



INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE GESTÃO ENERGÉTICA COM TECNOLOGIAS DE COMPRESSORES

RODRIGO MALERBA CAMPANA - rodrigomcampana28@gmail.com
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

HENRIQUE DE SOUZA PAULO - henriquedespl@gmail.com
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

HENRRICCO NIEVES PUJOL TUCCI – henrricco@fei.edu.br
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

ÁREA: 7. ENGENHARIA ECONÔMICA
SUBÁREA: 7.1 – GESTÃO ECONÔMICA

RESUMO: O PRESENTE TRABALHO TEVE COMO OBJETIVO INVESTIGAR A INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE GESTÃO ENERGÉTICA COM TECNOLOGIAS DE COMPRESSORES EM AMBIENTES INDUSTRIAIS, DESTACANDO A IMPORTÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, REDUÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS E SUSTENTABILIDADE. A PESQUISA FOI DESENVOLVIDA A PARTIR DE UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ABRANGENTE E POR UM ESTUDO DE CASO REALIZADO EM UMA EMPRESA COM UM SISTEMA DE COMPRESSORES INDUSTRIAIS. A ANÁLISE INCLUIU A COLETA DE DADOS, MEDIÇÕES IN LOCO E O CÁLCULO DE INDICADORES FINANCEIROS COMO VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL), TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR) E PAYBACK, A FIM DE AVALIAR A VIABILIDADE ECONÔMICA DA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DE COMPRESSORES INTEGRADAS A SISTEMAS DE GESTÃO ENERGÉTICA. OS RESULTADOS EVIDENCIARAM QUE A IMPLANTAÇÃO DESSAS TECNOLOGIAS PROPORCIONOU UMA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E NOS CUSTOS OPERACIONAIS, ALÉM DE MELHORAR A CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS E REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS. A ANÁLISE QUANTITATIVA REVELOU UM PAYBACK DE MENOS DE TRÊS ANOS, UM VPL POSITIVO DE APROXIMADAMENTE E UMA TIR DE 31,5%, CONFIRMANDO A VIABILIDADE DO PROJETO. CONCLUIU-SE QUE A INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE GESTÃO ENERGÉTICA COM TECNOLOGIAS DE COMPRESSORES É UMA ESTRATÉGIA EFICAZ PARA INDÚSTRIAS QUE BUSCAM ALIAR INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, PORÉM, OS CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO SÃO ELEVADOS E É NECESSÁRIO CAPACITAR AS EQUIPES ENVOLVIDAS.

PALAVRAS-CHAVES: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA, VIABILIDADE ECONÔMICA, REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL.

1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda por operações sustentáveis, redução de custos operacionais e vantagem competitiva, as indústrias estão buscando soluções que utilizem energia de maneira mais eficiente, além de possibilitar o uso de equipamentos e tecnologias inovadoras que podem levar à redução de emissões de gases de efeito estufa. A indústria está desenvolvendo muitos sistemas para ajudar a cumprir rigorosos padrões ambientais. Atualmente, se enfrenta uma crise energética, também relacionada à escassez de água, pois cerca de 55% da matriz energética brasileira é baseada em hidroeletricidade (EPE, 2024).

A eficiência energética surge como uma medida chave para alinhar o crescimento econômico com a preservação ambiental e a estabilidade sociopolítica. A eficiência energética é um dos pilares da sustentabilidade, segundo Bruno Herbert, presidente da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (Abesco). Trata-se de fazer mais com o mesmo conforto, realizar o mesmo trabalho com menos energia e consumo, mas sem afetar a vida humana (Produtividade das Pessoas), Desconforto e Qualidade de Vida (Abesco, 2025).

Cavalcanti e Ferreira (2017), explica que se os estudos apontam que a gestão eficaz da energia dos processos industriais é uma questão importante para seu desenvolvimento sustentável, em especial considerando que hoje as organizações se deparam com uma competição de mercado em custos e desempenho.

Como apontado por Smith e Cooper (2019), a tecnologia da Indústria 4.0 oferece soluções inteligentes que são controladas remotamente e baseadas em sensores, permitindo, subsequentemente, a otimização automática e, assim, melhorando o desempenho dos compressores. Os desenvolvimentos tecnológicos já alcançaram o futuro: a digitalização e automação de muitos processos industriais também digitalizaram a compressão: compressores modernos no mercado agora têm sensores, inversores de frequência e ainda estão equipados para comunicação com sistemas de gestão de energia.

Compressores contemporâneos também atingem a redução de energia adaptando-se inteligentemente à demanda de produção e aos desafios operacionais. Compressores acionados por motores elétricos geram uma grande quantidade de ar comprimido, e o desempenho desses sistemas é um fator muito relevante para os objetivos de preservação ambiental e redução de custos (Silva, Deschamps e Péres, 2007).

