

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.



## Conservação e reutilização de ar comprimido em reservatório de látex

### *Conservation and reuse of compressed air in latex reservoir*

*Recebido: 06/06/2023 – Aprovado: 29/09/2023 – Publicado: 01/10/2023*

*Processo de Avaliação: Double Blind Review*

João Carlos de Sousa  
[jcsmetallica@gmail.com](mailto:jcsmetallica@gmail.com)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0009-0008-8859-673X>

Robert Duraes Alves  
[robertalves79@gmail.com](mailto:robertalves79@gmail.com)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0009-0003-7605-4996> -

Fábio Nascimento Palácio dos Santos  
[fabionps@hotmail.com](mailto:fabionps@hotmail.com)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0009-0003-2211-587X>

Josias Teixeira  
[josiasteixeira81@gmail.com](mailto:josiasteixeira81@gmail.com)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0009-0000-0203-152X>

Luiz Carlos Domingues  
[luixov@gmail.com](mailto:luixov@gmail.com)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0009-0004-0005-5906>

Wilamy Bezerra Primo  
[wilamyprimo2017@gmail.com](mailto:wilamyprimo2017@gmail.com)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0009-0008-0621-0857>

André Rosa Ferreira  
[andre.rferreira@fatec.sp.gov.br](mailto:andre.rferreira@fatec.sp.gov.br)  
FATEC- Osasco  
<https://orcid.org/0000-0002-4946-6851>

## RESUMO

O objetivo desse estudo foi a de demonstrar o comportamento de um circuito pneumático utilizando-se de um reservatório de látex para recepção e armazenamento de ar com o objetivo de comprovar seu funcionamento e eficiência energética de forma que o ar de um dos pistões utilizados não fosse expelido para a atmosfera durante a operação e sim coletado e armazenado para que, posteriormente e ainda durante a operação do sistema, fosse reaproveitado. No resultado concluiu-se que com o uso do reservatório de látex foi possível reaproveitar o ar no acionamento de um dos atuadores, permitindo então, que um menor volume de ar fosse demandado para seu funcionamento se comparado a um sistema sem tal implementação, processo considerado incomum na indústria em geral, com isto, podendo ser implantado na prática para atender os anseios de sustentabilidade e eficiência energética tendo como resultado também a redução de custo de energia.

**Palavras Chaves:** eficiência energética, ar comprimido, reservatório de látex

## ABSTRACT

*The purpose of this study was to demonstrate the behavior of a pneumatic circuit using a latex reservoir for air reception and storage, with the aim of proving its functionality and energy efficiency. The goal was to prevent the air from one of the pistons used from being expelled into the atmosphere during operation, but rather collected and stored for subsequent reuse while the system was still operational. The results concluded that by using the latex reservoir, it was possible to reuse the air to actuate one of the actuators, thereby reducing the volume of air required for its operation compared to a system without such implementation. This process is considered uncommon in the industry in general. Consequently, it can be implemented in practice to meet sustainability and energy efficiency goals, resulting in reduced energy costs.*

**Keywords:** energy efficiency, compressed air, latex reservoir

## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria a produção de ar comprimido é um processo que pode ser considerado caro em muitas situações, pois o custo do volume de ar produzido pelo compressor pode ter um peso financeiro significativo para sua produção, visto que esse, deve ser acionado por um motor elétrico, o que impacta diretamente nos custos de

consumo de energia elétrica para sua geração, sendo então, um desafio financeiro para quem o consome, o que torna a competitividade entre as empresas, cada vez mais acirrada nos dias atuais e que só tende a impulsionar ainda mais a busca por soluções mais econômicas nas linhas de produção.

Um processo em que se utiliza de ar comprimido, seja ele industrial ou não, de maneira geral, deve incluir uma fonte geradora de ar (compressor), um projeto e uma instalação de uma rede de distribuição, bem como seus pontos de consumo.

O objetivo desse estudo é de demonstrar o comportamento de um sistema pneumático composto por um reservatório feito de material em látex, aproveitando-se de suas características elásticas para armazenar um determinado volume de ar do sistema em si, para recompor parte do funcionamento de um circuito pneumático, onde, através de medições, poder observar possíveis ganhos energéticos através da redução de ar fornecido pelo compressor, quantia essa, que seria até então, dispensada para a atmosfera durante ciclos de operação. No experimento foram aplicados cálculos para se medir a eficácia do sistema, observando-se possíveis ganhos energéticos através da conservação de energia, o que viria portanto, proporcionar prováveis ganhos financeiros.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico deste trabalho foi construído com base na ideia de reaproveitamento de ar através de um método não usual na indústria em geral. Dada sua enorme presença no ambiente industrial, o ar comprimido por desempenhar funções relevantes em diversos segmentos e processos, tem sido usado de maneira considerável em montagens de linhas de produção de maquinários, veículos, entre outros.

A condição incerta do mercado de energia primária, altas flutuações de preços e problemas ambientais estão impulsionando o setor industrializado países a adotar medidas corretivas para melhorar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental (Benedetti et. al. 2018).

O sistema de geração, tratamento, transporte e utilização de ar comprimido é uma das utilidades que mais consomem energia em plantas industriais. Na maioria dos casos, a gestão do sistema de ar comprimido é subestimada, mesmo que na Europa o ar comprimido represente um consumo industrial de eletricidade entre 10% e 25% do total (Benedetti; Cesaroti e Introna, 2017).

Em sistemas de atuação pneumáticos, com atuação discreta, o ar pressurizado é geralmente eliminado para o ambiente após a realização de trabalho mecânico. No cenário atual, onde as exigências por redução de consumo de energia representam grande impacto na escolha de uma solução tecnológica, é de fundamental importância o desenvolvimento de técnicas que possam, de forma parcial, reaproveitar essa energia potencial que é descartada. Esse reaproveitamento é um tema bastante amplo e diferentes soluções podem ser aplicadas (Farias, 2020).

Diante do exposto, desenvolveu-se um dispositivo de armazenamento em látex para a captura do ar comprimido (que até então era liberado para a atmosfera) através de uma válvula de acionamento de um dos atuadores pneumáticos durante suas operações de avanço ou retorno. Essa solução permitiu o reaproveitamento do volume de ar anteriormente desperdiçado, o qual pôde ser utilizado em uma das operações dentro do próprio sistema.

Considerando os problemas dos dispositivos tradicionais de armazenamento de ar comprimido como baixa eficiência energética, baixa densidade de energia e desafios de portabilidade, foi proposto um dispositivo de armazenamento de ar comprimido flexível e isobárico com base em um material de borracha hiper elástica. (Du; Bian; Xiong, 2022).

### **3. METODOLOGIA:**

A proposta foi montar um sistema pneumático capaz de reutilizar o ar expelido para a atmosfera por um dos escapes das válvulas que acionariam um atuador em um circuito pneumático. No âmbito da compreensão de processos e sistemas, as práticas no processo do ensino de engenharia focam-se no uso de bancadas didáticas. Estas bancadas são ferramentas que auxiliam a realização de experimentos a partir da possibilidade de montagem e simulação desses sistemas e circuitos (Fabián, 2017).

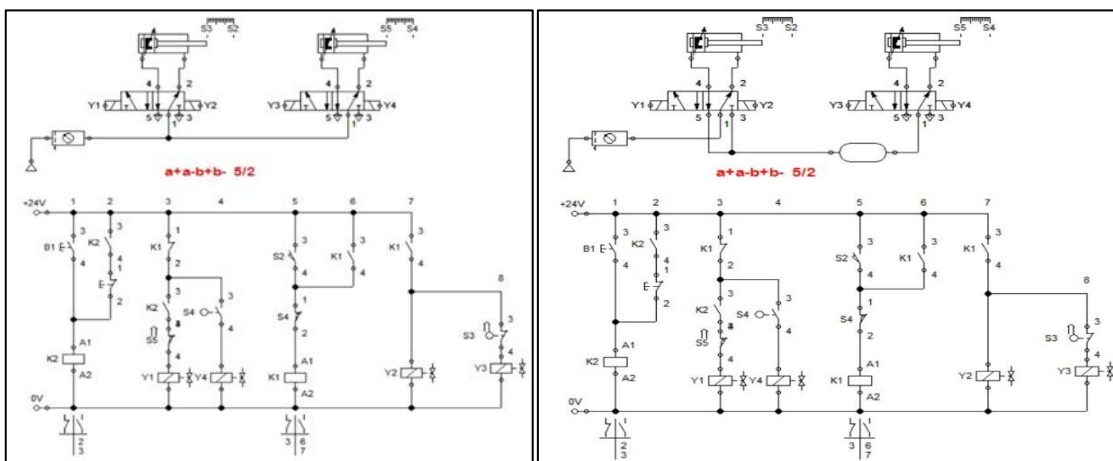
Com o intuito de viabilizar o reaproveitamento do ar comprimido expelido durante as operações de avanço e/ou retorno de um dos atuadores pneumáticos, adotou-se uma solução engenhosa: a utilização de um reservatório de látex, exercendo o papel crucial de capturar e armazenar o ar expelido, permitindo que seu volume acumulado fosse aproveitado em uma operação subsequente, envolvendo outro atuador pneumático. Nessa configuração, elaborou-se um circuito para funcionamento de um ciclo contínuo a fim de coletar dados para cálculos posteriores.

