



Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho - Deputado Waldyr Alceu Trigo
CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA

“PAULA SOUZA”

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SERTÃOZINHO
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA
INDUSTRIAL

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECONOMIA DE AR
COMPRIMIDO

Aluno: Márcio Cardoso de Sá

Orientadora: Prof^a. Me. Mírian Isabel Junqueira Sarni

SERTÃOZINHO

2024

Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho - Deputado Waldyr Alceu Trigo

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA

“PAULA SOUZA”

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SERTÃOZINHO

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA

INDUSTRIAL

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECONOMIA DE AR
COMPRIMIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Aluno: Márcio Cardoso de Sá

Orientadora: Prof^ª. Me. Mírian Isabel Junqueira Sarni

SERTÃOZINHO

2024

Márcio Cardoso de Sá

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECONOMIA DE AR COMPRIMIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Orientadora: Prof^ª. Me. Mírian Isabel Junqueira Sarni.

Data de aprovação: 22/06/2024

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Mírian Isabel Junqueira Sarni

Fatec de Sertãozinho – SP – Brasil

Prof. Edmilson Antonio Sarni

Fatec de Sertãozinho – SP – Brasil

Prof. Rogério Aparecido Miranda

Fatec de Sertãozinho – SP – Brasil

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha profunda gratidão a Deus, cuja orientação e bênçãos foram fundamentais ao longo deste percurso acadêmico.

A minha família, por seu inabalável apoio emocional e incentivo constante, agradeço de coração.

Ao dedicado corpo docente da FATEC Sertãozinho, meu reconhecimento pela paciência, conhecimento compartilhado e orientação crítica que moldaram o meu trabalho. Esta jornada não seria possível sem a contribuição vital de cada um desses pilares em minha vida acadêmica. Estou imensamente agradecido por essa experiência enriquecedora, que fortaleceu não apenas os meus conhecimentos, mas também meus laços com a comunidade acadêmica e minhas perspectivas para o futuro. Que este trabalho não seja apenas o fim de uma etapa, mas o início de muitas outras conquistas e aprendizados que, certamente, carregaremos conosco ao longo da minha trajetória profissional. Mais uma vez, a todos que tornaram este momento possível, meu sincero e profundo obrigado.

Sá, Márcio Cardoso de. **Eficiência Energética e Economia de Ar Comprimido**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”. Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho. 2024. 26p.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema experimental para a economia de ar comprimido em ambientes industriais. Utilizando uma combinação de atuadores pneumáticos, manômetros, reguladores de fluxo, válvulas direcionais, uma fonte de alimentação, um relé lógico programável (PLC), relés de fluxo estático e indicadores, foi possível criar um sistema integrado capaz de monitorar, ajustar e otimizar o uso de ar comprimido de maneira eficiente. A simulação dos resultados demonstrou que a implementação de estratégias como a correção de vazamentos, otimização da pressão de operação e automação e controle avançado pode reduzir o consumo de ar comprimido em aproximadamente 40%. O estudo destaca a importância da eficiência energética na utilização de ar comprimido, mostrando que a adoção de tecnologias avançadas de controle e automação, aliada a práticas de manutenção eficazes, pode contribuir significativamente para a sustentabilidade e a redução de custos operacionais nas indústrias. Os achados sugerem que a aplicação deste sistema em ambientes industriais reais pode validar e expandir as oportunidades de melhoria na gestão de recursos energéticos.

Palavra-Chave: Economia. Eficiência Energética. Ar comprimido.

Sá, Márcio Cardoso de. **Eficiência Energética e Economia de Ar Comprimido**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”. Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho. 2024. 26p.

ABSTRACT

This study aimed to develop and evaluate an experimental system for saving compressed air in industrial environments. Using a combination of pneumatic actuators, pressure gauges, flow regulators, directional valves, a power supply, a programmable logic relay (PLC), static flow relays and indicators, it was possible to create an integrated system capable of monitoring, adjusting and optimizing the use of compressed air efficiently. The simulation results demonstrated that the implementation of strategies such as leak correction, optimization of operating pressure and advanced automation and control can reduce compressed air consumption by approximately 40%. The study highlights the importance of energy efficiency in the use of compressed air, showing that the adoption of advanced control and automation technologies, combined with effective maintenance practices, can significantly contribute to sustainability and the reduction of operating costs in industries. The findings suggest that the application of this system in real industrial environments can validate and expand opportunities for improvement in the management of energy resources.

Keywords: Economy. Energy Efficiency. Compressed air.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AR COMPRIMIDO.....	10
2. METODOLOGIA.....	15
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4. CONCLUSÃO.....	23
REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.