A implementação de sistemas de gestão de energia em um sistema de compressores é

um desafio que deve ser considerado como parte das questões estratégicas (Oliveira e Santos, 2019). Essa integração permite que sistemas de gestão façam uso dos dados coletados para otimizar e controlar compressores.

Logo, o objetivo deste trabalho é apresentar a integração de sistemas de gestão de energia com tecnologias de compressores para mostrar melhorar a eficiência operacional e econômica durante o processo de reestruturação de uma planta industrial.

Para tanto, este trabalho foi organizado da seguinte forma: (i) contextualização e apresentação do objetivo, essa seção foi nomeada como Introdução; (ii) apresentação dos temas teóricos relevantes para este trabalho, nomeada como Revisão da Literatura; (iii) apresentação dos procedimentos seguidos para viabilizar o estudo de caso, nomeada como Metodologia; (iv) a explicação do processo e os cálculos foram apresentados na seção de Resultados e, por fim, (v) as principais contribuições e as limitações foram sumarizados na seção nomeada de Conclusão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As tecnologias de compressores quando adotam a gestão de energia, pode levar a ganhos econômicos em termos de eficiência energética e custos operacionais. É essa combinação que resulta em um controle mais fino no nível de consumo de energia (Moura e Silva, 2019).

A automação é uma ferramenta essencial para a melhoria da operação e eficiência energética dos sistemas de maquinário, como o compressor. Essa integração pode incluir dispositivos como sensores e controlador lógico que farão o ajuste da operação com base na demanda e modos de operação. Deve ser destacado que o Sistema de Gestão Energética (SGE) é atualmente uma tecnologia experimentada no contexto da transição energética atual e da perspectiva de sustentabilidade (Pérez-Lombard et al., 2009).

No geral, a ampla função do SGE é reunir a grande quantidade de informações trazidas por sensores e medidores espalhados por uma planta industrial (Almeida e Oliveira, 2017). A boa organização de tal quantidade de informações também é fundamental para o sucesso do sistema. Nesse sentido, é essencial usar técnicas de compressores que reduzam o tamanho das informações, facilitando a transmissão e minimizando o espaço no servidor (Moura e Silva, 2019).

Aplicação dessas novas tecnologias não só melhora os sistemas em geral, mas em particular, reduz as despesas operacionais associadas ao armazenamento de dados (Pereira e

Martins, 2018). Se observado, a compressão de dados é crítica para a transmissão e armazenamento eficiente de dados, principalmente em locais remotos com largura de banda limitada ou em redes de sensores.

Com o crescente interesse em lidar de maneira eficiente com dados históricos e, especialmente, em tempo real, as soluções de compressores modernos também despertaram maior interesse. Essas ferramentas são essenciais na construção de modelos preditivos para ajudar as empresas a decidir onde economizar e, mais importante, onde reduzir o desperdício, e fazer melhor uso dos recursos disponíveis para melhorar o uso dos recursos energéticos (Medeiros e Souza, 2020). Tanto que, Ferreira e Santos (2022) relataram uma redução de 15% no consumo de energia devido à detecção de alguns padrões de consumo ineficientes que nunca haviam sido detectados no passado, dada a massa de dados elevada.

O Sistema de Suprimento de Compressores também pode ser automatizado e servir como parte do SGE, beneficiando-se assim de uma operação mais eficiente. Tanto que compressores variáveis podem ser 35% mais eficientes em relação ao consumo de energia do que os modelos de gerações anteriores (Cullen, Allwood e Borgstein, 2011).

Morais et al. (2019) indicaram que, usando os conceitos da Indústria 4.0, monitoramento em tempo real, manutenção preditiva e controle avançado de processos poderiam ser usados, resultando em melhorias significativas na produtividade e qualidade. A digitalização também está impulsionando a customização em massa, permitindo a produção sob demanda para consumidores individuais, mas ainda capturando as economias de escala.

Por outro lado, a Indústria 4.0 é muito mais do que tecnologias digitais, mas uma cultura corporativa inteiramente nova. O trabalho e a comunicação também se tornam diferentes, uma vez que o novo modelo faz com que as organizações repensem sua cadeia de valor, sistema de produção e modelo de negócios (Martins, Rodrigues e Silva, 2023).

Chu et al. (2018) considera que a convergência dos SGE e das tecnologias digitais, por exemplo, equipamentos e tecnologias inteligentes, intensifica o diagnóstico de perdas e a melhoria contínua do processo produtivo. No entanto, obstáculos como o investimento necessário e a escassez geral de talentos digitais na maioria das empresas também atuam como restrições à adoção geral dessas estratégias.