Fora desenvolvido então um circuito com dois atuadores com a logica: A + A - B + B - em que se pudesse coletar e armazenar o ar expelido durante a atuação do primeiro atuador para ser reutilizado no acionamento do segundo atuador. Para o reservatório intermediário optou-se por utilizar uma mangueira de látex de 20 cm com um conector de engate rápido em uma das extremidades e a outra fechada para que se mantivesse o ar selado.

Testes anteriores em bancada mostraram que armazenar o ar de uma das saídas de escape da válvula (avanço e retorno) não fora suficiente para operar o outro atuador. Portanto, decidiu-se por adaptar o circuito para operações em tal sequência. Desse modo, o ar é coletado durante o avanço e retorno do primeiro atuador onde é, posteriormente, usado para acionar o segundo. Inicialmente, o circuito foi montado em um *software* dedicado de maneira convencional Figura 01 e, após o teste, adicionou-se o reservatório em látex. Figura 02.

Figura 01 - Circuito A+A-B+B-

Figura 02 – Circuito A+A-B+B- com reservatório



Primeiramente optou-se em montar o sistema com válvulas eletropneumáticas assim o ar comprimido só seria utilizado para fazer a atuação dos pistões, utilizando a menor quantidade de ar possível.

Após a realização de testes no *software*, observou-se que ao colocar o sistema em operação com o reservatório, o segundo pistão teve uma demora no avanço e retorno.

Ao montar o circuito em bancada Figura 03 e 04, se utilizando de duas válvulas solenoides de 5/2, notou-se que o segundo atuador (operado por uma delas) não funcionou corretamente pelo fato de a válvula em questão não possuir retorno por mola, essa por sua

vez, viria atuar na liberação do ar armazenado para a atmosfera assim quando se recebesse o sinal enviado para avançar o pistão, dessa maneira, o ar seria expelido até que outro sinal fosse enviado para retornar o pistão.

Figura 03 – Circuito em bancada

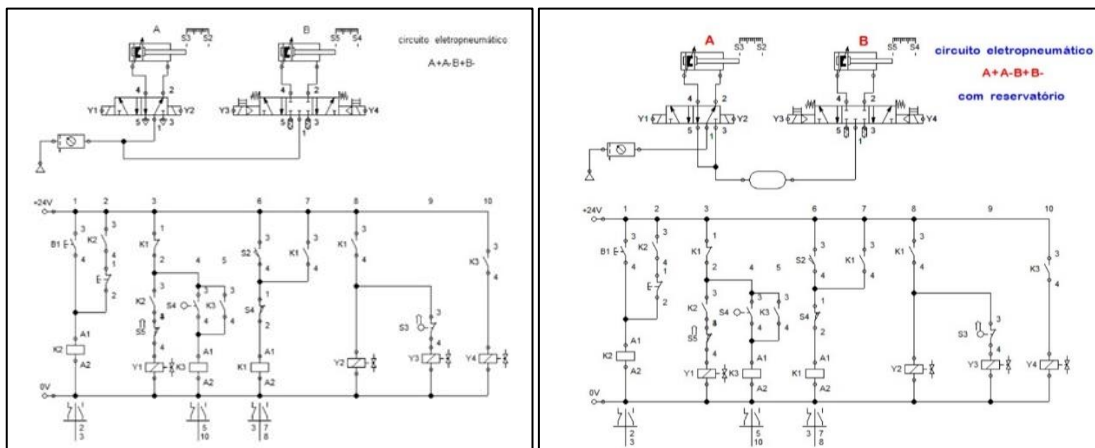
Figura 04 – Circuito em bancada



Diante disso, foi desenhado um novo circuito utilizando-se uma válvula solenoide de 5/3 com centro fechado, dessa forma, o ar armazenado não seria expelido durante sua atuação, pois as válvulas 5/3 possuem retorno por mola e sempre retornam ao centro, selando assim, o reservatório como se pode observar nas Figuras 05 (sem reservatório) e 06 (com reservatório).

Figura 05 – Circuito sem reservatório

Figura 06 – Circuito com reservatório



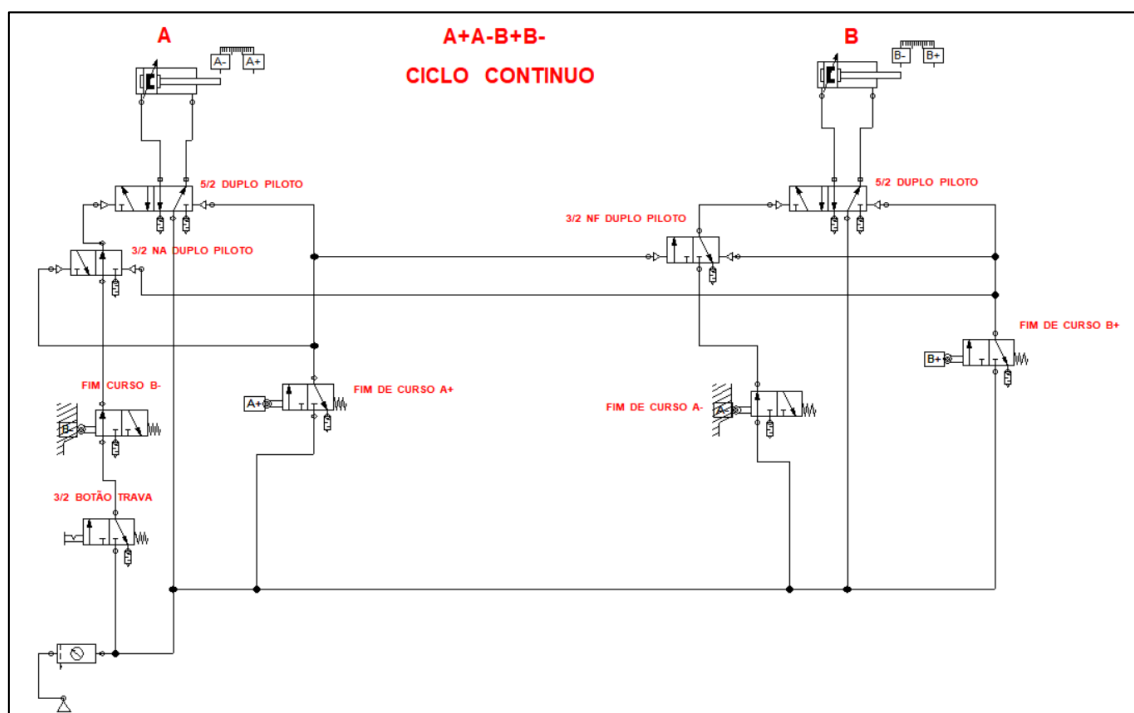
Após a montagem e realização de testes no *software*, o sistema foi implementado fisicamente, no entanto, não funcionou devido ao travamento da válvula 5/3. A pressão interna do reservatório de látex se mostrou insuficiente para operar a entrada da válvula, portanto, não se obteve êxito nos testes, sendo assim, optou-se por montar um circuito pneumático simples com operação de dois atuadores pneumáticos de dupla ação, denominados como “A” e “B” operando-se na sequência A+A-B+B- Figura 07.

Para se definir um padrão de operação, realizou-se a montagem do circuito demonstrado na Figura 07, operando com uma pressão de linha de 2 bar para coleta de dados como tempo de operação, vazão de ar comprimido, pressão, consumo de energia e volume de ar necessário para a operação do sistema para 500 ciclos. Para verificar a eficiência do sistema, se comparou todos os dados coletados com o sistema de recuperação implantado.

Contudo, foi desenvolvido o sistema de reaproveitamento de ar (descrito no parágrafo seguinte) para realizar a coleta de dados de operação, análise dos dados e por fim, chegar a uma conclusão sobre qual sistema seria mais viável e se realmente há eficiência energética nesse sistema. Também foram instalados sensores de vazão na entrada de ar do sistema e na alimentação da válvula do pistão B.

Para montagem do circuito padrão sem a utilização do sistema de reaproveitamento foram utilizados 2 atuadores de dupla ação, 2 válvulas 5/2 vias duplo piloto, 1 válvula 3/2 NA duplo piloto, 1 válvula 3/2 NF duplo piloto, 1 Válvula 3/2 vias, NF acionamento por botão por trava, retorno por mola, 4 Válvulas 3/2 vias, NF acionamento por rolete, retorno por mola, a pressão no sistema foi de 2 bar com 500 ciclos.

Figura 07 – Circuito pneumático convencional com dois atuadores



### 3.1. Sistema 1

Na segunda montagem com reservatório de látex os testes seguiram com o armazenamento do ar do escape da válvula 1 para acionar a válvula 2 (responsável pelo acionamento do atuador B) e também realizou-se uma modificação na válvula 5/2 (responsável pelo acionamento do atuador A), retirando os silenciadores e montando as saídas em série com a entrada da válvula 5/2 (responsável pelo acionamento do atuador B), como pode ser observado nas Figuras 08 e 09, além disso, também foi adicionada uma válvula unidirecional para que a pressão do reservatório não voltasse para o escape.



