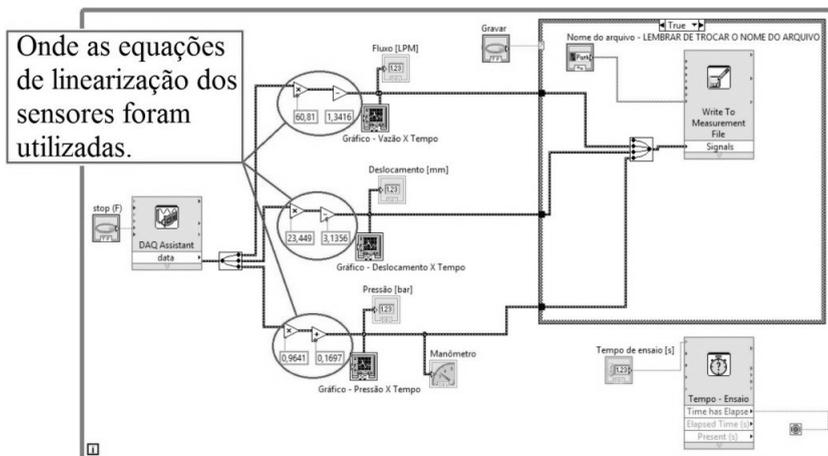


Figura 10 – Área de programação por blocos do *software LabView Student Edition 2015*

Como se pode ver na Figura 10, as equações foram inseridas na programação do *software* para que os dados adquiridos pela placa de aquisição de dados já fossem gravados com os valores de vazão, posição e pressão e não o valor de tensão transmitida pelos sensores, facilitando a posterior análise dos dados. Com a “construção” do programa em blocos, ele automaticamente gera uma área gráfica, conforme Figura 11.

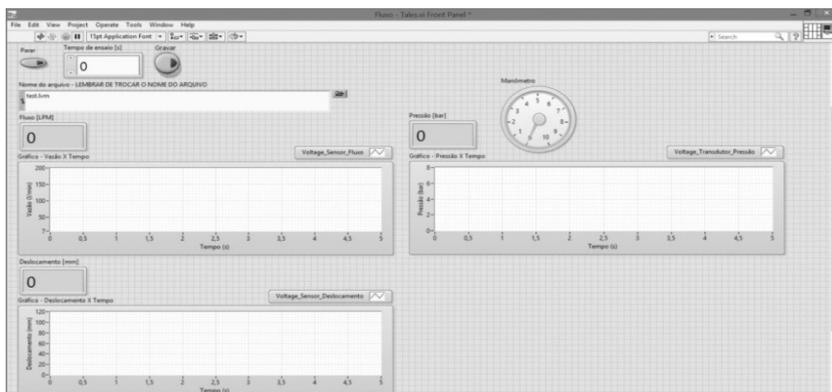


Figura 11 – Ambiente gráfico gerado pelo *software LabView Student Edition 2015*

Essa área gráfica nos mostra a “construção” que foi feita em blocos, onde se podem iniciar os testes, realizar a leitura feita pelos sensores, inserir um determinado tempo de leitura por parte do *software*, fazer a gravação dos dados feita pelos sensores. Com a inserção das equações lineares na parte de blocos do *software* são retornados os valores (de vazão, de posição e de pressão) instantâneos lidos por cada sensor durante o teste.

3.3 Montagem dos métodos

Utilizou-se a bancada existente no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) para a montagem do circuito para cada método. Os principais equipamentos necessários para a montagem estão descritos na Tabela 2; dito principais equipamentos, pois não foram contabilizados os fios, botoeiras e conectores.

Tabela 2 - Principais equipamentos que utilizados na bancada para realização do estudo

Item	Quant.	Descrição do Produto
01	01 pç.	Válvula pneumática 5/2 vias, simples solenóide em 24 VCC, conexão em 1/8" BSP
02	03 pc.	Válvula pneumática 5/2 vias, duplo solenóide em 24 VCC, conexão em 1/8" BSP
03	03 pç.	Atuador pneumático de duplo efeito (ISO 6432), sem amortecimento em ambas as direções. Dimensões: 16 x 25 x 100 mm.
04	01 pç.	Unidade de conservação (filtro + regulador + lubrificador), conexões de ¼" BSP
06	06 pç.	Chave fim de curso – VM05A 10 A 250 VAC T85
07	01 pç.	Sensor de fluxo – medidor de vazão; mod. SFAB; range de 6 a 600 lpm (fab. FESTO)
08	01 pç.	Transdutor de pressão – Tipo: IT – TR; range de 0 a 10 bar (fab. VELKI)
09	01 pç.	Sensor de deslocamento linear resistivo – mod. LT-M-0200-S; cod. F003541; lin +/- 0,05% (fab. GEFTRAN)
10	01 pç.	Placa de aquisição de dados – mod. NI USB-6009 (fab. <i>National Instruments</i>)

Observa-se que os sensores e placa de aquisição de dados foram utilizados, pois isso é um teste, sendo que num caso real dificilmente seriam utilizados. Então, eles não foram levantados em consideração nos custos dos principais equipamentos utilizados para a montagem de cada método, descritos por meio da Tabela 3.