Inácio et al. (2020), ao aplicar sensores e sistemas inteligentes, torna-se possível monitorar o consumo em tempo real, fazendo ajustes instantâneos, bem como a detecção de desperdícios. Os autores Abreu et al. (2018) consideram que a inclusão de fontes renováveis (incluindo solar e eólica) nos sistemas de energia não só pode reduzir a dependência de gás e carvão, mas também ter custos operacionais e de manutenção mais baixos em prazos mais

curtos.

A respeito da análise de custos, no atual cenário industrial competitivo, não se deve negligenciar ou ignorar o custo ou investimento em eletricidade. A análise financeira também fornece uma medida do retorno econômico dos projetos de redução do consumo de energia e que induz os gestores a tomar decisões mais decisivas (Silva, André e Leal, 2018).

O conceito de payback é o tempo necessário para recuperar o valor gasto em um investimento, ou seja, quando os fluxos de caixa igualam o valor do investimento. Essa é a razão pela qual é relevante para empresas que pretendem retorno de capital mais rápido, especialmente em um cenário de grande incerteza (Gitman, 2010).

Por sua vez, o Valor Presente Líquido (VPL) é um dos métodos mais apropriados para a avaliação de investimentos e, particularmente, para projetos de eficiência energética. Como argumentam Ehrhardt e Brigham (2012), o VPL é a diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa futuros esperados e o custo.

De acordo com Gitman (2010), o VPL é um método avançado de estudo de viabilidade baseado no princípio do valor temporal do dinheiro. É o valor presente dos fluxos de caixa futuros, menos o investimento inicial, descontado pela taxa mínima de retorno exigido (o custo de capital da empresa, na maioria dos casos).

Nos negócios, o VPL é um indicador de quanto valor um investimento ou projeto acrescenta à empresa. No cálculo, os fluxos de caixa futuros são descontados para que os fluxos sejam expressos em termos de valor presente. Se o VPL for positivo (ou seja, maior que 0), então o projeto é considerado "viável"/factível, visto que tende a gerar valor adicional para a empresa. Caso contrário, deve ser rejeitado. Essa neutralidade faz do VPL uma das medidas mais básicas de escolha de projeto, especialmente se considerarmos contextos nos quais as ações devem ser categorizadas como eficientes e economicamente viáveis (Assaf Neto, 2014).

$$\begin{aligned} VPL &= \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} - FC_0 \\ &= \sum_{t=1}^n (FC_t \times FVT_{k,t}) - FC_0 \end{aligned}$$

Onde: i é a taxa de desconto; t é o período genérico ($t=1$ a $t=n$), percorrendo todo o fluxo de caixa; FC_t : representa o valor de entrada (ou saída) de caixa previsto para cada intercalo de tempo; FC_0 : fluxo de caixa verificado no momento zero (momento inicial), podendo ser um investimento, empréstimo ou financiamento.

A taxa interna de retorno é considerada uma das ferramentas comumente usadas no estudo de viabilidade de projetos. Segundo Gitman (2010), a TIR é a taxa de desconto na qual o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto é igual a zero, ou seja, é a taxa de desconto na

qual o valor presente dos fluxos de caixa é equivalente ao investimento inicial.

3. METODOLOGIA

O tipo de pesquisa do presente estudo está mais próximo de um aplicado, porque se trata de resolução prática de problemas e o problema é realista, ou seja, seleção eficiente de compressores industriais no sistema de gestão de energia, baseada nos critérios de desempenho, sustentabilidade e viabilidade econômica. Barros e Oliveira (2016) têm destacado a importância da pesquisa nessa área, priorizando o uso da eficiência energética em processos industriais, principalmente em segmentos que apresentam alto consumo de eletricidade.

De acordo com seus objetivos, este é um estudo exploratório voltado para um entendimento mais profundo da integração de tecnologias avançadas de compressores e gestão de energia, pesquisando as tendências, barreiras e propulsores para sua implementação na indústria. A pesquisa exploratória é particularmente adequada quando o fenômeno de interesse ainda não foi definido cientificamente: tal é o caso da inovação no campo da Indústria 4.0 e da economia de energia (Lakatos e Marconi 2003).

A pesquisa bibliográfica considerou a análise de livros didáticos, artigos técnicos, normas e relatórios industriais de bancos de dados confiáveis do copyright do SciELO, Google Scholar, livros e bibliotecas setoriais. A pesquisa bibliográfica é necessária para o quadro teórico desse estudo, pois mapeia o estado da arte e o desconhecido (Gil, 2010).