Figura 08 - Circuito com reservatório integrado

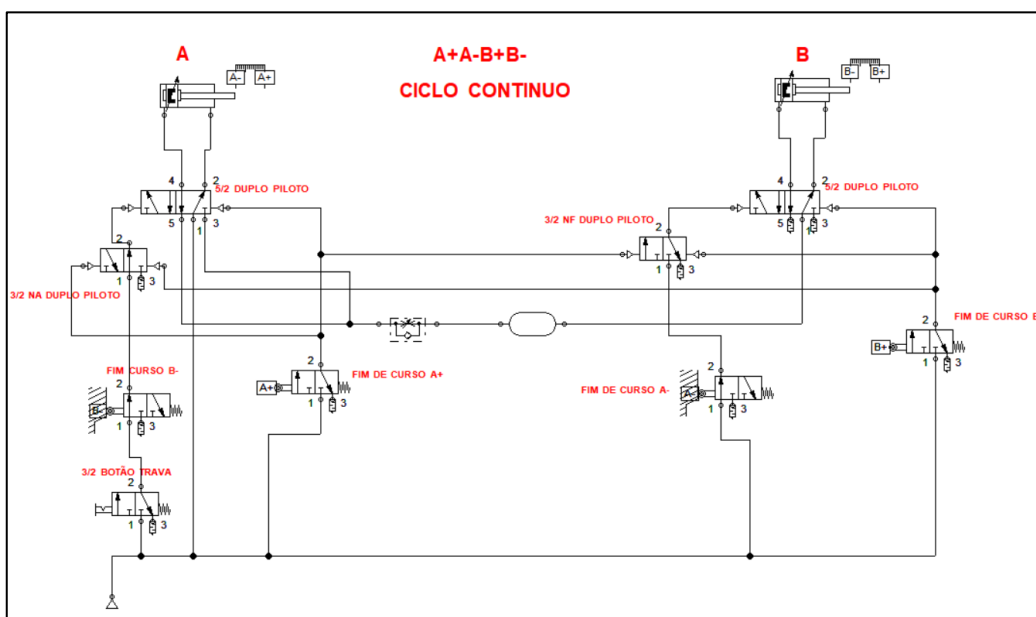
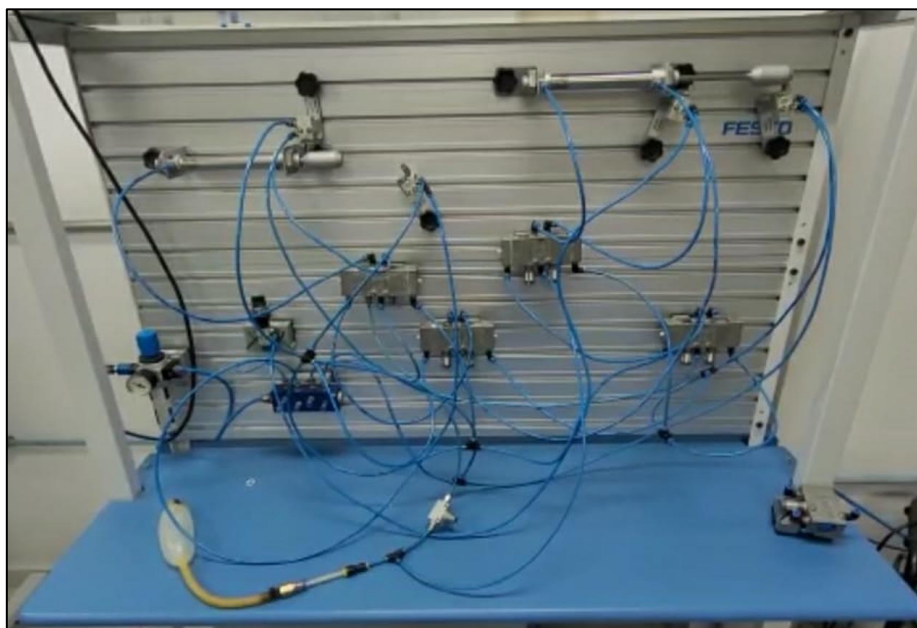


Figura 09 - Circuito com reservatório de látex



Para o armazenamento do volume de ar que fora expelido pelo avanço do atuador A foi utilizado um tubo de látex com 6mm de diâmetro externo (medida sem volume de ar acumulado) e com 30 cm de comprimento, conforme figura Figura 10.

Figura 10 – Tubo de látex



Iniciou-se em seguida os testes com 2 bar de pressão, onde, para que se pudesse operar o atuador B, se fez necessário utilizar-se do ar captado pelo atuador A, por isso, montou-se o sistema na sequência A+A-B+B- onde o atuador A viria a avançar e retornar antes do avanço do atuador B para que, dessa forma, o ar captado do escape fosse armazenado e utilizado na operação do atuador B. Dessa maneira, o sistema foi capaz de operar de forma contínua desde os primeiros ciclos apesar do atuador B ter demorado um pouco para avançar e retornar logo no início. Após 3 ciclos, o sistema operou em sua velocidade normal, onde o ar armazenado no reservatório foi mais do que suficiente para operar o atuador B.

Para medir a pressão interna do reservatório de látex foi utilizado um manômetro analógico que apresentou uma pressão interna de 1bar, isso durante a operação do sistema com 2 bar, após vários ciclos, o ar captado pela válvula modificada e armazenado no reservatório de látex se mostrou maior do que a necessidade de consumo para se operar do atuador B, com isso o reservatório expandiu-se a cada ciclo, podendo-se concluir que se o mesmo continuasse operando haveria um potencial risco de rompimento.

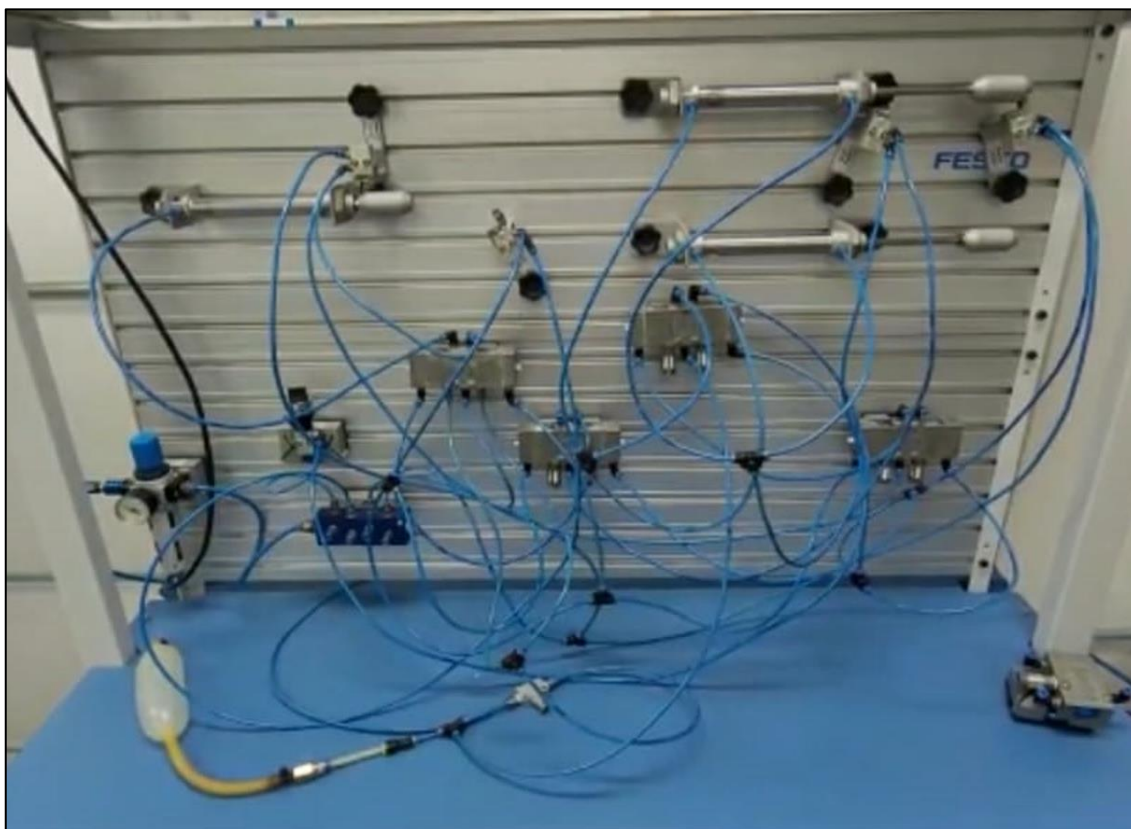
Como se identificou que o ar captado durante o avanço e retorno fora mais do que o suficiente para operar o atuador B, se fez necessário a execução de testes captando somente o ar expelido pelo retorno do atuador A para se tentar operar o atuador B, entretanto, o ar captado durante o retorno não se mostrou capaz de operar o atuador B, pois, o ar armazenado no reservatório não fora o suficiente para fazer o avanço e o retorno do atuador B. Também se fez um teste captando o ar do avanço do atuador A e esse, por sua vez, conseguiu acionar o atuador B, porém, de forma intermitente, onde nem todas as vezes o ar armazenado se fez capaz de acionar o avanço e o retorno do atuador B.