Tabela 3 - Custo dos principais equipamentos que foram utilizados para cada método

Descrição dos componentes	Analítico			Minimização		
	Quant. (unid.)	Custo unit. (R\$)	Custo total (R\$)	Quant. (unid.)	Custo unit. (R\$)	Custo total (R\$)
Atuadores: 16 x 25 x 100 mm	3	170,00	510,00	3	170,00	510,00
Válvula de duplo solenóide	2	200,00	400,00	3	200,00	600,00
Válvula simples solenóide com retorno por mola	1	160,00	160,00	0	160,00	0,00
Relés auxiliares	1	80,00	80,00	5	80,00	400,00
Fim de curso - contato	1	13,00	78,00	6	13,00	78,00
Total (R\$)			1.228,00			1.588,00

Percebe-se que o método analítico tem um custo de 30% menor em relação ao método de minimização dos contatos. Sendo que o principal motivo de diferença deste valor foi a quantidade de quatro relés e de uma válvula de duplo solenóide utilizados a mais no método de minimização dos contatos, afetando também os custos futuros de manutenção do circuito. O tempo de montagem (mão de obra) de cada método também influencia nos custos iniciais; para o analítico foi uma hora, já para o de minimização foram três horas, devido ao circuito elétrico ser maior; isso leva a uma diferença ainda maior dos custos iniciais entre os métodos.

A montagem do circuito para cada método foi basicamente a seguinte: posicionamento dos atuadores e das válvulas na bancada; colocação dos fins de curso nos atuadores; o posicionamento dos sensores – o sensor de vazão foi colocado antes da válvula reguladora de pressão, o sensor de posição foi fixado junto ao atuador C e o transdutor de pressão foi utilizado em todos os atuadores, para verificar a pressão nas duas câmaras de cada atuador; e por último foi realizada a ligação elétrica do sistema; também foi utilizada uma fonte de corrente contínua para alimentação dos sensores; o sensor de pressão alimentado a 24 VCC, o sensor de posição e o transdutor de pressão alimentado a 10 VCC, ficando o circuito montado na bancada conforme Figura 12.

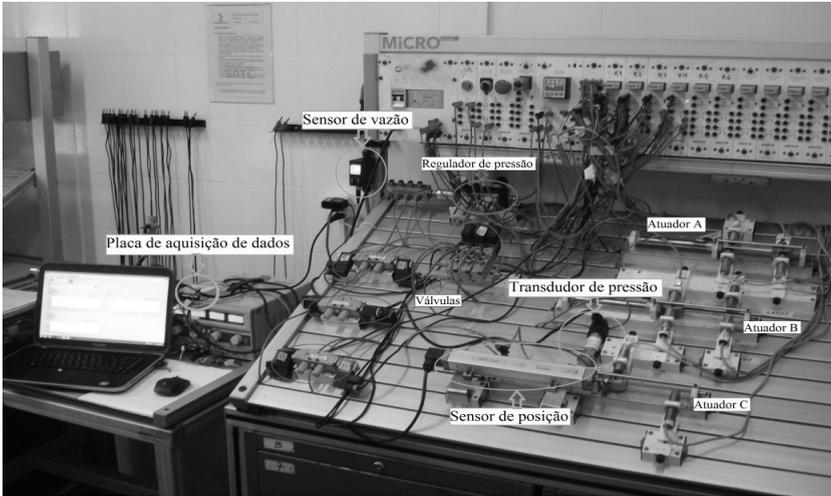


Figura 12 – Bancada montada para os testes

Na parte elétrica do circuito, para ambos os métodos, ocorreram alguns percalços, pois na simulação, um único fim de curso era responsável por mais de um acionamento no circuito elétrico, assim, durante a montagem, os fins de cursos disponíveis tinham uma única saída; isso gerou a necessidade de adaptar mais de um fim de curso no avanço ou retorno dos atuadores, como se pode verificar na Figura 12.

Primeiramente foi montado o método analítico no qual foram feitos alguns testes para poder determinar a taxa de aquisição de dados e por quanto tempo os dados seriam adquiridos. Posteriormente foi montado o método minimização dos contatos com os parâmetros do método anterior. Baseando-se na estatística, foram realizados três testes para cada pressão em cada método.