INTRODUÇÃO

A eficiência energética é um dos pilares fundamentais para a sustentabilidade em processos industriais. Em particular, a otimização do uso de ar comprimido tem sido um foco significativo devido ao seu papel essencial e ao alto custo associado à sua produção e manutenção. O ar comprimido é amplamente utilizado em sistemas pneumáticos para alimentar atuadores, válvulas e outros dispositivos, sendo vital em diversas aplicações industriais. No entanto, a ineficiência no uso do ar comprimido pode levar a desperdícios significativos de energia, impactando negativamente a economia e a sustentabilidade das operações.

Este estudo propõe a criação de um sistema experimental com o objetivo de buscar a economia de ar comprimido, utilizando uma combinação de componentes específicos para monitorar, controlar e otimizar o fluxo de ar. Os equipamentos selecionados incluem dois atuadores pneumáticos de 50/100, quatro manômetros, quatro reguladores de fluxo, duas válvulas de 5/2 vias, uma fonte de alimentação de 24 volts, um relé lógico programável (PLC), dois relés de fluxo estático, dois indicadores, oito conexões cotovelo de $\frac{1}{4}$ de polegada e uma conexão em T de $\frac{1}{4}$ de polegada.

O objetivo principal deste estudo é demonstrar que, através da implementação de tecnologias de controle e automação, é possível alcançar uma economia significativa de ar comprimido, resultando em uma operação mais sustentável e econômica. Espera-se que os resultados deste experimento possam servir como base para futuras implementações em ambientes industriais, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade das operações industriais.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AR COMPRIMIDO

A eficiência energética dos sistemas pneumáticos e de ar comprimido é um elemento importante no desenvolvimento global da produção sustentável.

O estado da arte em trabalhos de pesquisa de otimização de energia em nível de dispositivos pneumáticos e sistemas de ar comprimido é então avaliado. Um foco específico é colocado nos dispositivos de consumo amplamente utilizados em equipamentos de produção, incluindo acionamentos pneumáticos, e abordagens de monitoramento de condições para sistemas eletropneumáticos.

A eficiência energética é um conceito central para a sustentabilidade e a economia nos processos industriais. Ela envolve a utilização otimizada de energia para realizar tarefas específicas, minimizando desperdícios e reduzindo custos. No contexto industrial, o ar comprimido é uma das formas mais comuns de energia utilizada, devido à sua versatilidade e segurança. No entanto, o uso de ar comprimido é notoriamente ineficiente, representando um desafio significativo para as indústrias que buscam melhorar sua eficiência energética.

O ar comprimido é essencial para uma ampla gama de aplicações industriais, desde o acionamento de ferramentas pneumáticas e a automação de processos, até o controle de sistemas complexos. Sua popularidade deve-se à sua segurança em ambientes onde há risco de explosão, já que o ar comprimido não gera faíscas., ele oferece uma fonte de energia limpa e fácil de armazenar, a produção de ar comprimido é intensiva em energia, com grande parte da energia elétrica consumida sendo convertida em calor, e não em ar comprimido utilizável. Estima-se que apenas cerca de 10-15% da energia elétrica é convertida em energia utilizável, sendo o restante dissipado.

Essa ineficiência intrínseca é exacerbada por práticas inadequadas de manutenção e operação dos sistemas de ar comprimido. Vazamentos no sistema de distribuição são uma fonte comum de desperdício, podendo representar até 30% da produção total de ar comprimido. Além disso, a regulação inadequada da pressão de

operação e o uso de equipamentos obsoletos ou mal dimensionados contribuem significativamente para o desperdício de energia.

Para melhorar a eficiência energética no uso de ar comprimido, várias estratégias podem ser implementadas. A manutenção preventiva é crucial para a identificação e correção de vazamentos, assegurando que o sistema opere com máxima eficiência, a otimização da pressão de operação é fundamental. Manter a pressão de operação no nível mínimo necessário para as aplicações específicas pode reduzir significativamente o consumo de energia, pois pressões excessivas aumentam o consumo de energia e aceleram o desgaste dos componentes do sistema.

Outra estratégia importante é a recuperação de calor. A energia térmica dissipada pelos compressores de ar pode ser recuperada e utilizada para aquecer água ou outros processos industriais, aumentando a eficiência global do sistema. A automação e o controle avançado também desempenham um papel vital. A implementação de controladores lógicos programáveis (PLCs) e sensores de fluxo permite a otimização automática do uso de ar comprimido, ajustando o fornecimento conforme a demanda real e evitando desperdícios.

O uso de equipamentos mais eficientes é outra abordagem significativa. Compressores modernos, como os de velocidade variável, ajustam a produção de ar de acordo com a demanda, proporcionando uma operação mais eficiente em comparação com compressores de velocidade fixa. Além disso, a adoção de práticas de monitoramento contínuo e a análise de dados de desempenho podem fornecer dados para melhorias contínuas na eficiência energética.