Contudo, para poder se operar apenas com o avanço ou retorno, o reservatório de látex não poderia iniciar seu o ciclo sem volume de ar, houve a necessidade de se ter uma quantia mínima de ar armazenado em si e só assim, após ocupado com 20% de sua capacidade, o sistema fora ligado com 2 bar de pressão para operar apenas captando o ar do retorno do atuador A. Desde os primeiros ciclos o sistema se apresentou com um funcionamento perfeito e o reservatório então funcionou como um pulmão, enchendo durante a captação da atuação de A e esvaziando um pouco durante a ação de B.

Ao passar um tempo pode-se notar que a cada ciclo, o ar armazenado no reservatório fora diminuindo até se esvaziar, o mesmo ocorreu quando se captou somente o ar do avanço nos mesmos moldes, podendo-se concluir que se captando apenas o ar de avanço ou de retorno, não seria o suficiente para operar por longos períodos.

Como nos primeiros testes não se consumiu o ar captado e armazenado do avanço e retorno de forma equalizada pelo atuador B, decidiu-se por adicionar um terceiro atuador para ser operado pelo volume armazenado pelo reservatório de látex. Para esse teste captou-se o ar do avanço e retorno do atuador A para se observar a capacidade de operação sem que o reservatório se rompesse. Durante um longo período de testes, após adicionar o terceiro atuador Figura 11 o sistema foi ligado com o reservatório vazio e desde os primeiros ciclos ele teve seu funcionamento de forma equalizada e o reservatório de látex trabalhou como um pulmão durante a operação de captação do avanço e retorno do atuador A.

Figura 11 – Sistema com 3 atuadores



O sistema então, teve seu funcionamento conforme o desejado, onde pode-se realizar a coleta de dados a serem analisados durante a operação dos 500 ciclos, contudo, observou-se que o sistema se utilizou de um tempo maior para completar sua operação convencional.

### 3.2. Sistema 2

Como o sistema 1 apresentou uma diferença considerável de tempo de operação dos 500 ciclos, necessitou-se de um novo teste, no qual foi redesenhado um novo sistema Figura 12, em que se utilizou das válvulas 5/2 com duplo piloto, para se pilotar as válvulas 5/2 (responsável por operar os atuadores no lugar das válvulas 3/2 com duplo piloto), as quais não são encontradas no mercado brasileiro, presentes apenas no *software* simulador. Como nos testes anteriores notou-se que as válvulas em questão operavam com uma saída aberta jogando o ar para a atmosfera e que o volume de ar captado era insuficiente para operar o atuador B durante vários ciclos, se fez uma modificação aproveitando-se uma dessas saídas que operavam abertas para direcionar o ar ao reservatório de látex, a fim de se compensar a falta de ar do sistema. No entanto, não houve êxito ao ligar o sistema após

a modificação da válvula isso ocorreu devido à pressão que retornava para a saída que estava aberta travando a válvula impedindo o fluxo de ar.

Também tentou-se captar o ar do escape da válvula responsável pelo acionamento do atuador B, volume esse proveniente do reservatório de látex, tentativa na qual não se obteve sucesso em função da pressão interna do reservatório ser muito baixa e não sendo o suficiente para se operar a válvula com uma das saídas obstruídas. No intuito de solucionar tal dificuldade, optou-se por aumentar a pressão do sistema para 3 bar e adicionou-se um silenciador em cada uma das saídas que se encontravam abertas em vez de obstruí-las.

Após as modificações que incluíram a instalação de silenciadores, um sensor de pressão digital, um reservatório com 20 cm de comprimento aliado ao aumento da pressão, o sistema entrou em funcionamento recuperando o ar só durante o avanço do atuador A e funcionou nas condições desejadas Figura 13 desde seus primeiros ciclos, com valores apresentados pelo sensor de pressão entre 0,6 e 1,2 bar, com a maior pressão durante a captação de ar e a menor durante o uso pelo atuador B. Dessa maneira, o reservatório teve seu funcionamento como um pulmão, como demonstram as Figuras 14, 15 e 16.