3.4 Parametrização das aquisições dos dados

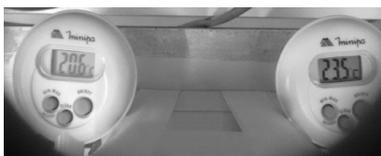
Inicialmente, foram realizados cerca de 60 testes para adequar, preparar e parametrizar a forma de aquisições de dados, primeiramente adquiridos com 500 segundos (~8 minutos) de funcionamento do sistema a 1000 Hz, mas percebeu-se que não atendia a necessidade do estudo da comparação da eficiência entre métodos construtivos de circuitos pneumáticos, pois durante esse tempo a linha de tendência gerada com os dados adquiridos era uma reta crescente, indicando que o consumo de ar comprimido aumentaria com o tempo, o que seria verdade. Então foi aumentado o tempo de teste para 5000 segundos

(~83 minutos) e conseqüentemente teria que se diminuir a frequência de aquisição, pois senão geraria uma quantidade muito grande de dados, os quais não se teria capacidade de processar. Por conta disso foram testadas aquisições a 1000 Hz, 500 Hz, 250 Hz e 100 Hz, onde foi verificado que a 100 Hz, atendia as necessidades para coleta de dados e não afetaria na confiabilidade dos resultados.

Então o tempo de aquisição foi de 5000 segundos a uma frequência de aquisição de 100 Hz. Com isso tem-se uma tendência de estabilidade da vazão ao longo do tempo e conseqüentemente dados mais confiáveis. Foi verificado que abaixo de 500 segundos o sistema apresentou instabilidade; neste tempo inicial era o tempo necessário para a estabilização do sistema, possivelmente a estabilização da temperatura nos atuadores e válvulas, como pode-se ser verificado na Figura 14.

3.5 Medições de Temperatura nas Câmaras do Atuador

Foi coletada, em alguns testes, a temperatura na câmara A e B do atuador B, utilizando dois termômetros de vareta (modelo MV-363, fabricante *Minipa*), atuador que tem dois avanços e retornos por ciclo, para posterior verificação se a temperatura ao longo do tempo no atuador afetava o consumo de ar comprimido. Já que não havia um sensor de temperatura, foi utilizada uma máquina fotográfica, e essa programada para tirar uma foto a cada 10 segundos (Figura 13); ao iniciar o teste foi também inicia a seqüência de fotos.



(a)



(b)



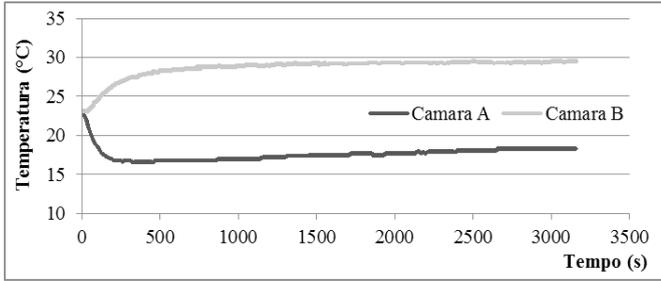
(c)



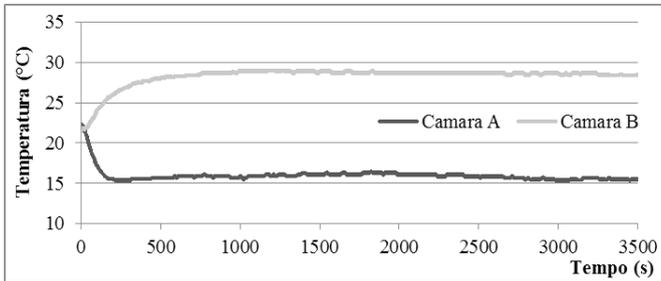
(d)

Figura 13 – Medição de temperatura

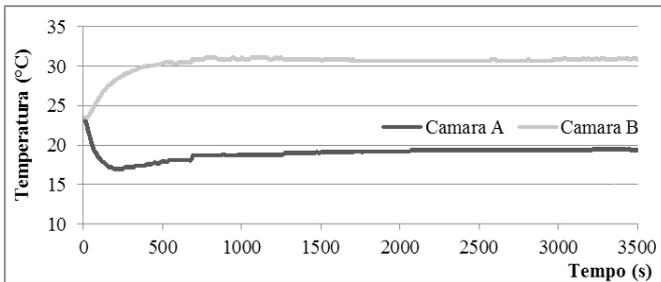
As medições foram realizadas com intervalo de 10 segundos entre elas, sendo Figura 11 (a) 60, (b) 70, (c) 80 e (d) 90 segundos. Com as imagens adquiridas foi possível gerar os gráficos e assim verificar a variação da temperatura ao longo do tempo, para as três pressões, conforme Figura 14.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Gráficos apresentando os dados adquiridos para: (a) 5bar, (b) 6bar e (c) 7bar

Percebe-se que na câmara A ocorre o resfriamento e na câmara B o aquecimento do atuador, até aproximadamente 500 segundos, onde o sistema tende a estabilidade da temperatura em cada câmara.