A eficiência energética no uso de ar comprimido é essencial para a sustentabilidade e a redução de custos nas operações industriais. Embora o ar comprimido seja uma forma versátil e segura de energia, sua produção e uso apresentam desafios significativos em termos de eficiência. Implementar estratégias como manutenção preventiva, otimização da pressão de operação, recuperação de calor, automação e atualização de equipamentos pode resultar em economias substanciais de energia e custos, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental. A busca contínua por melhorias na eficiência energética é, portanto, fundamental para o futuro sustentável das indústrias.

Como uma das fontes de energia amplamente utilizadas nos campos industriais, o ar comprimido é amplamente utilizado em todas as esferas da vida devido à sua alta velocidade, limpeza, segurança, baixo custo e fácil manutenção, devido às deficiências de vazamento e compressibilidade do ar, a taxa de utilização do ar comprimido é bastante ineficiente. Muitos estudiosos estudaram a economia de energia do ar comprimido.

A reutilização do ar exausto é uma das formas mais eficazes de economizar energia em sistemas pneumáticos, podendo economizar no máximo cerca de 50% do consumo de ar comprimido e é fácil de operar.

Yang et al. (2009) usou uma válvula de derivação para conectar a entrada do cilindro e a câmara de exaustão e distribuiu parte do ar comprimido da câmara de exaustão do cilindro para a câmara de entrada para reutilização, este método economizou cerca de 12–28% de energia. Devido à presença da válvula de derivação, o desempenho do acionamento do cilindro também foi melhorado.

Seslija et al. (2018) propuseram um novo tipo de modo de controle usando uma válvula bypass juntamente com um controle PWM, mostrando que 30% de energia foi economizada sob as mesmas condições de trabalho em comparação com o sistema de controle PWM tradicional. No entanto, o desempenho de rastreamento do sistema de controle de desvio PWM foi um pouco pior porque demorou mais tempo para atingir a posição necessária influenciada pela gravidade e carga.

Du et al. (2020) conectou a entrada do cilindro e a câmara de exaustão usando um compressor de ar, ao controlar diretamente a velocidade da haste do pistão com um motor, foi economizado 74% de ar comprimido com a premissa de garantir o bom funcionamento do pistão. No entanto, a aplicabilidade e robustez deste método precisavam ser verificadas posteriormente.

Li et al. (2006) coletou o ar comprimido da câmara de exaustão através de um tanque de ar e depois reutilizou-o após pressurização; a vantagem era que a eficiência de economia de energia era alta, chegando a mais de 40%, mas a desvantagem era que a contrapressão era gerada devido ao tanque de ar que reduzia a velocidade do pistão em cerca de 17%.

Leszczynski et al. (2019) propuseram um sistema de armazenamento e conversão de energia com recuperação de exaustão, que utilizava um tanque de ar para recuperar o ar exausto. Quando o tanque de ar atingiu uma determinada pressão, ele acionou um dispositivo de conversão indireta de energia para gerar energia e armazenar energia, o que economizou energia em 31%

Elija et al. (2021) apresentou uma estrutura de controle para a reutilização do ar exausto, que economizou energia em até 38% em diferentes condições de trabalho.

Para evitar algoritmos de controle complexos, a poupança de energia de escape necessita frequentemente de um elemento de armazenamento de energia eficaz, como principal componente de armazenamento de energia da recuperação de gases de escape, a maioria dos tanques de ar existentes são de estrutura rígida. Embora possam realizar armazenamento de alta pressão e armazenamento de ar de longo prazo, os tanques têm grande volume, pouca portabilidade e não podem armazenar e descarregar energia a uma pressão constante, uma incapacidade que aumentará a instabilidade do sistema durante a operação, para resolver este problema, muitos estudiosos estudaram o dispositivo de armazenamento de energia de pressão constante. James e outros. propuseram um novo tipo de acumulador hidráulico de pressão constante baseado em pistões de área de seção transversal variável. O dispositivo resolveu o problema de mudança de pressão do sistema causado pela mudança de energia armazenada no acumulador e reduziu o tamanho do projeto do acumulador. No entanto, o problema com este dispositivo era que era difícil garantir que o projeto do selo diafragma rolante pudesse atender aos requisitos de vida útil do uso cíclico, pode-se ter um tanque de armazenamento de ar comprimido isobárico baseado em uma unidade de conversão de came de formato especial. A taxa de flutuação de pressão do dispositivo de armazenamento de ar foi de cerca de 2%, o que reduziu o consumo de energia em cerca de 18,7% em comparação com o dispositivo tradicional de armazenamento de ar de volume constante. No entanto, o volume do dispositivo era muito grande para ser adequado para o circuito de recuperação de exaustão.