Figura 12 – sistema redesenhado

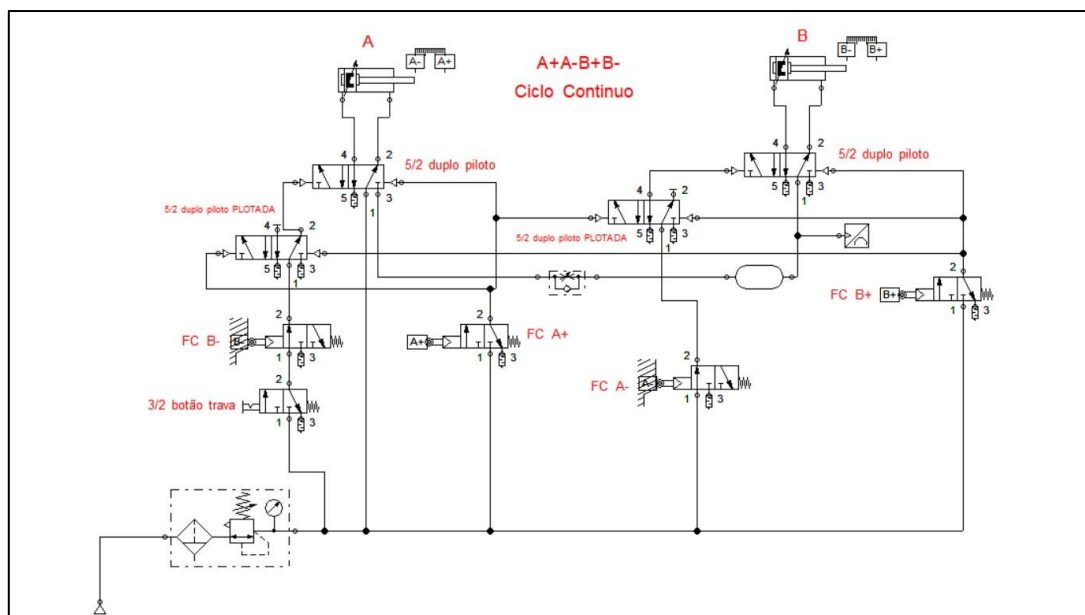


Figura 13 – Sistema com reservatório

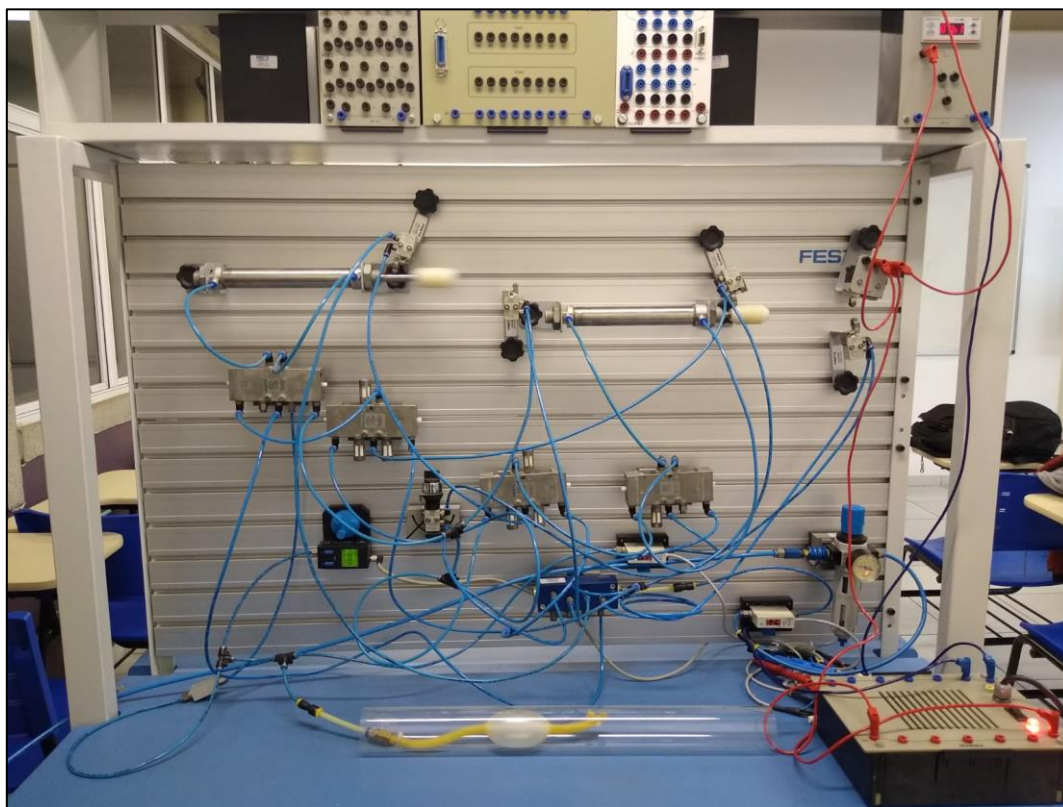


Figura 14 – Reservatório em funcionamento como um pulmão

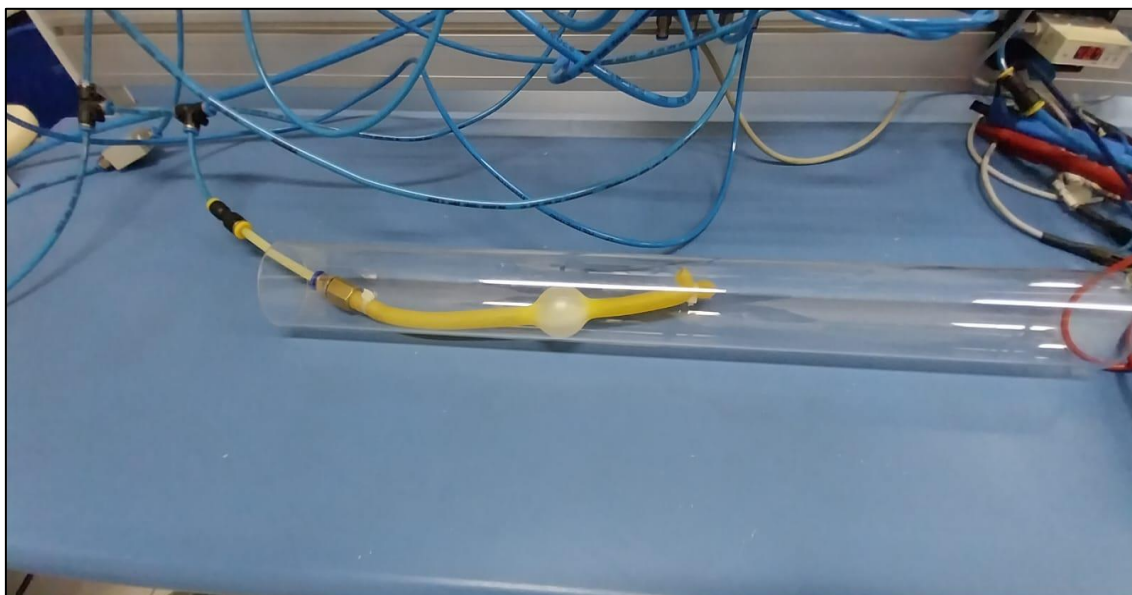


Figura 15 – Reservatório em funcionamento como um pulmão

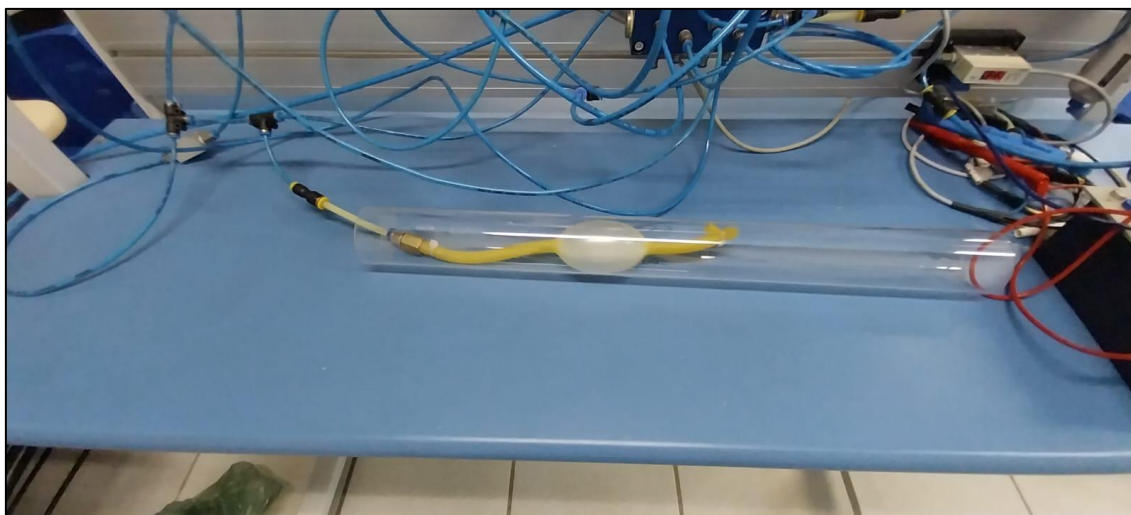
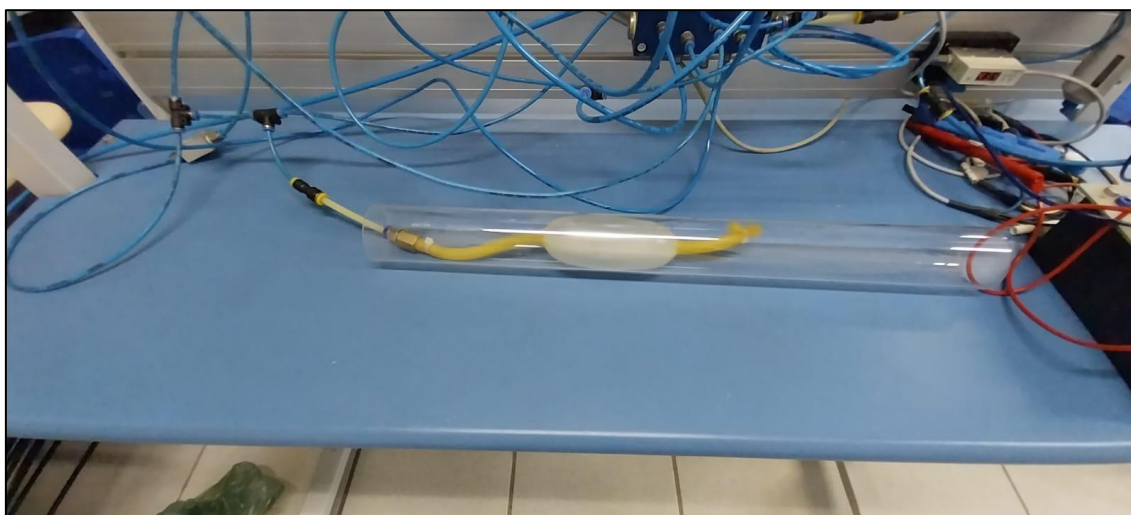


Figura 16 – Reservatório em funcionamento como um pulmão



Assim como nos sistemas anteriores, realizou-se a coleta de dados de operação de 500 ciclos, para fins de comparação de eficiência energética.

### 3.3. Coleta de dados:

Pode-se observar na tabela 1 que o sistema 1, o qual operou-se com a mesma pressão de trabalho do outro convencional de 2 bar, utiliza-se de 2 atuadores em paralelo, na saída da válvula alimentada pelo reservatório de látex e devido as dificuldades explicadas na descrição do seu funcionamento, o sistema teve um aumento considerável no seu tempo de operação, aumento esse que obtido em função da restrição do ar para atmosfera, das duas saídas da válvula de acionamento do atuador A, o que fez com o que

o sistema operasse de maneira mais lenta, contudo, o sistema 2, que opera com 3 bar de pressão e pode ser comparado com o sistema convencional de 3 bar, utilizou-se somente a saída de ar do avanço do atuador A, onde obteve-se um tempo bem próximo ao do sistema convencional.

**Tabela 1** - Coleta de dados de operação

<b>Sistemas</b>	<b>Pressão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Tempo de Operação</b>
Sistema convencional 2 bar	2 bar	49 l/min	09:14
Sistema 1	2 bar	38 l/min	15:18
Sistema convencional 3 bar	3 bar	60 l/min	08:46
Sistema 2	3 bar	52 l/min	10:20

Fonte: Elaboração própria.

Conforme os dados acima, foram realizadas simulações considerando uma hora de trabalho, das quais para esta simulação, foi calculada a quantidade de ciclos por minuto (Cm) dos 4 sistemas ensaiados.

Sistema convencional com 2 bar: Operação de 500 ciclos → 09:14 minutos, logo,  $500 \div 9,14 = 54,704$  ou seja, (Cm) = 54,704 ciclos/minuto

Sistema 1: Operação de 500 ciclos → 15,18 minutos, logo  $500 \div 15,18 = 32,938$  ou seja, (Cm)= 32,938 ciclos/minuto

Sistema convencional com 3 bar: Operação de 500 ciclos → 08:36 minutos, logo,  $500 \div 8,36 = 59,809$  ou seja, (Cm) = 59,809 ciclos/minuto

Sistema 2: Operação de 500 ciclos → 10:20 minutos, logo  $500 \div 10,20 = 49,019$  ou seja, (Cm)= 49,019 ciclos/minuto

## **4. OBJETO PESQUISADO**

### **4.1. Custo do ar comprimido**



O custo do ar comprimido pode variar dependendo de vários fatores, como a região em onde se está localizado, o fornecedor, o tamanho do sistema necessário e a demanda de ar comprimido.

O custo de operação do compressor de ar comprimido pode ser calculado levando em consideração vários fatores, incluindo a potência do compressor, o tempo de operação, o consumo de energia elétrica e a taxa de carga e alívio.