4. RESULTADO E ANÁLISE

4.1 Vazão ao longo do tempo

Com o tempo e a frequência de aquisição de dados pré-estabelecidas, iniciou-se as observações mais aprofundadas dos dados plotagens para cada teste que se realizava. Nos primeiros testes tinha-se uma tendência do aumento da vazão ao longo do tempo, haja vista que isso não seria verídico, então com o tempo maior de aquisição dos dados, pode-se perceber uma tendência de estabilidade da vazão ao longo do tempo, mas também se observou um crescimento quase que linear da vazão até um determinado pico e repentinamente uma queda até um vale, mas de forma cíclica, conforme Figura 15.

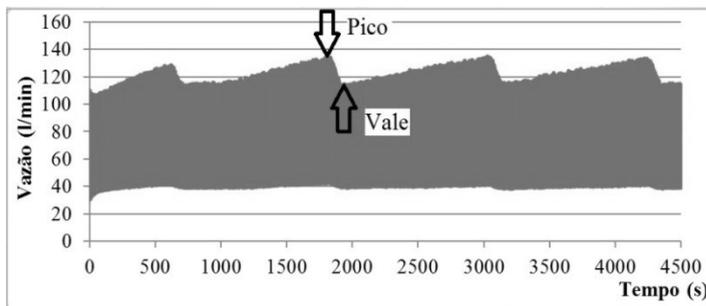


Figura 15 – Comportamento do consumo de ar (vazão) x tempo

Esse “fenômeno” ocorreu para todas as pressões, mas em períodos diferentes, podendo considerar que estivesse ligado diretamente ao fornecimento de vazão de ar comprimido. Verificou-se que o tempo do pico até o vale era o tempo que o compressor permanece ligado para repor o ar comprimido gasto pelo teste até aquele momento, aproximadamente 75 segundos, conforme Figura 16.

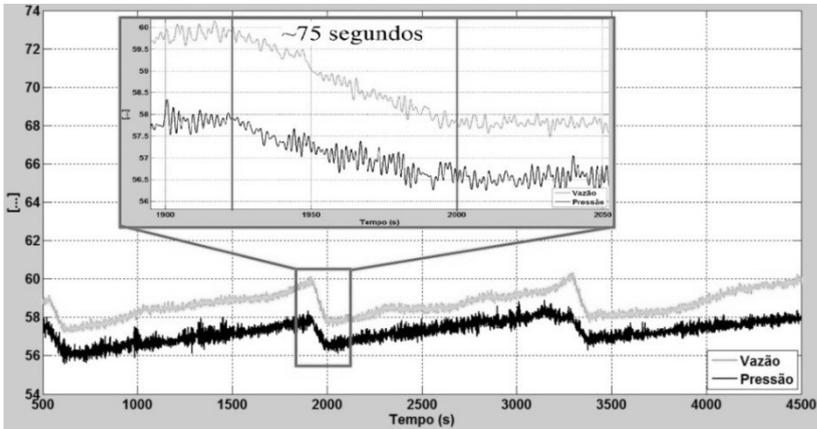


Figura 16 – Medição da vazão e pressão
(minimização dos contatos) à 5 bar

Sabe-se que ao descomprimir um vaso de pressão, o ar liberado resfria, e aquece quando o ar é comprimido, e a temperatura do ar influencia na sua densidade, tornando-o mais denso quando frio e menos denso quando quente. Pela Figura 14 nota-se que a vazão e a pressão são diretamente afetadas pela densidade do ar, devido às características do sensor que não levam em consideração a variação da densidade do ar, pois trata-se de um sensor para a medição de vazão volumétrica e não de vazão mássica. Pode-se verificar pela Equação 2 que, para se ter a leitura da vazão volumétrica exata, somente a vazão mássica poderia ser alterada, mas como a densidade também variava devido a descompressão e compressão do ar no reservatório do compressor, afetava a leitura do sensor, como visto na Figura 13. Então com o resfriamento do ar ao ser despressurizado na saída do reservatório, a sua densidade aumentava com o passar do tempo, e isso reflete na leitura do sensor.