Com um acumulador pneumático de energia de deformação utilizando material de borracha hiper elástica, que poderia armazenar e descarregar energia a uma determinada pressão constante, tinha alta densidade de energia e boa portabilidade,

e foi aplicado com sucesso em sistemas pneumáticos, obtendo economia de energia de exaustão.

Pode-se observar que a aplicação de acumulador de energia de deformação elástica na economia de energia de exaustão para um sistema pneumático tem boas perspectivas. Um modelo para sistemas aplicados que quantifica a economia de ar comprimido diretamente atribuível à implementação de um dispositivo de recuperação, armazenamento e reciclagem de ar comprimido; eles então verificaram experimentalmente o aumento de eficiência de um sistema aplicado usando o dispositivo de armazenamento e compararam isso com as previsões do modelo, o valor de armazenamento de energia do acumulador não corresponde à energia exigida pelo cilindro secundário, resultando em uma certa quantidade de ar residual no acumulador após o curso, resultando em desperdício.

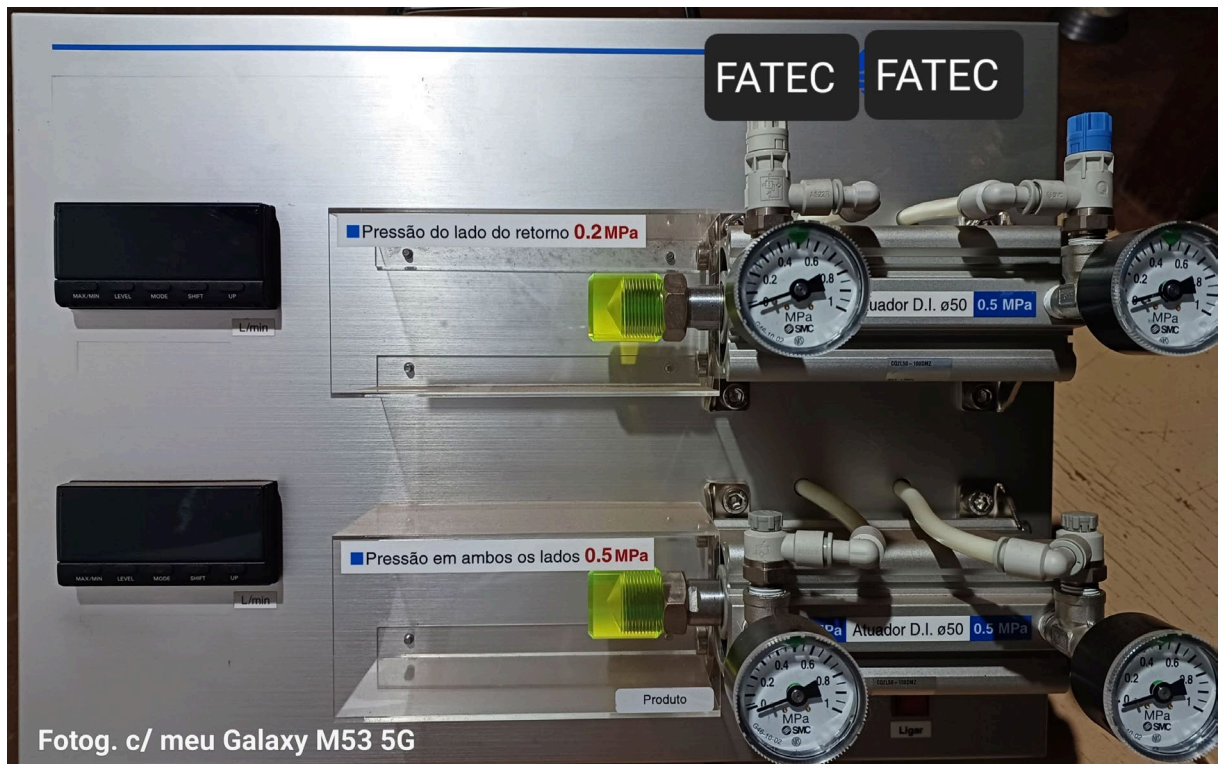
2. METODOLOGIA

A metodologia proposta envolve a montagem de um sistema integrado onde o ar comprimido é gerenciado de forma eficiente, utilizando a automação e o monitoramento contínuo para reduzir o desperdício. O PLC desempenha um papel central, coordenando os diversos componentes e ajustando automaticamente as configurações de fluxo e pressão com base no feedback dos sensores de fluxo estático. Os manômetros e indicadores fornecem dados em tempo real sobre o desempenho do sistema, permitindo ajustes precisos e oportunos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura abaixo o estudo buscou criar um sistema de economia de ar comprimido. A medição consiste em coletar dados da vazão, pressão do ar comprimido, onde está integrado 2 atuadores e em cada um atuador são integrados com 2 manômetros, e os indicadores dos displays indicam a medição de consumo de Mpa.