A carga e o alívio do compressor referem-se ao ciclo de operação dele, onde esse, é carregado para comprimir o ar e, em seguida, aliviado para liberar a pressão acumulada. Durante o ciclo de carga, o compressor consome energia elétrica para realizar o trabalho de compressão e, durante o ciclo de alívio, consome menos energia, mas ainda assim, requer uma certa quantidade para manter o sistema de ar comprimido em funcionamento.

É importante considerar que diferentes compressores apresentam eficiências energéticas diferentes podendo variar em seu consumo de energia, portanto, é recomendável consultar especificamente as especificações técnicas do compressor do qual está sendo utilizado, a fim de se obter informações sobre o custo atual do kWh em sua região, para assim, poder estimar, de maneira coerente, o custo de operação.

Na ocasião, utilizou-se de um Compressor 220V trifásico, de 5 HP, com vazão de 20pcm, tanque de 250 litros, com 880rpm, pressão máxima de trabalho de 175psi, rendimento de 79,4% e considerando-se o valor cobrado pela concessionária de R\$0,65/KWh.

Desta forma, se utilizando dos dados de operação dos sistemas, conforme a tabela 1, calculou-se inicialmente o custo de operação de 500 ciclos como padrão em cada sistema.

Para se determinar o custo, foram calculados os valores em carga e alívio, para se ter o custo de operação do compressor conforme a fórmula:

$$Car = \frac{[(Pot. Fs. Fu). (0,736). (Hop). \left(\frac{R\$}{kWh}\right). (%h)]}{n}$$

**Sendo:**

Car = Custo do ar comprimido gerado pelo motor elétrico em R\$;

Pot = Potência do motor em hp;

Fs = Fator de serviço do motor (indicado na placa do compressor);

Fu% = Percentual de operação do compressor – fator de utilização;

%Fuc: Fator de utilização em carga = 1,0

%Fua: Fator de utilização em alívio = 0,4

Constante = 0,736 (conversão de hp para kW)

Hop = N° de horas de operação do compressor

%h = Percentual de operação do compressor

%Hc: Quando em carga (%)

%Ha: Quando em alívio (%)

$\eta$  = Rendimento do motor

$\eta_c$ : Quando em carga (0,95)

$\eta_a$ : Quando em alívio (0,85)

#### 4.2. Custo total do ar comprimido:

$$C_{total} = (C_{carga} + C_{alívio})$$

Onde:

Ctotal = Custo total da energia elétrica (R\$);

Ccarga = Custo da energia elétrica com o compressor em carga (R\$);

Calívio = Custo da energia elétrica com o compressor operando em alívio (R\$)

Substituindo os valores na fórmula, conforme os dados do compressor na tabela 2, foram necessárias algumas conversões com o tempo de operação de minutos para horas, a vazão que antes fora em litros por minuto, passou então, para metros cúbicos por minuto.

Considerando o Hop como o tempo de cada operação, obteve-se os valores de cada operação, destacados em negrito da tabela 3.

**Tabela 2** - Dados do compressor

<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Potência (H.P)	5
Capacidade	250 L
Vazão	20 pcm
FS	1,6
%Fuc	1
%Fua	0,4
R\$/Kwh	0,65
%h carga	0,8
%h alívio	0,2
Rendimento carga	0,95
Rendimento alívio	0,9

Fonte: Fabricante.

**Tabela 3** – Consumo de cada operação (Consumo total baseado no tempo de operação dos 500 ciclos).

	<b>SISTEMA CV 2 bar</b>	<b>SISTEMA 1</b>	<b>SISTEMA CV3 bar</b>	<b>SISTEMA 2</b>
Ciclos/minuto	54	33	57	48
Ciclos totais	500	500	500	500
Pressão (bar)	2	2	3	3
Vazão (m <sup>3</sup> /m)	0,049	0,038	0,062	0,052
Tempo (minutos)	9,23	15,3	8,76	10,33
Tempo (horas) Hop	0,153	0,255	0,146	0,172
Custo em carga (R\$)	0,50	0,82	0,47	0,55
Custo em alívio (R\$)	0,05	0,09	0,05	0,06
<b>Custo total (R\$)</b>	<b>0,55</b>	<b>0,91</b>	<b>0,52</b>	<b>0,61</b>

Fonte: Elaboração própria.

Contudo, para se determinar o custo real da operação, necessitou-se calcular o volume total de ar utilizado, o qual é calculado utilizando-se da seguinte fórmula:

$$\text{Volume} = (\text{Vazão (m}^3/\text{minutos)}) \times \text{rendimento do motor } (\eta) \times \text{Tempo em minutos}$$

Desta forma para determinar o custo final de cada operação basta multiplicar o custo total pelo volume total utilizado por cada sistema, o resultado pode ser observado na tabela 4, nota-se que o custo total de cada operação teve alteração em função do tempo pois cada sistema teve um tempo (x) para a operar durante os 500 ciclos.

**Tabela 4 - Custo total de operação de 500 ciclos**

Variáveis	SISTEMA	SISTEMA 1	SISTEMA	SISTEMA 2
	CV 2 bar		CV 3 bar	
Ciclos/minuto	54	33	57	48
Ciclos totais	500	500	500	500
Volume (m <sup>3</sup> /h)	0,36	0,46	0,43	0,43
Pressão (bar)	2	2	3	3
Vazão (m <sup>3</sup> /m)	0,049	0,038	0,062	0,052
Tempo (minutos)	9,23	15,3	8,76	10,33
Tempo (horas) Hop	0,153	0,255	0,146	0,172
Rendimento	0,794	0,794	0,794	0,794
Custo em carga (R\$)	0,50	0,82	0,47	0,55
Custo em alívio (R\$)	0,05	0,09	0,05	0,06
Custo total (R\$)	0,55	0,91	0,52	0,61

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3. Custo baseado no tempo

Simulou-se ainda, uma operação do sistema, considerando um ano de trabalho de 12 meses, com 22 dias uteis/mês e um turno de operação de 7 horas, dessa forma, utilizando-se da mesma metodologia de cálculos, tanto para o custo quanto para o volume de ar utilizado em cada sistema e através da divisão do Ctotal/volume, pôde-se obter o valor do m<sup>3</sup> em R\$ de cada sistema. Todos esses resultados podem ser observados na tabela 5.

Foram convertidos, o tempo anual, em minutos, onde, com base nos dados da simulação, obteve-se um resultado de 1848 horas trabalhadas por ano.

**Tabela 5 - Custo anual de cada sistema**

Unidade	Sistema	Sistema 1	Sistema CV	Sistema 2
	CV 2 bar		3 bar	
Ciclos/minuto	54	33	57	48
Ciclos totais	6006501	3623529	6328767	5366893
Volume (m <sup>3</sup> /h)	2,33	1,81	2,95	2,48
Volume Total (m <sup>3</sup> )	4313,90	3345,47	5458,40	4578,01
Pressão (bar)	2	2	3	3
Vazão (m <sup>3</sup> /m)	0,049	0,038	0,062	0,052
Tempo (minutos)	110880	110880	110880	110880
Tempo (horas)	1848,0	1848,0	1848,0	1848,0
Rendimento	0,794	0,794	0,794	0,794
Custo do m <sup>3</sup> em R\$	0,66	0,51	0,83	0,70
Custo do sistema em R\$	2.826,24	1.699,75	4.524,81	3.182,91

Fonte: Elaboração própria.

Visando observar a qualidade do material em látex e do restante do sistema, para efeito de teste, realizou-se ainda, 4.000 ciclos em 1:35h, com uma média de 500 operações em um tempo total de 10 minutos, no qual observou-se que o sistema se comportou normalmente, sem qualquer alteração em suas características, inclusive o reservatório de látex.

#### 4.4. Testes para comprovação da eficiência do sistema.

Para tentar comprovar a eficiência do sistema, foram feitos diversos testes utilizando-se de sensores de vazão, tanto na entrada de cada válvula, responsável pela operação dos atuadores, quanto em suas respectivas saídas de escape de avanço / retorno e com o compressor em alívio e em carga.

Primeiramente, se fez um teste para saber quantos ciclos o sistema convencional era capaz de realizar utilizando-se do compressor no modo de alívio. O teste se iniciou

com o compressor em sua capacidade total de 250 l e finalizaria quando esvaziasse e sem entrar em carga, para fins de comparação com o sistema 2.

A pressão inicial foi de 3 bar, para esse teste, não foi coletado dados de vazão de entrada e saída, o intuito era identificar quantos ciclos o sistema seria capaz de realizar com um determinado volume de ar comprimido, o sistema entrou em operação com 3 bar de pressão na linha e foi capaz de realizar 977 ciclos em 20:43 segundos e após 450 ciclos realizados, a pressão de 3 bar entrou em queda, até zerar ao final dos 977 ciclos.

Finalizado a operação com o sistema convencional, iniciou-se o teste do sistema 2, o qual, é composto por 2 atuadores, sendo um desses, operado pela pressão da linha e o outro pelo ar recuperado da saída de escape (avanço), onde posteriormente seria armazenado no reservatório de látex.