Além da fundamentação teórica, exercícios foram elaborados com base em um caso hipotético fornecido juntamente ao intercâmbio de dados para a indústria, que são em grande parte semelhantes a dados reais de equipamentos e sistemas usados na indústria, como consumo de energia, eficiência, custo de aquisição, práticas de manutenção e retorno do investimento. Capehart et al. (2020) também afirmam que a simulação por computador é útil na manufatura quando outras opções de tecnologia energética precisam ser avaliadas, pois análises preditivas podem ser realizadas em diversos cenários diferentes sobre um determinado conjunto de dados de entrada. Assim, a abordagem metodológica adotada busca teorizar e fundamentar (ou "ground-theorize") em um esforço para garantir que os estudos de caso sejam relevantes e adequados (Roesch 2005).

O método adotado para a coleta de dados neste artigo foi dividido em duas etapas correlativas: busca bibliográfica e investigação computacional. Este modelo híbrido facilitou um exame tanto dos fundamentos teóricos quanto das aplicações práticas das tecnologias

examinadas.

Na primeira seção, foram selecionados conjuntos de fontes bibliográficas com caráter científico e técnico, incluindo artigos em congressos e artigos especializados em periódicos, livros indexados, teses universitárias e documentos normativos, como a ISO 50001, que regula linhas de ação para os sistemas de gestão de energia. Utilizamos esse recurso para contrastar e investigar a operação dos compressores industriais, um aspecto essencial dos sistemas de gestão de energia (SGE) e indicadores de desempenho em edições de análise de viabilidade energética.

Posteriormente, o catálogo técnico dos fabricantes e os softwares de análise de desempenho energético foram utilizados para simular os resultados. Esta simulação foi selecionada para representar um cenário de aplicação industrial, comparando diferentes tipos de compressores, incluindo aqueles com controle VSD e gestão inteligente de energia, conforme discutido por Capehart, Turner e Kennedy (2020) para eficiência energética.

A avaliação também se referiu a parâmetros financeiros e energéticos comumente usados, a saber, Consumo Energético Estimado, Payback, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno (IRR) em linha com Ehrhardt e Brigham (2012) em estudos de viabilidade de projetos.

As tecnológicas adotadas pelas empresas globais de destaque no mercado de compressores industriais, que é um segmento que se tornou eficiente. Através de uma busca nota-se que os principais fabricantes nessa área estão presentes em diversos países e têm feito investimentos importantes em soluções sustentáveis que geram prosperidade, aumentando a produtividade demonstrando a importância do consumo de energia, da segurança operacional e ergonomia da indústria.

Essas empresas tiveram um progresso contínuo de seus produtos, possibilitado pela automação, controle inteligente e a conexão com tecnologias de SGE.

A pesquisa é desenhada para investigar o uso das tecnologias e tendências de forma genérica, independentemente de qualquer marca específica de software ou plataforma.

A empresa possui os seguintes segmentos:

- Técnica Industrial: foca em ferramentas e sistemas de energia industrial.
- Técnica de Vácuo: especialista na arte do vácuo.
- Técnica Industrial: fornece sistemas de montagem e ferramentas.
- Sistemas Energéticos: inclui sistemas portáteis de energia e tratamento de ar.

Cada setor industrial, que se concentra na fabricação de compressores e sistemas de automação de energia, normalmente estrutura áreas de desenvolvimento

tecnológico que são direcionadas para suas linhas estratégicas. No geral, essas empresas procuram respostas que combinem inovação, eficiência operacional e viabilidade a longo prazo.

Moreira, Goldemberg e Lucon (2021) concordam e sustentam que a evolução tecnológica no setor só ocorrerá se conseguir associar processos de produção e controle de consumo de energia ao mínimo de efeitos ambientais indesejados. Assim, é disposto que tais empresas gozam de uma posição competitiva em relação a outras empresas que possuem valor equivalente ao da empresa no mapa competitivo global no campo de compressores.

4. RESULTADOS

Este estudo de caso baseou-se em dados coletados de uma empresa fictícia com base em dados coletados de uma indústria de compressores conhecida mundialmente que dispõe de soluções altamente preparadas para eficiência energética. A indústria pratica frequentemente projetos de diagnóstico em novas e existentes plantas industriais, buscando identificar potencial econômico, com ênfase em sistemas de ar comprimido. O estudo foi realizado em um cliente para avaliar as condições do sistema compressores de ar.

De acordo com Capehart, Turner e Kennedy (2020), esse tipo de análise é essencial para tomar decisões sobre a modernização. No momento a empresa estava operando um compressor de parafuso lubrificado a óleo, com controle de velocidade fixa e de carga/descarga. Este era o fluxo máximo em potência constante do equipamento, registrando uma média de 230 m³/h, correspondente à metade da capacidade nominal (500 m³/h), onde havia contribuição para o aquecimento (excessivo), perdas operacionais e instabilidades do sistema. Segundo Lopes e Vasconcelos (2018), máquinas que constantemente operam em sobrecarga são mais propensas a falhas e operam com menos eficácia ao final.