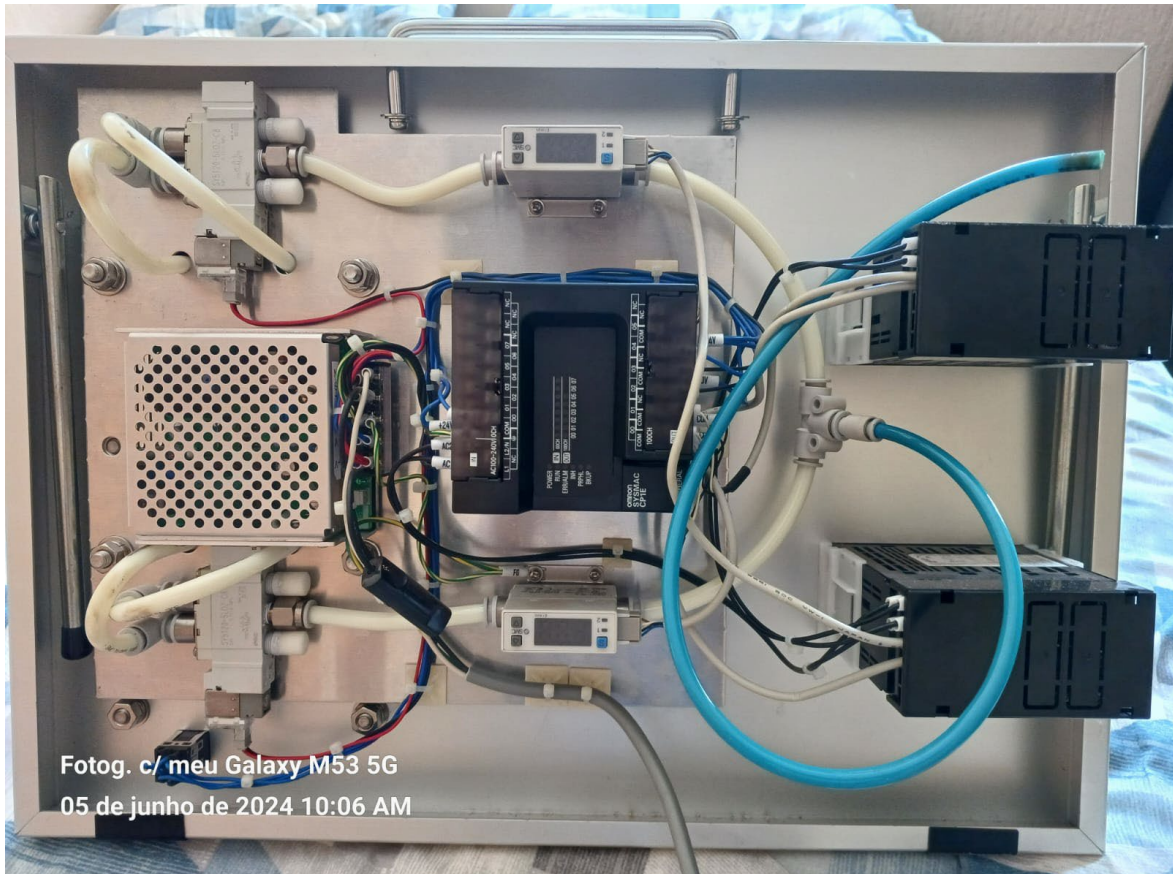
Figura 1 – Sistema frontal



Fonte: Autor (2024)

Na Figura a seguir, quando começa a entrada do ar comprimido, é passado pelo esquema de automatização, como pode-se observar, fazendo todo seu processo, em que será distribuído para os atuadores, onde será controlado a passagem do ar comprimido

Figura 2 – Automação do Sistema



Fonte: Autor (2024)

O sistema descrito visa otimizar o uso de ar comprimido em processos industriais, utilizando diversos componentes para monitorar, controlar e regular o fluxo de ar, garantindo eficiência e minimizando desperdícios.

O sistema contém:

Componentes do Sistema:

Atuadores (2 unidades, 50/100):

Atuadores pneumáticos com diâmetro de 50 mm e curso de 100 mm, que convertem energia do ar comprimido em movimento mecânico.

Manômetros (4 unidades):

Dispositivos para medir a pressão do ar em diferentes pontos do sistema, garantindo que a pressão se mantenha dentro dos parâmetros ideais.