4.2 Tratamento dos Dados

Os dados foram analisados utilizando o *software* Excel e o *software* MATLAB. Com o Excel foram gerados gráficos, cálculos das médias e dos respectivos desvios padrões das vazões de ar comprimido, levantados os números de ciclos por minuto para cada pressão em cada método. O MATLAB foi utilizado para tratamento dos dados, onde foi aplicada a transformada de Fourier para redução dos ruídos; os retornos dos dados tratados facilitaram a análise das informações, conforme se pode verificar na Figura 17.

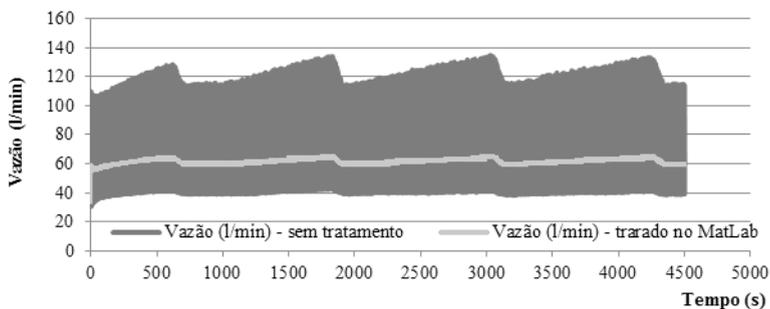


Figura 17 – Curvas de vazão com tratamento dos dados pela técnica de Fourier

Devido a grande quantidade de dados adquiridos em cada teste, o Excel se tornou muito lento para geração e manipulação dos gráficos, então a utilização do *software* MATLAB foi imprescindível, tornando mais fácil e rápido a geração dos mesmos e também a possibilidade de fazer o tratamento dos dados; nesse caso aplicou-se a transformada de Fourier e, após o tratamento dos dados, as linhas se tornaram mais “suaves”, possibilitando a colocação de todas as pressões de cada um dos dois métodos analisados, conforme Figura 18.

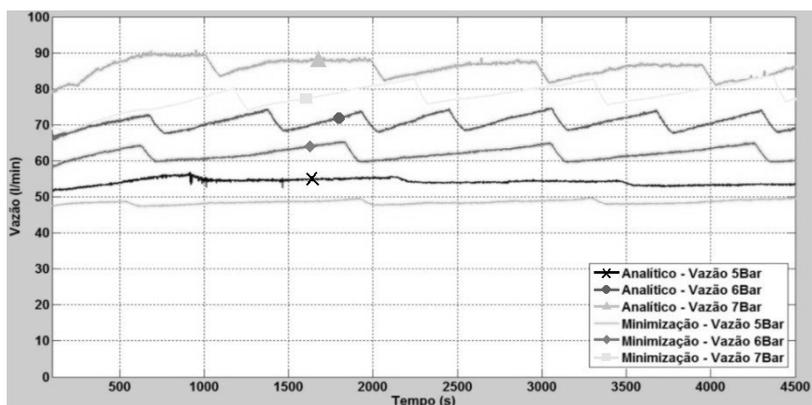


Figura 18 – Medição de vazão em ambos os métodos estudados para 5 bar, 6 bar e 7 bar

Pode-se observar que a tendência das vazões no método de minimização dos contatos é menor do que o método analítico.

4.2 Valores Experimentais

Para análise dos dados foram desconsiderados os tempos iniciais e finais dos testes, onde apareceram instabilidades, considerando o intervalo entre 500 segundos até 4500 segundos, com isso foram levantados os valores da média da vazão e o número de ciclos por minuto nesse intervalo. Desse modo, foi possível calcular o consumo de ar comprimido por ciclo em cada um dos testes, para as três pressões em cada método, que estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculos estatísticos, para cada método em cada pressão, entre 500 e 4500 s

	5 bar		6 bar		7 bar	
	Analítico	Minimização	Analítico	Minimização	Analítico	Minimização
Média da vazão (l/min)	54,28	48,50	70,92	62,04	86,94	78,36
Desvio Padrão Vazão (l/min) sem filtro	12,16	13,27	20,89	18,13	25,55	23,34
Desvio Padrão da vazão l/min) – após tratamento dos dados – com filtro	0,76	0,52	1,80	1,56	2,16	2,48
Coefficiente de variação ⁽¹⁾	1,40%	1,07%	2,54%	2,51%	2,48%	3,16%
Ciclos/min	50,04	42,06	52,27	42,55	53,56	44,34
Consumo (litro/ciclo)	1,08	1,15	1,6	1,46	1,62	1,77
Diferença entre os métodos	6,48%		7,35%		9,25%	

⁽¹⁾ Utilizado o desvio padrão da vazão - após tratamentos dos dados no MATLAB.