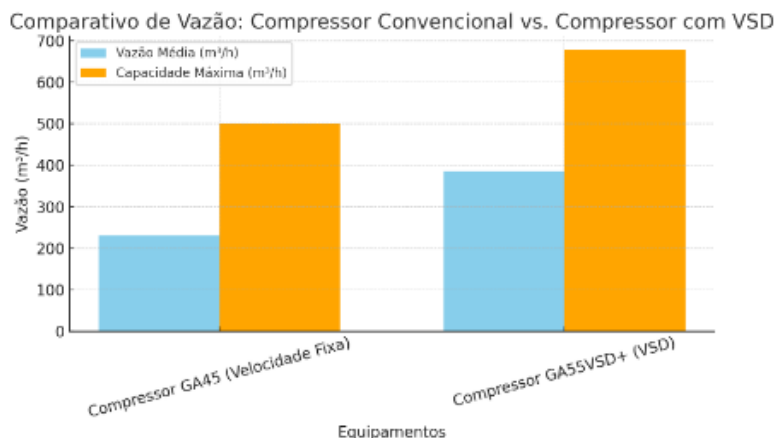
Ao utilizar o monitoramento eletrônico, tornou-se aparente como o perfil de carga da sala de compressores era em termos reais. A informação obtida foi considerada por 7 dias e levou à sugestão de uma solução de engenharia, que era simplesmente substituir o equipamento existente por um mais avançado com drive de velocidade variável (VSD). A nova unidade selecionada é capaz de operar num intervalo entre 92,71 m³/h – 677,79 m³/h, assim a velocidade do motor é capaz de modular de acordo com a demanda real, evitando consumos energéticos desnecessários e perdas de operação a vazio.

Para Ribeiro e Teixeira (2019), essa tecnologia é especialmente atraente quando se considera aplicações com variação considerável de carga, pois permite o ajuste da geração de

ar comprimido e minimiza o desperdício de energia improdutivo nos ciclos de descarga e recarga. O novo compressor foi implementado junto com nova tubulação e reservatório de ar, controle de pressurização e controle de vazamento na rede.

Uma análise comparativa dos dados pertinentes ao caso entre a capacidade máxima e a vazão média dos compressores antes e depois mostrada na Figura 1.

FIGURA 1 – GRÁFICO COMPARATIVO DE VAZÃO



Fonte: Os autores

De acordo com os resultados apresentados, a substituição técnica proposta proporciona vantagens operacionais e também ganhos econômicos relevantes, de acordo com as regras de gestão de energia estabelecidas pela norma ISO 50001 (ABNT, 2018). A empresa pesquisada iniciou uma produção com fluxo muito estável e minimizou o consumo de energia, provando que a nova concepção do sistema de ar comprimido pode se tornar uma das ações mais lucrativas no combate aos custos indiretos na indústria.

Quando o compressor está descarregado, o motor elétrico não é desligado, e a válvula de admissão de ar é fechada. Isso resulta em uso de energia que é desperdiçado, sendo frequentemente visto como uma perda, uma vez que a unidade não está produzindo ar comprimido. Para tal implicação mostrada pela pesquisa, a conclusão é incluir um inversor de frequência. A máquina não trabalha a plena capacidade; consequentemente, o desgaste mecânico é menor e a manutenção da máquina é baixa.

O estudo mostrou que a carga do antigo compressor consumia 340.065,40 kW/ano, sendo 222.842,46 kW/ano consumidos entregando ar comprimido e 117.811,94 kW/ano trabalhando descarregado, isto é, sendo alimentado por energia elétrica, porém não entregando ar comprimido. Os custos resultantes dessa demanda de energia totalizam R\$

170.327,20/ano, sendo, respectivamente, R\$ 111.421,23/ano e R\$ 58.905,97/ano. Isso ilustra como 35% da energia consumida pela instalação de ar comprimido do cliente era consumida pelo compressor operando descarregado – um dreno caro sobre os lucros.

Outro estudo possibilitado pela pesquisa estava relacionado às emissões de CO₂, com a maquinaria atual descarregando 21,32 toneladas de CO₂ por ano. A solução desenvolvida foi implementar um novo compressor, o GA55VSD, uma vez que o equipamento e a tecnologia que utiliza mantêm o compressor sempre trabalhando a plena capacidade, eliminando o desperdício de energia causado quando um compressor trabalha com carga, o que nesse caso significa que 100% de seu consumo está sendo utilizado para comprimir o ar.

A economia anual com as novas tecnologias é de R\$ 67.417,38, o que representa 39,58 por cento. Além disso, com a chegada de uma nova máquina, suas tecnologias asseguram uma redução de 13,97 toneladas de CO₂ por ano.

