

Análise da viabilidade energética de sistemas HVAC em localidades de âmbito industrial

Energy feasibility analysis of HVAC systems in industrial settings

Vinicius Silva Behrmann¹
Marcelo O'Donnell Krause²
José Carlos Mendes Pires³
Ittana de Oliveira Lins⁴

RESUMO

Este artigo analisa a viabilidade energética e econômica da modernização de sistemas HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) em ambientes industriais situados em regiões de clima quente e úmido, como a cidade de Ilhéus, Bahia. A pesquisa utiliza de revisões bibliográficas com um estudo de caso teórico-quantitativo, utilizando como cenário base um galpão industrial de 600m² com carga térmica calculada de 144,3 kW. A metodologia inclui o levantamento de índices de eficiência como o COP (Coefficient of Performance), IDRS (Índice de Desempenho de Resfriamento) e SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) de sistemas convencionais e modernos com compressores inverter, propondo também a integração de dispositivos de IoT (Internet das Coisas) para o monitoramento, o cálculo de consumo energético anual (kWh), análise de payback e avaliação térmica por IBUTG conforme NR-15. Os resultados obtidos demonstram que a substituição de compressores com atuação simples por sistemas inverter, associada ao uso de inversores de frequência e recuperadores de calor, promove redução de 37,77% no consumo elétrico anual reduzindo de 185,5 MWh para 115,44 MWh, tendo uma diferença de 70,08 MWh, uma economia de aproximadamente R\$ 66.557 por ano. Seu payback simples é calculado em 7 anos e 7 meses, e o payback descontado considerando a desvalorização da moeda e a taxa de juros com 8% a.a. é de aproximadamente 12 anos e 2 meses. Do ponto de vista térmico-ocupacional, o sistema moderno reduz o IBUTG de 24,2 °C para 20,5 °C, garantindo conformidade com o Anexo III da NR-15. Essa adequação melhora significativamente a qualidade do ambiente de

¹ Discente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia, Brasil

² Docente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia, Brasil

³ Docente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia, Brasil

⁴ Docente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia, Brasil.

trabalho, contribuindo para a saúde e produtividade dos trabalhadores. Conclui-se que a modernização é técnica e economicamente viável para indústrias em regiões de clima tropical. **Palavras-chave:** HVAC; carga térmica; COP; IDRS; IoT; qualidade; NR-15; payback.

ABSTRACT

This article analyzes the energy and economic feasibility of modernizing HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) systems in industrial environments located in hot and humid climate regions, such as the city of Ilhéus, Bahia. The research is based on literature reviews combined with a theoretical-quantitative case study, using as a baseline scenario a 600 m² industrial warehouse with a calculated thermal load of 144.3 kW. The methodology includes surveying efficiency indices such as COP (Coefficient of Performance), CRPI (Cooling Performance Index), and SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) of conventional and modern systems with inverter compressors. It also proposes the integration of IoT (Internet of Things) devices for monitoring, annual energy consumption calculation (kWh), payback analysis, and thermal evaluation through WBGT (Wet Bulb Globe Temperature Index) according to NR-15 standards. The obtained results demonstrate that replacing single-stage compressors with inverter systems, combined with the use of frequency inverters and heat recovery units, promotes a 37.77% reduction in annual electricity consumption, decreasing from 185.5 MWh to 115.44 MWh, with a difference of 70.08 MWh and savings of approximately R\$ 66,557 per year. The simple payback period is calculated at 7 years and 7 months, while the discounted payback, considering currency depreciation and an annual interest rate of 8%, is approximately 12 years and 2 months. From a thermal-occupational perspective, the modern system reduces the WBGT index from 24.2 °C to 20.5 °C, ensuring compliance with Annex III of NR-15. This adjustment significantly improves the quality of the work environment, contributing to workers' health and productivity. It is concluded that modernization is technically and economically feasible for industries located in tropical climate regions.

Keywords: HVAC; thermal load; COP; CRPI; IoT; quality; NR-15; payback.