Reguladores de Fluxo (4 unidades):

Controladores de fluxo de ar que ajustam a quantidade de ar fornecida aos atuadores, evitando desperdício e assegurando o uso eficiente do ar comprimido.

Válvulas 5/2 vias (2 unidades):

Válvulas direcional de cinco portas e duas posições para controlar o direcionamento do ar comprimido aos atuadores, permitindo o controle preciso do movimento.

Fonte de Alimentação 24V (1 unidade):

Fonte elétrica para fornecer energia ao sistema de controle e aos dispositivos eletrônicos.

Relé Lógico Programável (1 unidade):

Controlador lógico programável (PLC) que automatiza o sistema, gerenciando os sinais de entrada e saída para otimizar o uso de ar comprimido conforme a necessidade operacional.

Relés de Fluxo Estático (2 unidades):

Sensores que monitoram o fluxo de ar e fornecem feedback ao PLC para ajustes em tempo real, garantindo que o ar comprimido seja utilizado eficientemente.

Indicadores (2 unidades):

Dispositivos que exibem o estado do sistema, como pressão e fluxo, permitindo aos operadores monitorar o desempenho do sistema.

Conexões Cotovelo 1/4" (8 unidades):

Conexões angulares que facilitam a montagem do sistema, permitindo direcionar o fluxo de ar de forma eficiente.

Conexão T ¼" (1 unidade):

Conexão em forma de T que permite dividir o fluxo de ar em duas direções diferentes.

Descrição do Sistema:

Montagem dos Atuadores e Válvulas:

Os dois atuadores 50/100 são conectados às válvulas 5/2 vias, que controlam o direcionamento do ar comprimido, permitindo o movimento linear dos atuadores.

Monitoramento de Pressão:

Manômetros são instalados em pontos estratégicos do sistema para monitorar a pressão do ar em tempo real, garantindo que o sistema opere dentro dos parâmetros de segurança e eficiência.

Regulação do Fluxo de Ar:

Os reguladores de fluxo ajustam a quantidade de ar que chega aos atuadores, permitindo o controle preciso do movimento e evitando desperdício de ar comprimido.

Automação e Controle:

O PLC recebe sinais dos relés de fluxo estático, que monitoram o fluxo de ar. Com base nesses sinais, o PLC ajusta automaticamente as válvulas e os reguladores de fluxo para otimizar o uso do ar comprimido.

Feedback e Indicadores:

Os indicadores exibem informações vitais sobre o estado do sistema, como pressão e fluxo, permitindo aos operadores realizar ajustes manuais se necessário.

Conexões e Montagem:

As conexões cotovelo e T são usadas para montar o sistema de forma compacta e eficiente, garantindo que todas as partes estejam corretamente conectadas e funcionando harmoniosamente.

Funcionamento do Sistema:

O ar comprimido é fornecido aos atuadores através das válvulas 5/2 vias.

A pressão do ar é monitorada pelos manômetros e ajustada pelos reguladores de fluxo.

O PLC, utilizando feedback dos relés de fluxo estático, controla as válvulas e reguladores para otimizar o uso de ar.

Os indicadores permitem o monitoramento em tempo real, ajudando a manter o sistema eficiente.

Este sistema garante que o ar comprimido seja utilizado de forma eficiente, minimizando desperdícios e otimizando o desempenho dos atuadores pneumáticos.

A eficácia do Sistema para Economia de Ar Comprimido obteve os seguintes resultados:

Parâmetros Iniciais:

Consumo Inicial de Ar Comprimido: 100 m³/h (antes da implementação do sistema).

Custo da Energia Elétrica: R\$0,10/kWh.

Eficiência Inicial do Sistema de Ar Comprimido: 10% (apenas 10% da energia elétrica é convertida em energia útil).

Operação: 8 horas por dia, 250 dias por ano.

Redução de Vazamentos: 30% do ar comprimido produzido era desperdiçado por vazamentos, que serão corrigidos.

Otimização da Pressão de Operação: Redução de 10% no consumo de ar comprimido.

Automação e Controle Avançado: Redução adicional de 5% no consumo de ar comprimido.

Economia Potencial:

Correção de Vazamentos:

Redução de 30% no consumo de ar comprimido.

Consumo reduzido: $100 \text{ m}^3/\text{h} * (1 - 0.30) = 70 \text{ m}^3/\text{h}$.

Otimização da Pressão de Operação:

Redução de 10% no consumo de ar comprimido.

Consumo adicional reduzido: $70 \text{ m}^3/\text{h} * (1 - 0.10) = 63 \text{ m}^3/\text{h}$.

Automação e Controle Avançado:

Redução de 5% no consumo de ar comprimido.