Para fornecer análise econômica e interpretação dos resultados do presente estudo, três entradas financeiras do projeto foram aplicadas com base no Payback, VPL e TIR. O capital investido assumido no modelo, refere-se ao montante que o cliente gasta para implementar a solução. Isso é expresso em forma simbólica por motivo de sigilo na divulgação das informações empregadas.

Em contraste, o payback (equação 1) equivale ao percentual em dólar restaurado anualmente ao cliente por meio da solução implementada.

$$\text{Payback} = \frac{200.000,00 \text{ (valor aproximado do investimento)}}{67.417,38 \text{ (32,21\% do valor aplicado ao ano)}} = 2,96$$

(Eq. 1)

De acordo com a análise de investimento, o projeto se pagará em cerca de 2,9 anos. Isso significa que resultará em um retorno completo do investimento em menos de 3 anos, atendendo ao critério do cliente para um período de recuperação de capital.

Para a análise do VPL (tabela 1), os fluxos de caixa futuros resultantes do estudo (receitas e despesas), descontados à taxa mínima desejável de retorno, menos o investimento realizado, foram utilizados os seguintes:

Para projetos industriais, as TMA estarão entre 10% e 15%. Referindo-se a este manual, uma taxa nominal de 12% foi usada nesta pesquisa, conforme apresentado na Tabela 1.

Além disso, tal análise deve ser realizada em um horizonte de análise de 10 anos e é

necessário realizar o investimento anterior com valor real/simbólico como entrada inicial, utilizando os parâmetros da empresa-base usados na simulação.

Esses termos estabelecidos foram usados para incorporar o valor presente dos fluxos de caixa devidos ao longo do período avaliado (e qualquer efeito de ressonância). Os benefícios de fluxo de caixa foram estimados com base nas economias anuais estimadas da aplicação da solução derivada do estudo, contribuindo para esse cálculo.

TABELA 1: Regra de cálculo

TMA:	12%
PERÍODOS:	10 anos
INVESTIMENTO	-R\$ 200.000,00

Ano	FLUXO DE CAIXA
Ano 1:	R\$ 67.417,38
Ano 2:	R\$ 67.417,38
Ano 3:	R\$ 67.417,38
Ano 4:	R\$ 67.417,38
Ano 5:	R\$ 67.417,38
Ano 6:	R\$ 67.417,38
Ano 7:	R\$ 67.417,38
Ano 8:	R\$ 67.417,38
Ano 9:	R\$ 67.417,38
Ano 10:	R\$ 67.417,38

Fonte: Os autores

Embora nesta análise os valores de fluxo de caixa tenham sido considerados constantes para cada período, é importante destacar que, em cenários reais, a economia anual pode sofrer reduções ao longo do tempo em função da obsolescência dos equipamentos, custos de manutenção crescentes ou alterações no perfil de consumo energético.

Em estudos financeiros, é necessário converter os fluxos de caixa futuros para o ponto presente (tabela 2). Para isso, uma coluna chamada N_PER foi incluída ao lado do próximo fluxo de caixa. Esta coluna representa o número de períodos que precisam ser subtraídos do fluxo de caixa futuro para converter o fluxo de caixa em valor presente.

Uma vez que os campos auxiliares estejam devidamente configurados, o cálculo de valores futuros/quantias expressas em termos presentes pode ser realizado com base na Taxa Mínima de Atratividade (TMA), considerando a redução no número de períodos.

TABELA 2: Cálculo do valor presente

TMA:	12%		
Ano	FLUXO DE CAIXA	N. PER	VALOR PRESENTE
Ano 1:	R\$ 67.417,38	1	R\$ 60.194,09
Ano 2:	R\$ 67.417,38	2	R\$ 53.744,72
Ano 3:	R\$ 67.417,38	3	R\$ 47.986,36
Ano 4:	R\$ 67.417,38	4	R\$ 42.844,96
Ano 5:	R\$ 67.417,38	5	R\$ 38.254,43
Ano 6:	R\$ 67.417,38	6	R\$ 34.155,74
Ano 7:	R\$ 67.417,38	7	R\$ 30.496,20
Ano 8:	R\$ 67.417,38	8	R\$ 27.228,75
Ano 9:	R\$ 67.417,38	9	R\$ 24.311,38
Ano 10:	R\$ 67.417,38	10	R\$ 21.706,59
Soma de VP: R\$ 380.923,23			
Investimento: -R\$ 200.000,00			
Valor Presente Líquido: R\$ 180.923,23			

Fonte: os autores

Após calcular os Valores Presentes de cada ano, realizou-se a soma deles, subtraindo-se do investimento inicial utilizado como premissa para o cálculo do indicador. O VPL determinado para este projeto foi de aproximadamente R\$ 180.923,23. Esse resultado evidencia a viabilidade financeira do projeto, uma vez que o VPL é positivo, indicando que o investimento proporciona um retorno superior ao custo de capital.