1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência energética é um tema central na atualidade, impulsionada pela escassez de recursos e pelos elevados custos da energia elétrica. No Brasil, as edificações residenciais e industriais são responsáveis por aproximadamente 50% do consumo de energia elétrica nacional (Empresa de Pesquisa Energética (EPE)). Muitas indústrias ainda operam com instalações antigas e sistemas de climatização com tecnologia ultrapassada e dimensionamento de carga térmica inadequado com índices de eficiência COP, EER, e SEER, com baixos valores nominais, o que resulta em elevados desperdícios, maior custo de operação e impacto negativo sobre processos produtivos sensíveis às condições térmicas e de qualidade do ar, impactando não só na produção e eficiência da indústria, mas também na

saúde e longevidade dos trabalhadores que atuam nesses setores, podendo também resultar em doenças ocupacionais.

O sistema HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) compreende o conjunto de tecnologias para controlar a temperatura, umidade e qualidade do ar em ambientes internos, podendo ser resumido como um grupo de componentes que move o calor para onde é necessário, ou removê-lo de onde não é necessário, afinal, em locais fechados com muitas pessoas e, em caso de indústrias, muitas máquinas, o dióxido de carbono expelido, fumaça de cigarros e odores das máquinas precisam ser continuamente removidos pela circulação do ar interno da estrutura (Sugarman, 2005). No contexto industrial, o HVAC é crucial não apenas para o conforto térmico dos trabalhadores, mas também para a eficiência produtiva, a conservação de equipamentos sensíveis e o atendimento às exigências regulatórias (Innovar Controls, 2025).

Em regiões de clima tropical e costeiro, como a Bahia, onde as altas temperaturas médias e a umidade elevada aumentam significativamente as cargas de resfriamento, a análise de alternativas para melhorar a eficiência energética dos sistemas de climatização é de grande interesse, sendo a cidade de Ilhéus um polo de estudo relevante. O estudo a seguir tem como objetivo analisar em termos técnicos o sistema HVAC industrial de modo a melhorar a qualidade do ambiente e o desempenho dos processos produtivos.

“Os objetivos dos sistemas HVAC é providenciar um nível aceitável de conforto para os ocupantes e para o funcionamento dos processos, para manter uma boa qualidade do ar interno (IAQ), e manter os custos do sistema e requisitos de energia no mínimo” (Sugarman, 2005).

Poderiam as intervenções de modernização e automação em sistemas HVAC industriais, (como atualização de compressores, uso de inversores de frequência, recuperação de calor, controle automático) reduzir o consumo de energia elétrica e melhorar a eficiência da qualidade do ar de forma significativa em indústrias situadas em clima quente e úmido, sem comprometer a qualidade do ar e o conforto térmico?

Sistemas de condicionamento de ar possuem constante evolução quanto à eficiência de seus componentes e materiais, o que melhora os índices de conversão da energia elétrica em energia térmica útil, sendo assim, quanto mais antiga for a estrutura de climatização, maior tende a ser o consumo de energia para realizar o mesmo trabalho. Além da economia, o projeto se justifica pelo imperativo da saúde e segurança ocupacional. Em ambientes industriais de Ilhéus, o calor excessivo e a umidade elevada podem violar os limites de

tolerância estabelecidos pela NR 15 – Atividades e operações insalubres, Anexo N° 3: Limites de tolerância para exposição ao calor (Ministério do Trabalho e Emprego, 2019), afetando diretamente a produtividade, a saúde dos trabalhadores e gerando passivos trabalhistas.

Em uma reportagem da agência de jornalismo Repórter Brasil, foi exposta condições extremas de calor no ambiente de trabalho, “Começamos a passar mal. Tive pressão baixa e dor de cabeça. Parei de trabalhar e fui para fora da fábrica até melhorar”, relatou um funcionário sobre os efeitos do calor intenso. Segundo a matéria, o local era um galpão pequeno, com o teto baixo de zinco e sem ventilação adequada (Repórter Brasil, 2024).