Iniciou-se o teste com o compressor cheio em alívio em sua capacidade total de 250 l, a pressão da linha também em 3 bar e dados de vazão e pressão foram desconsiderados. O sistema foi capaz de realizar 485 ciclos até a pressão da linha cair para 2,5 bar de pressão essa sendo insuficiente para o sistema operar de forma equalizada. O sistema se manteve em operação durante 10:57 minutos e na ocasião, não houve a possibilidade de se realizar o teste até que o compressor se esvaziasse.

Realizados mais 2 testes, tanto com o sistema convencional quanto com o sistema 2, onde esses tiveram início com o compressor cheio em sua capacidade total e sendo finalizado no momento que o compressor entrasse em carga. Dados de vazão e pressão, desconsiderados. Iniciaram-se então, os testes com 3 bar de pressão na linha, onde, na ocasião, o sistema convencional fora capaz de realizar 450 ciclos em 07:57 minutos antes do compressor entrar em carga.

O sistema 2 teve uma capacidade de realizar 485 ciclos em 10:56 minutos antes de o compressor entrar em carga.

Após os testes com o compressor em alívio e em carga, realizou-se testes com medidores de vazão em (l/min) no intuito de saber qual volume de ar entraria em cada sistema e quanto ar era seria expelido pelos escapes, jogados na atmosfera, a fim de comparar com o sistema com recuperação de ar.

Se fez testes com 2 e 3 bar de pressão em linha, em que para esse, foi desconsiderada a questão de quantidades de ciclos ou tempo operando já que o intuito seria medir as vazões para cálculos posteriores, uma vez já realizados os mesmos, coletando dados de vazão, pressão e quantidade de ciclos por tempo.

O primeiro teste, se fez com o sistema convencional, iniciando-se com 2 bar de pressão na linha, onde, para a situação, as 2 válvulas responsáveis por pilotar os atuadores, foram modificadas retirando-se os silenciadores e colocando conectores de engate rápido para ligar os medidores nas mesmas.

Ligou-se ainda, medidores de vazão, tanto na entrada (1), responsável pela alimentação da válvula 5/2, quanto nas saídas de escape (3 e 5), de avanço e retorno figura 17 feita no *software* e na forma prática figura 18.

Figura 17 – Sistema com medidores e contador (Software)

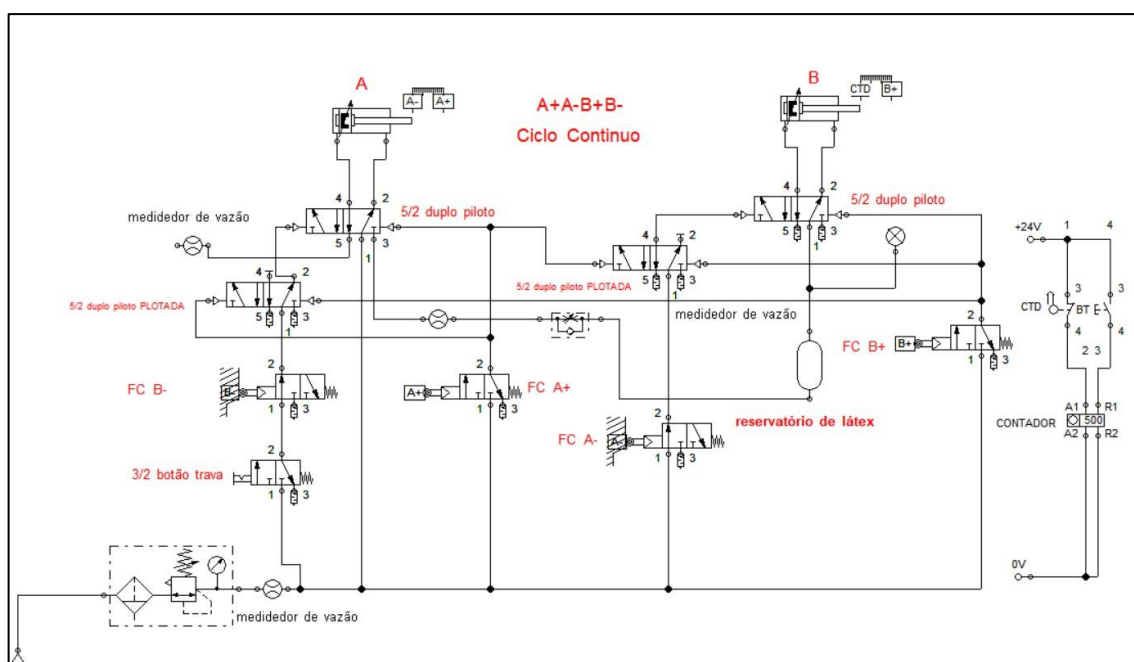
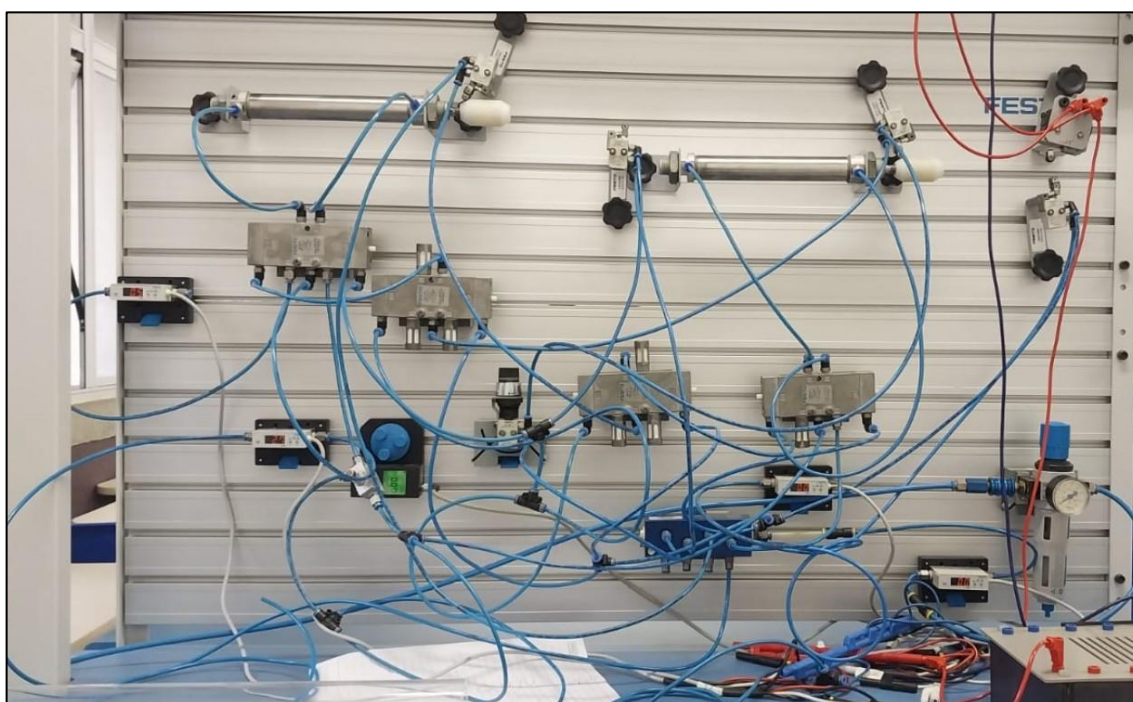


Figura 18 – Sistema com medidores e contador (Prática)



**Tabela 6** - Dados para o sistema convencional (Iniciando com 2 bar de pressão):

ORIGEM	DADOS
Vazão de entrada do sistema	50 l/min
Vazão de entrada das válvulas que operam o atuador	21 e 23 l/min
Vazão do escape avanço	22 e 23 l/min
Vazão do escape retorno	21 e 22 l/min

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7** - Sistema convencional iniciando com 3 bar de pressão (para 2 atuadores, considerando o sistema funcionando com 2 atuadores ligados a linha).

ORIGEM	DADOS
Vazão de entrada da linha	60 l/min
Vazão de entrada das válvulas	26 e 27 l/min
Vazão do escape avanço	28 e 29 l/min
Vazão de escape retorno	27 e 28 l/min

Fonte: Elaboração própria



Sistema 2, recuperando o ar do avanço do atuador A. iniciando os testes com 2 bar de pressão, do qual para essa operação, o reservatório de látex iniciou-se cheio para que se fosse capaz de operara-lo desde os primeiros ciclos. O intuito do teste em questão, fora apenas comparativo com o sistema convencional, que também teve dados coletados e dados iniciando com a mesma pressão.