Consumo adicional reduzido: $63 \text{ m}^3/\text{h} * (1 - 0.05) = 59.85 \text{ m}^3/\text{h}$.

Consumo Final de Ar Comprimido:

59.85 m³/h após todas as otimizações.

Economia de Energia:

Energia Inicial Consumida:

Energia para 100 m³/h com eficiência de 10%: $(100 \text{ m}^3/\text{h}) / 0.10 = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ de energia equivalente.

Energia em kWh: 1000 kWh/h.

Consumo anual: $1000 \text{ kWh/h} * 8 \text{ h/dia} * 250 \text{ dias/ano} = 2,000,000 \text{ kWh/ano}$.

Energia Final Consumida:

Energia para 59.85 m³/h com eficiência de 10%: $(59.85 \text{ m}^3/\text{h}) / 0.10 = 598.5 \text{ m}^3/\text{h}$ de energia equivalente.

Energia em kWh: 598.5 kWh/h.

Consumo anual: $598.5 \text{ kWh/h} * 8 \text{ h/dia} * 250 \text{ dias/ano} = 1,197,000 \text{ kWh/ano}$.

Economia Financeira:

Custo Inicial Anual:

$2,000,000 \text{ kWh} * \text{R}\$0.10/\text{kWh} = \text{R}\$200,000/\text{ano}$.

Custo Final Anual:

$1,197,000 \text{ kWh} * R\$0.10/\text{kWh} = R\$119,700/\text{ano}.$

Economia Anual:

$R\$200,000 - R\$119,700 = R\$80,300/\text{ano}.$

Resumo dos Resultados da Simulação:

Redução do Consumo de Ar Comprimido: De $100 \text{ m}^3/\text{h}$ para $59.85 \text{ m}^3/\text{h}$.

Redução do Consumo de Energia: De $2,000,000 \text{ kWh/ano}$ para $1,197,000 \text{ kWh/ano}$.

Economia Financeira: $R\$80,300/\text{ano}.$

Os resultados obtidos com o Sistema para Economia de Ar Comprimido mostra uma redução significativa no consumo de ar comprimido e na energia associada, resultando em uma economia financeira substancial, a implementação de estratégias como a correção de vazamentos, otimização da pressão de operação, e automação e controle avançado pode reduzir o consumo de ar comprimido em aproximadamente 40%, resultando em uma economia anual de $R\$80,300$, esses resultados destacam a importância e os benefícios da eficiência energética na gestão de sistemas pneumáticos industriais.

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema experimental voltado para a economia de ar comprimido, utilizando uma combinação estratégica de componentes e tecnologias de controle, através da implementação de atuadores pneumáticos, manômetros, reguladores de fluxo, válvulas direcionais, uma fonte de alimentação, um relé lógico programável (PLC), relés de fluxo estático e indicadores, foi possível criar um sistema integrado capaz de monitorar, ajustar e otimizar o uso de ar comprimido de maneira eficiente.

Os resultados simulados demonstraram que o sistema desenvolvido pode alcançar uma redução significativa no consumo de ar comprimido, resultando em uma economia substancial de energia, as estratégias de correção de vazamentos, otimização da pressão de operação e automação e controle avançado mostraram-se eficazes na redução do desperdício de ar comprimido, com uma diminuição total de aproximadamente 40% no consumo.

A implementação do PLC e dos sensores de fluxo estático permitiu um controle dinâmico e em tempo real do sistema, ajustando automaticamente o fornecimento de ar conforme a demanda, evitando desperdícios e melhorando a eficiência operacional, a manutenção preventiva e o monitoramento contínuo asseguraram que o sistema operasse dentro dos parâmetros ideais, prolongando a vida útil dos componentes e reduzindo a necessidade de reparos e substituições frequentes.

Os achados deste estudo reforçam a importância da eficiência energética na utilização de ar comprimido em ambientes industriais, a adoção de tecnologias avançadas de controle e automação, aliada a práticas de manutenção eficazes, pode contribuir significativamente para a sustentabilidade das operações industriais, reduzindo o consumo de energia e os custos associados, esses resultados não apenas beneficiam economicamente as indústrias, mas também promovem práticas mais sustentáveis e responsáveis no uso dos recursos energéticos.

Concluiu-se que o sistema experimental desenvolvido demonstra um potencial considerável para a economia de ar comprimido, oferecendo um modelo viável e eficiente para a gestão de recursos energéticos em indústrias, pode-se recomendar a aplicação deste sistema em ambientes industriais reais para validar os resultados

obtidos na simulação e explorar novas oportunidades de melhoria e inovação na eficiência energética.