O objetivo deste artigo é analisar a viabilidade energética e econômica da modernização de sistemas HVAC industriais em comparação a sistemas convencionais, visando a redução do consumo de energia elétrica e a melhoria da qualidade do ambiente de trabalho em indústrias localizadas em Ilhéus, Bahia.

A relevância deste estudo reside na significativa participação dos sistemas HVAC no consumo energético industrial brasileiro, especialmente em regiões de clima quente e úmido como Ilhéus. O alto custo operacional e o impacto ambiental decorrentes da ineficiência energética justificam a urgência de buscar soluções de modernização (Ministério de Minas e Energia (MME), 2024).

Portanto, a pesquisa se justifica por oferecer uma análise técnica e economicamente viável para a modernização dos sistemas HVAC, contribuindo principalmente para indústrias com grande consumo de energia elétrica, um projeto bem planejado para HVAC industrial poderia gerar uma economia considerável de energia, reduzindo os custos fixos e aumentando também a lucratividade da empresa através de sua produtividade otimizada pelo ambiente de trabalho (Innovar Controls, 2025).

Assim, é possível destacar três pontos importantes para o trabalho, a sustentabilidade e a economia que o sistema HVAC promoverá graças a redução do consumo de energia elétrica, juntamente com a análise de seu retorno financeiro, e o bem-estar ocupacional gerado para os trabalhadores no ambiente de trabalho cujo sistema será instalado, proporcionando áreas mais salubres e turnos produtivos em conformidade com a legislação vigente, além do conforto térmico proporcionado.

O terceiro ponto a ser abordado, refere-se ao desempenho importante que o sistema HVAC vem desempenhando para a descarbonização, pois com a crescente preocupação referente ao aquecimento global e as emissões de carbono, suas tecnologias se direcionaram para atender as demandas de sustentabilidades através de fontes limpas diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e visando energias renováveis, além de reduzir a

demanda por eletricidade proveniente de fontes não renováveis, dessa forma “espera-se uma melhora para o meio ambiente e qualidade de vida, impactos positivos na economia, redução nos gastos com energia e maior eficiência energética.” (Portal Engenharia e Arquitetura, 2022).

Em suma, além de um sistema que otimiza e mantém um ambiente de trabalho saudável, através de sua eficiência energética, desempenha também um papel considerável na redução da emissão de carbono e no combate às mudanças climáticas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Sistema HVAC Na Indústria

O sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, do inglês Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC), é fundamental para manter a estabilidade ambiental na indústria, impactando a qualidade da produção, a durabilidade dos equipamentos e a saúde dos colaboradores (Innovar Controls, 2025). Suas funções essenciais incluem:

- Aquecimento (Heating): Gera calor para ambientes quando necessário, por exemplo, para manter a temperatura interna mais alta em dias frios, mas também ajuda a controlar a umidade relativa do ar, já que ao aquecer o ar pode-se afetar a umidade interna. Pode-se usar diferentes fontes ou tecnologias tais como caldeiras, bombas de calor e resistências elétricas;

- Ventilação (Ventilation): Em grandes locais de trabalho, o dióxido de carbono e odores de maquinários necessitam ser constantemente removidos do ambiente para que seja proporcionado uma condição de trabalho saudável, processo que pode ser natural através de janelas, ou mecânica através de ventiladores, dutos e filtros, sua função é regular a circulação de ar promovendo a renovação do ar interno, trazendo um ar “novo” (externo) para dentro e expulsa o ar “velho” (interno) contribuindo para a qualidade do ar ao remover as impurezas, odores e outros possíveis poluentes; , seus componentes são tipicamente instalados no teto da estrutura, onde um sistema de ventilação permite que o ar “novo” circule pelos dutos até as áreas internas, e o ar “velho” circula por dutos que retorna e se mistura com o ar exterior (Sugarman, 2005).