A TIR é uma taxa de desconto para a qual o VPL de uma série de fluxos de caixa é zero e é usada para descobrir o retorno anual que um investidor pode esperar de um investimento.

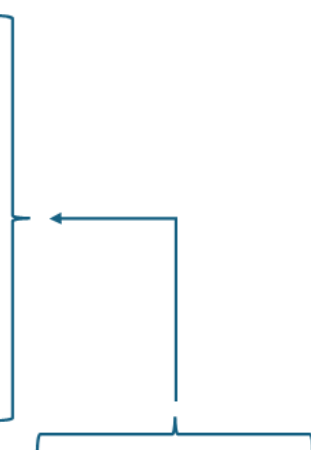
Ela serve como uma medida para avaliar a viabilidade e rentabilidade anual do projeto e é uma ferramenta para avaliação de risco de um investimento. Quando a TIR é maior que o WACC, que foi usado para calcular o VPL, pode-se interpretar que este projeto é viável, pois seu retorno financeiro está acima das expectativas mínimas do investimento. Portanto, se a TIR for menor que o WACC, isso não implica necessariamente que um projeto não vale a pena ser considerado, mas significa que é mais arriscado para o investidor quanto menor for a TIR. Isso é calculado realizando essas simulações de tentativa e erro até que a TIR em que o VPL é zero seja determinada, conforme mostrado abaixo (tabela 3).

TABELA 3: Viabilidade do projeto

TMA:	12%
PERÍODOS:	10 anos
INVESTIMENTO (Ano 0)	-R\$ 200.000,00

Ano	FLUXO DE CAIXA
Ano 1:	R\$ 67.417,38
Ano 2:	R\$ 67.417,38
Ano 3:	R\$ 67.417,38
Ano 4:	R\$ 67.417,38
Ano 5:	R\$ 67.417,38
Ano 6:	R\$ 67.417,38
Ano 7:	R\$ 67.417,38
Ano 8:	R\$ 67.417,38
Ano 9:	R\$ 67.417,38
Ano 10:	R\$ 67.417,38

TIR:	31,53%
	TIR > TMA



Fonte: os autores

Através de diversas simulações realizadas pelo Excel foi possível concluir que, considerando o período analisado (momento do investimento + 10 anos) e o fluxo de caixa projetado (sendo representado pelo retorno anual do investimento), a TIR calculada é de 31,53%. Isso significa que o retorno financeiro do projeto excede as expectativas mínimas do investimento, tornando-o viável.

5. CONCLUSÃO

O objetivo central deste trabalho foi avaliar os efeitos identificados da integração entre sistemas de gestão energética e tecnologias de compressores sobre a eficiência operacional e conseguir resultados econômicos durante a reestruturação de uma planta industrial de uma empresa. Este objetivo foi alcançado.

Em uma análise econômica com os indicadores Payback, VPL e TIR, foi possível constatar que o investimento na mudança do compressor é financeiramente viável. A taxa de retorno demonstrou que o retorno ocorrerá em menos de três anos, e o VPL para a positivo de aproximadamente R\$ 180 mil, demonstrando que, ao longo do tempo, o projeto gera valor real para a empresa. Já quanto a TIR de 31,53%, a mesma supera com folga a taxa mínima de atratividade adotada (12%), apresentando que o investimento não apenas se paga, como consegue também entrega um excelente retorno sobre o capital investido.

O novo compressor, dotado de inversor de frequência, ajusta sua velocidade automaticamente conforme a variação da demanda de ar comprimido. Esse procedimento

proporciona uma operação mais eficiente, reduzindo o consumo de energia e os custos operacionais. Com essa mudança não foi apenas a troca de modelos, mas sim a incorporação de uma solução inteligente e adaptativa e moderna, que amplia a durabilidade dos componentes e melhora o desempenho global do sistema.

Com a implantação dessa nova solução reduziu drasticamente o tempo de operação sem carga, já que antes representava 35% do consumo anual do compressor. Agora a tecnologia VSD (velocidade variável), todo o consumo de energia passa a ser convertido em produção de ar comprimido útil. Essa economia anual que foi de aproximadamente R\$ 67 mil, impactou positivamente nos custos operacionais fixos e contribui para a competitividade do negócio.

Por outro lado, o estudo possui algumas limitações, sendo que uma delas foi não considerar o uso prático de inteligência artificial, atualmente muito utilizada para prever falhas e otimizar o sistema em tempo real, uma vez que isto exigiria uma base de dados mais completa e uma estrutura de tecnologia mais avançada. Também não foi feita uma avaliação ambiental detalhada, como a medição da redução de emissão de CO₂, pois a empresa não possuía os dados técnicos necessários e o projeto não previa ferramentas específicas para este tipo de análise.