Com o tratamento dos dados feito pelo MATLAB houve uma significativa redução dos desvios padrões, se comparados com os dados que não foram tratados, mas a redução não foi proporcional para o coeficiente de variação onde, para cada pressão, os dois métodos apresentaram valores muito próximos.

Observando somente o valor absoluto da média da vazão poderia, num primeiro momento, afirmar que o método de minimização dos contados foi mais eficiente se comparado com o método analítico, mas ao fazer o levantamento do número de ciclos por minuto de cada método e depois calcular o consumo por ciclo, verificou-se que o méto-

do analítico se mostraria mais eficiente, 6,48% para 5 bar, 7,35% para 6 bar e 9,25% para 7 bar.

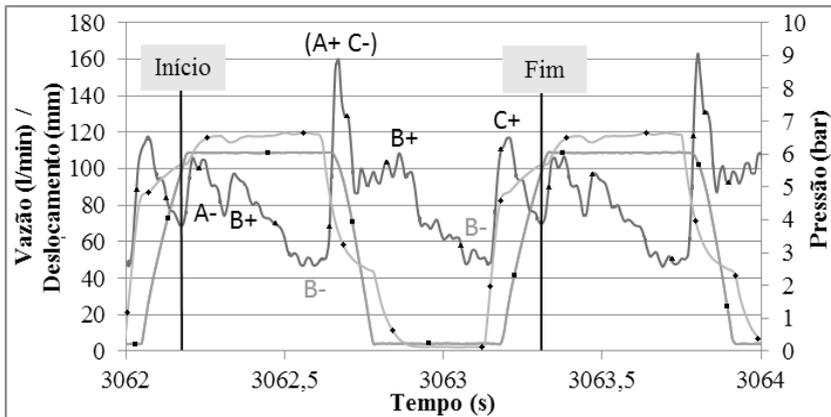
Na Tabela 4 pode-se observar um pequeno aumento da quantidade de ciclos por minuto a cada aumento de pressão no mesmo método, entretanto, o aumento do consumo é muito maior, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Ciclos por minuto e consumo para cada pressão em cada método de estudo e suas respectivas variações

	Analítico			Minimização		
	5 bar	6 bar	7 bar	5 bar	6 bar	7 bar
Ciclos/min	50,04	52,27	53,56	42,06	42,55	44,34
Varição do número de ciclos/min		4%	2%		1%	4%
Consumo (litro/ciclo)	1,08	1,36	1,62	1,15	1,46	1,77
Varição do consumo		26%	19%		27%	21%

Com isso percebe-se que se produzir mais em menos tempo nem sempre é viável, pois a enquanto a quantidade de ciclos por minuto aumenta em até 4%, o consumo aumenta em até 27%, o que pode se tornar inviável economicamente.

Contudo, quando foram elaborados e montados cada método na bancada de testes, por mais que se atentasse aos detalhes no posicionamento dos fins de curso nos atuadores, após gerar os gráficos, observou-se que no método analítico o atuador A retornou antes que o atuador C completasse totalmente o seu avanço; esse é o ponto onde se finda um ciclo e inicia-se outro conforme Figura 19 (a).



(a)

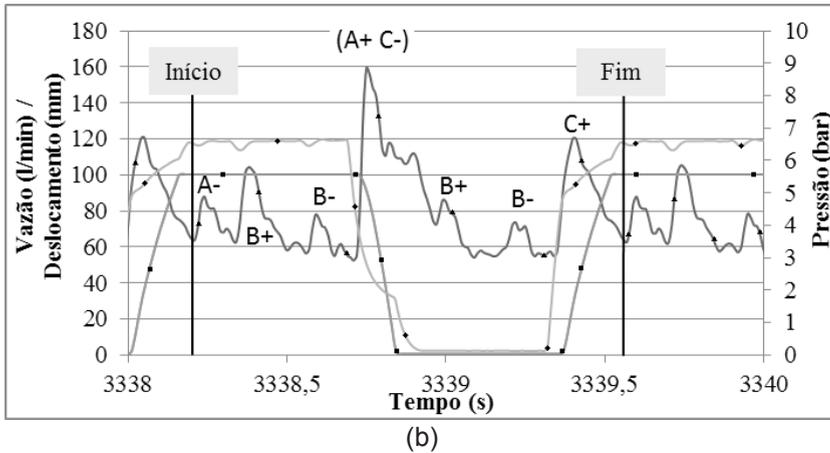


Figura 19 – Gráficos da vazão (▲), deslocamento (■) e pressão (◆), dos métodos: (a) analítico e (b) minimização dos contatos a 7 bar

Na Figura 19 foram indicados o início e o fim de um ciclo, os pontos onde cada atuador avança e retorna, conforme a sequência [A - B + B - (A + C -) B + B - C +], e salientando que o deslocamento é referente ao atuador C e que a pressão é da câmara A do atuador C. Foi indicado na Figura 19 (a), somente o momento em que o atuador B retornava, apresentado pela linha com quadrados. Lembrando que para o método analítico este tinha o retorno por mola, portando não utilizando ar comprimido para esse função.