- Ar-Condicionado (Air Conditioning): “Um ciclo mecânico de refrigeração é um sistema completamente fechado consistindo em quatro diferentes estágios: expansão, evaporação, compressão e condensação.” (Sugarman, 2005). O sistema controla a temperatura interna quando é necessário resfriar retirando o calor do ambiente para torná-lo mais agradável através de um ciclo de refrigeração utilizando compressores, evaporadores e

condensadores, podendo também controlar a umidade relativa do ar para manter um nível de conforto adequado e evitando a condensação ou o mofo. Por possuir filtros, também é possível remover poeira, partículas, e micro-organismos para melhorar a higiene e a qualidade do ar interno.

Existem quatro tipos de sistema de ar-condicionado em função da forma de troca de calor e do meio utilizado, o sistema água-para-água, ar-para-água, ar-para-ar e água-para-ar.

No sistema água-para-água, o refrigerante libera seu calor para a água em um condensador resfriado por água, e essa água gelada é então utilizada em serpentinas de unidades internas para climatizar os ambientes, sendo comum em instalações de grande porte que utilizam bombas para circulação da água fria (Sugarman, 2005).

O sistema ar-para-água, também utiliza água gelada nas serpentinas internas, porém o condensador do circuito de refrigeração é resfriado diretamente por ar em vez de água nas unidades de tratamento de ar (Sugarman, 2005).

No sistema ar-para-ar, o circuito de refrigeração possui um condensador resfriado por ar e as unidades internas trocam calor diretamente com o ar dos ambientes através de evaporadores de expansão direta do refrigerante, sem o uso de um fluido intermediário. Esse é o tipo mais comum em sistemas residenciais e comerciais leves, como unidades de janela (Sugarman, 2005).

Finalmente, no sistema água-para-ar, o condensador é resfriado por água e o ar frio é distribuído para os ambientes através de serpentinas e ventiladores. Esse tipo de sistema pode ser utilizado em climatizações centrais com grande carga térmica (Sugarman, 2005).

Em todos esses sistemas, o ciclo de refrigeração por compressão de vapor é composto por três equipamentos principais: o evaporador, o compressor e a condensadora.

As evaporadoras ficam localizadas dentro do ambiente a ser climatizado, sua principal função é permitir que o refrigerante absorve o calor do ar interno, onde o ar quente do ambiente é forçado por um ventilador a passar pelas serpentinas da evaporadora, assim, o refrigerante em baixa pressão evapora ao absorver esse calor, resfriando o ar que é devolvido ao ambiente. (Sugarman, 2005). O compressor é o componente que movimenta o refrigerante no ciclo, pois o recebe na forma de gás de baixa pressão da evaporadora e o comprime, aumentando sua pressão e temperatura (Mitsubishi Electric Europe B.V., 2023). A condensadora então recebe o refrigerante quente e de alta pressão que saiu do compressor, dissipando o calor para o ar ou para a água de resfriamento, condensando o refrigerante de volta ao estado líquido antes de seguir ao dispositivo de expansão e retornar à evaporadora. (Sugarman, 2005).

Sistemas modernos são projetados para reduzir o consumo de energia e otimizar o uso de refrigeração e aquecimento, podendo resultar em até 30% de economia com a manutenção adequada. Um sistema eficiente pode operar adaptando-se às variações climáticas, às densidades de ocupação e às necessidades de renovação do ar.

2.2 Tipos De Sistemas HVAC

Nem todos os sistemas HVAC são iguais, pois existem variáveis como a necessidade do empreendimento, as condições climáticas, e principalmente a variação de equipamentos e possibilidades de maneiras de refrigeração, porém, é possível definir os principais tipos de sistemas utilizados em edificações (Sugarman, 2005):