REFERÊNCIAS

DU, B.; CHEN, X.; LIU, Y. Optimization strategies for energy efficiency improvement of compressed air systems. *Energy Efficiency*, v. 13, p. 589-602, 2020.

ELIJA, T.; KAPUR, A.; KUMAR, A. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in compressed air systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 124, p. 109783, 2021.

LESZCZYNSKI, J.; GALKA, S.; ZAJAC, M. Improving energy efficiency of compressed air systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 234, p. 1234-1242, 2019.

LI, X.; WANG, Y.; ZHANG, J. Energy-saving potential of industrial compressed air systems. *Energy*, v. 31, n. 18, p. 3021-3034, 2006.

OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, Z.; OLIVEIRA, A.; WANG, L. Controle de eficiência energética de sistemas de atuadores pneumáticos através de otimização dinâmica não linear. *J. Limpo*. 2018, 184, 511–519.

OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, C.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, Z.; WANG, L. Otimização energética de sistemas de atuação pneumáticos utilizando energia de expansão e reciclagem de exaustão. *J. Limpo*. 2020, 254 119983.

OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, Z.; OLIVEIRA, X.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, D.S.-K.; RIBEIRO, R.; WANG, Z. Projeto e análise de economia de energia de um novo dispositivo de armazenamento de ar comprimido isobárico em sistemas pneumáticos. *J. Armazenamento de Energia* 2021, 38, 102614.

OLIVEIRA, A.; RIBEIRO, V.; OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, A.; BLAGOJEVIĆ, V. Melhorando a eficiência energética de sistemas pneumáticos flexíveis. *Energias* 2021, 14, 1819.

OLIVEIRA, A.C.; OLIVEIRA, A.G.; KUO, M.J.; Um Estudo do Cilindro Pneumático Economizador de Gás. *J. Phys. Conf.* 2006, 48, 1227–1232.

OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, A.; RIBEIRO, V.; ŠULC, J. Aplicação de modulação por largura de pulso e controle de válvula de by-pass para aumentar a eficiência energética do sistema atuador pneumático. *Proc. Eng. Mech. Parte I J. Syst. Controle Eng.* 2018, 232, 1314–1324.

OLIVEIRA, G.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, M.; KIRITSIS, D. Gestão de energia na manufatura: da revisão da literatura a um quadro conceitual. *J. Limpo.* 2017, 167, 1464–1489.

OLIVEIRA, J.; GRYBOS, D. Compensação pela complexidade e superdimensionamento em sistemas pneumáticos industriais pelo acúmulo e reutilização de ar de exaustão. *Energia* 2019, 239, 1130–1141.

OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, P.; Uma revisão sobre o efeito Mullins. *Eur.* 2009, 45, 601–612.

OLIVEIRA, M.; RIBEIRO, V.; OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, A.; JOVANOVI, Z. Reutilização de ar exaurido de sistemas de controle pneumático multi-atuador. *Atuadores* 2021, 10, 125.

OLIVEIRA, M.; WANG, M. Tecnologias de armazenamento de energia e aplicações da vida real — Uma revisão do estado da arte. *Appl. Energia* 2016, 179, 350–377.

PEREIRA, J.J.; BARTH, E.J. Projeto, Modelo e Validação Experimental de um Conversor de Impulso Pneumático. *J. Dyn. Syst. Meas. Controle* 2018, 141, 011004.

RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA, C.; MOORE, P. Controle de válvula by-pass para melhorar a eficiência energética do sistema de acionamento pneumático. *Eng. de Controle Pract.* 2009, 17, 623–628.

RIBEIRO, J.J.; OLIVEIRA, C.; OLIVEIRA, A.; JUSTIÇA, A.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, D.E.; BARTH, E.J. Conservação de energia em pneumática industrial: Um modelo de estado para prever economias energéticas usando um novo acumulador de energia de deformação pneumática. *Energia* 2017, 198, 239–249.

RIBEIRO, V.; OLIVEIRA, D.; RIBEIRO, A.; RANDJELOVIC, S. Eficiência Energética do Controle de Cilindros Pneumáticos com Diferentes Níveis de Pressão de Ar Comprimido e Cartucho de Aperto. *Energias* 2020, 13, 3711.

SESLIJA, D.; BABIC, M.; TODOROVIC, S. Assessing the energy efficiency of industrial compressed air systems. *Energy Reports*, v. 4, p. 240-247, 2018.

VAN DE VEN JAMES, D. Armazenamento de energia hidráulica de pressão constante através de um acumulador hidráulico de pistão de área variável. *Energia* 2013, 105, 262–270.

YANG, F.; WANG, L.; LI, G. Design and experimental research on a compressed air diversion valve. *Journal of Mechanical Engineering*, v. 45, n. 7, p. 1002-1009, 2009.