Pesquisas futuras no uso de inteligência artificial e aprendizado de máquinas para automatizar decisões relacionadas à energia, principalmente em plantas com grande variabilidade da demanda e múltiplas fontes de energia. Também é desejável que estudos de campo sejam realizados com a aplicação concreta das tecnologias apresentadas, bem como estudos mais aprofundados da análise ambiental, considerando as métricas de emissões e outros indicadores de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABESCO - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **Tema recebe cada vez mais atenção em razão de seus benefícios múltiplos e relevância para o desenvolvimento sustentável.** Disponível em: <https://www.abesco.com.br/eficiencia-energetica-boa-para-a-economia-meio-ambiente-e-para-a-sociedade>. Acesso em: 17 mar. 2025.

ABREU, A. F. et al. Manufatura aditiva: panorama e desafios no contexto da Indústria 4.0. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 18, n. 1, p. 19-36, 2018.

ALMEIDA, J.; OLIVEIRA, C. *Gestão e Otimização de Dados em Sistemas Industriais*. São Paulo: Atlas, 2017.

ASSAF NETO, A. **Finanças corporativas e valor**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

BARROS, R. S.; OLIVEIRA, F. L. **Eficiência energética na indústria**: Avaliação econômica e ambiental. Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

- CAPEHART, B. L.; TURNER, W. C.; KENNEDY, W. J. **Guide to Energy Management**. 8. ed. Lilburn: Fairmont Press, 2020.
- CAVALCANTI, C. A. B.; FERREIRA, P. J. S. **Gestão Energética Industrial: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.
- CULLEN, J. M.; ALLWOOD, J. M.; BORGSTEIN, E. H. Reducing Energy Demand: What Are the Practical Limits? **Environmental Science & Technology**, v. 45, Issue 4, p. 1711-1718, 2011.
- EHRHARDT, M. C.; BRIGHAM, E. F. **Administração financeira: teoria e prática**. 14. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2024**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 30 out. 2024.
- FERREIRA, M.; SANTOS, A. *Integração de tecnologias de compressores em sistemas offshore*. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 3, p. 112-125, 2022.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- INÁCIO, C. A.; MOURA, L. S.; TORRES, E. G. Eficiência energética e tecnologias de controle na indústria brasileira. **Revista Eletrônica de Engenharia de Produção**, v. 16, n. 3, p. 74-89, 2020.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- LOPES, A. C.; VASCONCELOS, L. C. Auditoria energética como ferramenta para eficiência em sistemas industriais. **Revista Gestão Industrial**, v. 14, n. 2, p. 97-112, 2018.
- MARTINS, A. L.; RODRIGUES, F. C.; SILVA, D. S. Transformação digital e competências profissionais na Indústria 4.0: uma análise crítica. **Revista de Administração e Inovação**, v. 20, n. 2, p. 54-68, 2023.
- MEDEIROS, A. F.; SOUZA, P. H. Gestão energética e compressão de dados: uma revisão aplicada à indústria 4.0. **Revista de Engenharia Aplicada**, v. 15, n. 2, p. 88-101, 2020.
- MORAIS, P. S.; OLIVEIRA, F. B.; NASCIMENTO, T. C. Impactos da Indústria 4.0 na manutenção industrial: uma revisão sistemática. **Revista Gestão Industrial**, v. 16, n. 4, p. 187-202, 2020.
- MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia: o presente e o futuro**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2021.
- MOURA, P.; SILVA, S. **Eficiência Energética: Conceitos, Tecnologias e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- OLIVEIRA, R. T.; SANTOS, M. P. **Gestão energética aplicada à indústria: práticas e tecnologias para a eficiência**. São Paulo: Atlas, 2019.
- PEREIRA, L. C.; MARTINS, J. R. **Gestão de Energia: Eficiência, Estratégia e Sustentabilidade**. São Paulo: Érica, 2018.
- PÉREZ-LOMBARD, L. et al. A review of benchmarking, rating and labeling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 272-278, 2009.
- RIBEIRO, A. L.; TEIXEIRA, F. M. Desempenho energético de compressores com inversores de frequência. **Caderno de Engenharia**, v. 6, n. 2, p. 77-88, 2019.
- ROESCH, S. M. A. **Projetos de estágio e de pesquisa em administração**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- SILVA, A. L.; LEAL, F. R. **Gestão de investimentos: fundamentos e estratégias**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- SILVA, L. A.; DESCHAMPS, F.; PÉRES, L. R. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido: análise e oportunidades de economia**. Florianópolis: UFSC, 2007.
- SMITH, J.; COOPER, A. **Tecnologias inteligentes na Indústria 4.0: aplicações em sistemas de compressores de ar**. Nova York: TechPress, 2019.