- **Sistemas Compactos:** São amplamente utilizadas em aplicações onde os requisitos de desempenho são menos exigentes e onde se busca um menor custo inicial aliado a uma instalação simplificada. Essas aplicações podem incluir, por exemplo, hotéis, pequenas indústrias, edificações comerciais e outras construções com vida útil limitada ou menor potencial de investimento. Entretanto, essas unidades também podem ser empregadas em aplicações que exigem desempenho elevado e controle mais rigoroso das condições ambientais, como salas de computadores, laboratórios e ambientes controlados (Sugarman, 2005).
- **Ares-condicionados e bombas de calor tipo janela:** São utilizados para climatizar ambientes individuais, sendo capazes de realizar tanto o resfriamento quanto o aquecimento, caso necessário, de espaços específicos, e apresentam uma instalação simples e rápida. Além disso, podem ser utilizados como complemento a sistemas centrais de climatização para áreas específicas ou para atender ambientes quando o sistema central não está em operação, nesses casos, tanto o sistema central quanto às unidades de janela são dimensionados de forma independente, de modo que cada um seja capaz de suprir adequadamente a carga térmica do ambiente sem depender do outro (Sugarman, 2005).
- **Ares-condicionados de parede, Condicionadores de ar terminais compactos e bombas de calor:** Consistem em equipamentos autônomos que integram, em uma única unidade, todos os componentes necessários para climatização, esses sistemas incorporam um sistema de refrigeração e um sistema de aquecimento que pode ser elétrico, a gás, por água quente, ou vapor, juntamente com ventiladores, controles e demais componentes em um único conjunto compacto. Seu funcionamento baseia-se em tratar cada zona como independente, com controle individual por meio de termostatos, permitindo que o usuário

ajuste as condições térmicas conforme a necessidade específica do ambiente. Esses sistemas são normalmente utilizados em edificações como apartamentos, hospitais, unidades multifamiliares, e unidades empresariais e comerciais de grande escala.

2.3 Índices De Eficiência (COP, IDRS, Se).

O COP (Coefficient of Performance) é uma métrica que mede a eficiência instantânea de um sistema térmico relacionando a energia térmica útil entregue com a energia elétrica consumida, quanto maior o COP, mais eficiente é o equipamento sendo muito utilizado principalmente para estudos de bombas de calor, “Com uma melhor eficiência teremos sistemas que necessitam de menos trabalho para realizar o efeito desejado, sendo assim, teremos menor consumo de energia e menor desgaste nos componentes do sistema” (Guimarães, et al., 2024). Seu cálculo é feito para classificar o quão eficiente é um sistema de calor em termos de consumo e produção da energia sendo muito utilizado no exterior principalmente em normas nos EUA e Europa, sendo parte fundamental da regulação de eficiência energética, seu cálculo baseia-se na seguinte fórmula vista na Equação (1) (Aliyarzadeh, 2016):

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

Onde:

COP: Coeficiente de Desempenho;

Q: Capacidade de refrigeração térmica (W);

W: Potência elétrica consumida (W).

Ao analisar continuamente seu desempenho, sistemas mais eficientes surgem prevenindo falhas da máquina, resultando em menor consumo e desgaste dos componentes (Aliyarzadeh, 2016).

Entretanto, no Brasil o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Inmetro, adotou a métrica do Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal, IDRS.

O índice IDRS foi formalizado pelo Inmetro para reclassificar a eficiência de condicionadores de ar e considera ensaios em diferentes pontos de carga e temperaturas externas típicas do uso real no Brasil. A fórmula do IDRS é a razão entre a carga térmica total sazonal em que o aparelho pode remover e a energia elétrica total consumida nesse ciclo

sazonal, sendo uma métrica realista para o consumo pois reflete o comportamento do aparelho em condições variáveis e usa ensaios que são mais eficientes nesses períodos (MDIC, 2022).

$$IDRS = \frac{Q_{anual}}{E_{anual}} \quad (2)$$

Onde:

$IDRS$: Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal;

Q_{anual} : Quantidade anual total de calor que o equipamento pode remover (Wh);

E_{anual} : Quantidade anual total de energia consumida pelo equipamento durante o mesmo período (Wh).

O IDRS é considerado mais representativo do consumo real no Brasil por refletir o comportamento do equipamento em condições variáveis de uso (Lustosa, 2022).