Utilizando gráficos como o da Figura 19, pode-se encontrar velocidade de avanço, de aproximadamente 0,632 m/s, e de retorno do atuador, de aproximadamente 0,769 m/s, resultando numa velocidade média de 0,700 m/s, valor próximo aos utilizados na indústria (entre 0,1 e 2 m/s).

Devido ao retorno do atuador A ser antes do total avanço do atuador C (no método analítico) que possivelmente levou a maior diferença de consumo (8,5%) entre os métodos, à 7 bar, Considerando que o coeficiente de variação ser muito próximo entre os dois métodos, que os coeficientes das válvulas (tanto para a de duplo quanto para o de simples solenóide) são iguais, que os atuadores utilizados foram os mesmos para ambos os métodos, pode-se concluir que eles têm a mesma eficiência.

4.2 Modelos matemáticos

Para validar o procedimento experimental, foi realizado um comparativo com alguns modelos matemáticos de uso de sistemas

pneumáticos. Os valores levantados e coletados, necessários para os cálculos dos modelos matemáticos, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores para cálculo teórico da vazão

Constantes		Atuador C		
p0 = 101330 Pa		Diâmetro = 0,016 m		
R = 288 J/kg.K		Comprimento = 0,100 m		
ρo = 1,20 kg.m3		Deslocamento efetivo = 0,100 m		
		Área = 2,01 E-04 m ²		
Temperatura ambiente		Velocidade = 0,700 m/s		
T0 = 295,15 K (22°C)		TA = T1 = 292,15 K (19°C)		
Pressões de teste		5 bar	6 bar	7 bar
Pressão linha (PA)		506650	607980	709310
Pressão câmara A (Pa)		455985	557315	658645

Utilizando os valores da Tabela 6 nas equações Equação 1, 3, 4 e 5, resultou-se nos valores de vazão (teórico) que estão na Tabela 7, juntamente com os valores adquiridos durante os testes.

Tabela 7 – Valores da vazão adquiridos e calculados para ambos os métodos nas três pressões

	5 bar		6 bar		7 bar	
	Analítico	Minimização	Analítico	Minimização	Analítico	Minimização
Média da vazão (l/min)	54,28	48,5	70,92	62,04	86,94	78,36
Vazão teórica Qn (l/min)	52,72		64,43		76,15	
Varição da vazão em relação à teórica	97%	109%	91%	104%	88%	97%

Tem-se a variação entre os valores adquiridos e calculados, de no máximo 12% para a pressão de 7bar no método analítico. Percebe-se, então, que o valor calculado pelo modelo matemático se mostrou um valor intermediário entre os dois métodos, assim se pode claramente antever um consumo de ar comprimido de um equipamento pneumático.

4.3 Comparação do Consumo e Investimento de Equipamento

A Tabela 3 mostrou que o investimento do método analítico é 30% menor que o de minimização dos contatos, por usar 1 válvula solenóide e 4 relés auxiliares a menos que o método de minimização, que iria repercutir nos custos de manutenção. O investimento e a manutenção do método analítico se mostraram com maiores vantagens ao método de minimização.

Para avaliar o consumo de ar comprimido, comparou-se, graficamente, os resultados de pressão versus vazão, calculados e medidos na Figura 20.

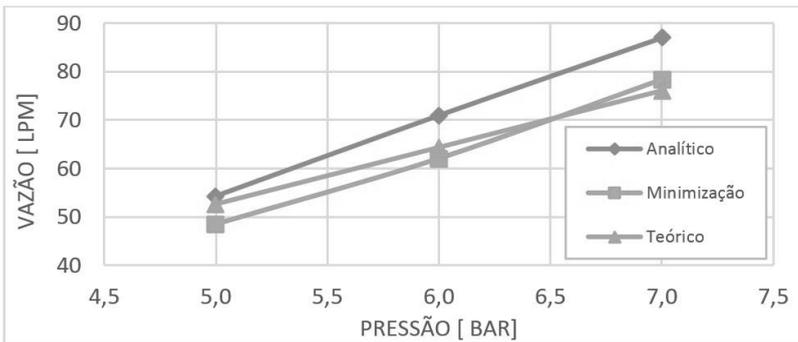


Figura 20 – Comparação dos resultados de consumo de ar comprimido para cada pressão

Por meio da Figura 20 se observa que o método de minimização se encontra mais próximo do calculado (teórico) para maiores pressões, com tendência a se afastar mais em maiores pressões. Percebe-se também que existe um afastamento semelhante entre os resultados experimentais, e um maior consumo para o método analítico. A Tabela 8, processa essas diferenças para 200h, considerando uma utilização de 8 horas por dia e 5 vezes por semana, equivalente a 1 mês de consumo. Ainda para este resultado, assumiu-se uma vazão de 113,26 lpm, para cada CV de potência consumida e o custo de R\$ 0,50 para cada kWh.