**Tabela 8** – Dados do teste comparativo com o sistema convencional

<b>Origem</b>	<b>Dados</b>
Vazão de entrada do sistema	38 l/min
Vazão entrada válvula atuador A	21 l/min
Vazão escape retorno	12 l/min
Vazão escape avanço	15 l/min
Vazão válvula que é operada pelo sistema de recuperação	20 l/min
Vazão do escape avanço da válvula	10 l/min
Vazão do escape retorno	6 l/min

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 9** - Sistema 2 iniciando com 3 bar de pressão:

<b>ORIGEM</b>	<b>DADOS</b>
Vazão de entrada do sistema	52 l/min
Vazão entrada válvula atuador A	26 l/min
Vazão escape retorno (com sistema em operação onde o avanço da válvula joga o ar para o reservatório)	28 l/min
Vazão escape avanço recuperando	27 l/min
Vazão escape retorno recuperando	16 l/min
Vazão entrada válvula operada pelo reservatório de látex	27 l/min
Vazão escape avanço válvula reservatório	15 l/min
Vazão escape retorno válvula reservatório	9 l/min
Pressão interna do reservatório de látex em operação durante os testes	0,8 bar
Teste de vida útil	5740 ciclos
Teste vida útil 2	5850 ciclos

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.5. Análise dos testes:

Durante os testes com o compressor em alívio, foi observado que ambos os sistemas apresentaram perda de velocidade de operação após um certo número de ciclos. Isso ocorreu devido à variação da pressão, uma vez que o compressor não entrou em carga para manter a pressão de linha estabilizada em 3 bar. Essa variação de pressão afetou o desempenho dos dois sistemas.

No caso do sistema convencional, ele foi capaz de completar o teste até o final. No entanto, após cerca de 450 ciclos, a velocidade em que cada ciclo era completado começou a diminuir progressivamente até parar completamente quando o compressor ficou sem ar. Conforme os ciclos eram realizados, a pressão do sistema diminuía de 3 para 2, de 2 para 1 e, finalmente, de 1 para 0 bar.

Quanto ao sistema 2, que recupera o ar, ele não foi capaz de concluir o teste, pois ele requer uma pressão estabilizada de 3 bar para funcionar corretamente. Em pressões abaixo desse valor, o sistema perde eficiência, uma vez que o ar coletado e armazenado não é suficiente para operar o reservatório de forma equilibrada. Por outro lado, se a pressão ultrapassar os 3 bar, o ar armazenado não é utilizado de forma equilibrada,

causando a expansão excessiva do reservatório a cada ciclo, o que pode resultar em seu rompimento.

O sistema 2 parou após 485 ciclos devido à queda de pressão. Para fins de comparação entre os dois sistemas, foram realizados mais dois testes com o compressor em alívio, mas interrompendo o teste quando o compressor entrasse em carga, em vez de esvaziá-lo. No teste do sistema convencional, iniciando com 3 bar de pressão, foram realizados 450 ciclos em um pouco mais de 7 minutos. Antes do compressor entrar em carga, foi observado que essa quantidade de ciclos foi a mesma alcançada no teste com o compressor em alívio até esvaziar, quando a pressão caiu.

No caso do sistema 2 recuperando o ar, também se iniciou com 3 bar e foram realizados 485 ciclos antes do compressor entrar em carga, a mesma quantidade de ciclos em que ele parou de funcionar nos testes de alívio até esvaziar. O sistema 2 concluiu essa quantidade de ciclos em um pouco mais de 10 minutos. Observa-se que, apesar de realizar mais ciclos do que o sistema convencional, ele leva consideravelmente mais tempo para concluí-los.

Nos testes em que foram medidas as vazões dos sistemas, foram realizados cálculos para determinar se o sistema recuperando o ar expelido para a atmosfera era mais eficiente do que o sistema convencional. O sistema convencional exigiu uma vazão maior do que o sistema 2 recuperando para funcionar adequadamente, porém completou a mesma quantidade de ciclos em menos tempo. Por outro lado, o sistema 2 recuperando foi capaz de realizar mais ciclos do que o sistema convencional com a mesma quantidade de ar em metros cúbicos.

Durante os testes com a medição das vazões, notamos que a adição dos medidores de vazão afetou o desempenho dos dois sistemas. O sistema convencional demorou um pouco mais para completar os ciclos, enquanto o sistema 2 necessitou de uma pressão de linha maior, o que resultou em uma vazão maior para funcionar de forma equilibrada. Em resumo, a velocidade de operação afeta a capacidade do sistema 2 de produzir o ar necessário para ser armazenado no reservatório.

Também foi possível identificar o motivo pelo qual o sistema 2 não consegue operar corretamente ao recuperar o ar do retorno do atuador A. Isso ocorre devido à sua vazão. Sabendo que  $F = P * A$ , quando o atuador A entra em operação, a área em que o ar atua no pistão é maior, fazendo com que ele avance mais rapidamente e produza um maior fluxo ou vazão de ar, chegando a 27 l/min ou até mesmo 30 l/min, para ser

armazenado no reservatório. Essa vazão é maior do que a vazão de entrada na própria válvula, que foi medida em 26 l/min. No entanto, ao realizar o mesmo teste, mas recuperando o ar do retorno, o ar de entrada na válvula continua sendo 26 l/min, enquanto o ar recuperado durante o retorno é significativamente menor, caindo para 16 l/min. Portanto, essa quantidade é insuficiente para operar o atuador B em seu avanço e retorno de maneira adequada.

## 5. RESULTADOS

Atualmente, devido ao alto custo associado à geração de ar comprimido em plantas industriais, são necessários a busca de soluções mais econômicas. Nesse sentido, após diversos testes realizados, concluiu-se que o reaproveitamento do ar comprimido por meio do reservatório de látex é uma possibilidade. No entanto, esse processo envolve variáveis e fatores diversos.

A partir dos estudos das operações mencionadas, pode-se concluir que o reaproveitamento do ar comprimido, quando realizado utilizando as duas saídas que originalmente iriam para a atmosfera (sistema 1), não se mostra eficaz. Isso se deve à redução de cerca de 40% na sua velocidade, o que resulta em um tempo de operação prolongado do compressor para suprir a demanda. Como consequência, o custo acaba sendo mais elevado.

No entanto, com base na análise dos estudos realizados, simulando a operação dos sistemas ao longo de um ano, observou-se que, embora o custo do ar comprimido tenha diminuído consideravelmente, sua eficiência em termos de quantidade de produção (total de ciclos ou ciclos por minuto) sofreu uma redução. Portanto, o sistema será eficiente de fato se for implementado em uma operação que não exija alta velocidade.

Por exemplo, pode ser citar a operação do sistema convencional a 3 bar, que tem uma capacidade de produção de 57 peças por minuto. Se o sistema de recuperação de ar comprimido (sistema 2) for implantado, sua velocidade será reduzida em cerca de 15%, o que resultará em uma velocidade nominal de 48 peças por minuto. No entanto, do ponto de vista econômico, haverá uma redução de aproximadamente 30% no custo dessa operação, conforme pode ser observado na Tabela 5, em que o custo anual era de R\$ 4.524,81 e, com a implantação do sistema, passou a ser R\$ 3.182,91.

Portanto, a viabilidade da implementação do sistema dependerá da análise do contexto completo, levando em consideração se a velocidade de operação não afeta diretamente o processo. É necessário avaliar todos os aspectos antes de tomar uma decisão.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado revelou uma oportunidade de ganho energético que pode ter um impacto significativo na indústria como um todo, contribuindo para a implementação e melhoria dos processos produtivos por meio do reaproveitamento de ar comprimido. Essa abordagem oferece não apenas benefícios financeiros, mas também mantém a compatibilidade com os métodos convencionais já utilizados.

Dependendo da aplicação específica em que se busca obter ganhos energéticos, acredita-se que, com as devidas implementações tecnológicas necessárias, seja possível avançar ainda mais com estudos aprofundados no futuro próximo. Essa abordagem abre caminho para um maior desenvolvimento e otimização dos sistemas de aproveitamento de ar comprimido, proporcionando melhorias significativas em termos de eficiência energética e redução de custos.

Dessa forma, o estudo realizado é um ponto de partida promissor para explorar ainda mais as possibilidades de ganhos energéticos por meio do reaproveitamento de ar comprimido. Com esforços contínuos e avanços tecnológicos, espera-se que a indústria possa se beneficiar dessas melhorias, impulsionando a sustentabilidade e a eficiência em seus processos produtivos.

## REFERÊNCIAS

BENEDETTI, M.; BONFA, F.; BERTINI, I.; INTRONA, V.; UBERTINI, S. Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: First steps towards the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms. **Applied Energy**. V. 227, n. 1, p. 436-448, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917309728>. Acesso em 10/5/2023.

BENEDETTI, M.; CESAROTTI, V. INTRONA, V. From energy targets setting to energy-aware operations control and back: An advanced methodology for energy efficient manufacturing. **Journal of Cleaner Production**. Volume 167, 20 November 2017, Pages

1518-1533. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616315657>. Acesso em 10/5/2023.

DU, H.; BIAN, X.; XIONG, W. Design and energy characteristic analysis of a flexible isobaric strain-energy compressed-air storage device. **Journal of Energy Storage**, v. 50, p. 104-312, 2022. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22003371>. Acesso em 10/5/2023.

FARIAS, N. M. **Reaproveitamento de ar comprimido em sistemas discretos de atuação pneumática empregando reservatório intermediário**. p. 106, Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2020. Disponível em:  
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216137>. Acesso em 10/5/2023.

FABIÁN, G. G. **Desenvolvimento de bancada didática voltada ao estudo de sistemas pneumáticos**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54974>. Acesso em 10/5/2023.