Tabela 8 – Valores comparativos entre os métodos e a projeção de custos para 1 mês de uso

Pressão	Analítico	Minimização	Tempo	Analítico	Minimização	Diferença	Pct.
(bar)	Vazão (l/min.)		(h)	Custo (R\$)		(R\$)	(%)
5	54,28	48,50	200	2113,36	1888,32	225,04	11,92
6	70,92	62,04	200	2761,23	2415,49	345,74	14,31
7	86,94	78,36	200	3384,96	3050,90	334,06	10,95

A comparação de valores em custos, se mostrou em vantagem no consumo de energia para o método de minimização, dando um custo médio menor em 12,4% de economia por cada mês, se o consumo fosse de 200h por mês, para a faixa de 5 a 7 bar.

5. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A utilização de softwares é imprescindível para a simulação e processamento dos dados;

- Pequenas variações de vazão e pressão foram identificadas nos ensaios, decorrente do volume variável do reservatório do compressor, produzida pela carga e descarga do volume de ar. Durante os testes a variação máxima de vazão foi de 2,48 l/min (7 bar) e a mínima foi de 0,52 l/min (5 bar);

- Não se pode afirmar qual método é mais eficiente unicamente pelos valores médios de vazão adquiridos, mas sim pelo consumo de ar comprimido por ciclo;

- O método analítico se mostrou inicialmente mais eficiente, 6,48% para 5 bar, 7,35% para 6 bar e 9,25% para 7 bar, se comparado ao método de minimização dos contatos. Contudo, levando em consideração as imprecisões do funcionamento dos fins de curso, e que as características dos equipamentos terem sido iguais para os dois métodos, assume-se que eles têm a mesma eficiência;

- O consumo de ar comprimido e a quantidade de ciclos por minutos do atuador são proporcionais ao aumento de pressão, sendo que a quantidade de ciclos por minuto aumenta em até 4%; já o consumo aumenta em até 27% com o aumento de 1 bar de pressão;

- As velocidades de avanço (0,632 m/s) e retorno (0,769 m/s) do atuador são claramente proporcionais ao volume das câmaras do atuador, e são valores próximos ao usado na indústria para equipamentos pneumáticos;

- Mesmo considerando os métodos com a mesma eficiência, tende-se a escolher o método analítico, pois seu custo inicial é 30% menor, sem contar os custos de mão de obra para a instalação, que aumentaria ainda mais a diferença, se comparado com de minimização dos contatos, devido a menor quantidade de componentes que influenciará nos custos de manutenção. Em consumo, o método de minimização é de 12,4% menor, comparado ao analítico.
- A utilização de sensores para a determinação de vazão volumétrica não é suficiente para fornecer um resultado confiável de consumo de ar comprimido, haja vista que ocorre pequenas variações de temperatura durante os testes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Tarifas Médias por Classe de Consumo / Região (R\$/MWh). 2005 a 2015. Disponível em: http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1. Acessado em: novembro de 2015.

ATLAS COPCO AIRPOWER NV. Compressed Air Manual. 7ed. 2010.

BEN - Balanço energético nacional, 2015. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf. Acesso em: novembro de 2015.

BOLLMANN, Arno. Fundamentos da automação industrial pneumática: São Paulo: ABHP, 1997.

BONACORSO, Ne. G.; Noll, V. Estude e use – Automação Industrial – Automação Eletropneumática. São Paulo – SP, 2006.

FIALHO, Arivelto Bustamante. Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos. 2004.

MEIXNER, H. Projetos de sistemas pneumáticos - Festo didatic: São Paulo, 1978.

MOTTA, P. R. Avaliação da Administração Pública: Eficiência, Eficácia e Efetividade. FUNDAP, 1990.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. User Guide and Specifications - NI USB-6008/6009 OEM. 2005-2006.

NEGRI, V. J. Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e Controle -PARTE II - Sistemas Pneumáticos para Automação. Florianópolis, 2010.

ROCHA, C. R. e Monteiro, M. A. G. Eficiência energética em sistemas de ar comprimido - Manual prático PROCEL. 2014.

TRAINING, Parker. Tecnologia Eletropneumática Industrial. Jacareí, SP, agosto, 2001.