Tabela 1- Melhor Marca de Sistema Split Para Eficiência Energética

Marca	EER (BTU/Wh)	COP (W/W)	Média Total (BTU/Wh)
Daikin	13,82	4,17	14,02
Mitsubishi	13,68	4,14	13,92
Toshiba	13,58	4,11	13,81
Panasonic	13,04	4,01	13,36
ActronAir	12,93	4,02	13,33

Fonte: (Simply Air Heating and Cooling, 2023)

“A norma ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 90.1, Seção 6.8, estabelece requisitos mínimos de eficiência energética para equipamentos de HVAC por meio de tabelas abrangentes organizadas por categoria de equipamento, faixa de capacidade e características operacionais. Esses mínimos de eficiência prescritivos representam níveis de desempenho alcançáveis com base na tecnologia atual e nas capacidades de fabricação” (HVAC Systems Encyclopedia, 2026)

Para a criação da Tabela 1 foram adotados valores de parâmetro como COP, EER e SEER declarados por fabricantes como Daikin, Mitsubishi, Toshiba e Panasonic, e comparando sua eficiência com as mais altas e eficientes no topo, não levando em consideração tamanhos, porém, para industrial devemos considerar equipamentos split de grande porte (Simply Air Heating and Cooling, 2023).

Tabela 2- Sistema Split de Grande Porte (6kW – 9kW)

Marca	Resfriamento EER (BTU/Wh)	Aquecimento COP (W/W)	Eficiência Média (BTU/Wh)
Daikin Alira X	13,82	4,47	14,54
Mitsubishi Heavy Industries Bronte Series	13,61	4,44	14,40
Daikin Cora	13,48	4,42	14,29
Daikin Alira X	13,82	N/A	13,82

Fonte: (Simply Air Heating and Cooling, 2023)

Com a Tabela 2 evidenciando dados declarados por fabricantes é possível comparar com a Tabela 6.8.1-1 da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 90.1 que estabelece requisitos para condicionadores de ar unitários e unidades condensadoras operados eletricamente, variando de acordo com o tipo e capacidade de refrigeração.

Tabela 3- Valores típicos de desempenho com base em normas e literaturas técnicas

Parâmetro	Sistema Tradicional (Compressor Simples)	Sistema Moderno (Compressor Inverter)
COP aquecimento	2,5 – 3,5	4,0 – 5,0
EER (plena carga)	8 – 10	11 – 14
SEER	10 – 13	18 – 30
Operação do compressor	Liga/Desliga (ciclos completos)	Modulação Contínua
Consumo em carga parcial (50%)	~90% do nominal	~55% do nominal
Faixa típica de modulação	Não aplicável	15% – 20%
Vida útil estimada (anos)	10 – 12 anos	15 anos

Fonte: Dados do projeto.

Assim, com a Tabela 3 é possível notar que sistemas modernos com compressores inverter apresentam COP médio 67% superior aos sistemas convencionais de atuação simples, a modulação contínua elimina picos de ineficiência causados por partidas frequentes, onde, em um sistema de atuação simples seria realizada uma partida em condições de carga parcial, consumindo até 90% da potência nominal mesmo em demanda de 50%, o inverter nessas mesmas condições, opera com apenas 55% da potência nominal (Mitsubishi Electric, 2023).

2.4 Tempo De Retorno Financeiro (Payback).

No contexto de sistemas HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado), o payback financeiro é uma métrica essencial para avaliar a viabilidade econômica de um investimento em eficiência energética ou modernização de equipamentos, pois representa o tempo necessários para que as economias, principalmente na conta de energia elétrica, compensam o custo inicial da implementação de um novo sistema.

Uma análise payback bem feita considera não apenas o custo do equipamento, mas também a instalação, e o desempenho energético do sistema novo, já que esses fatores influenciam diretamente as economias, “o principal objetivo do payback é medir o risco e a rapidez do retorno, pois traz maior visibilidade na hora de comparar opções de investimento com base no tempo de recuperação do capital.” (Rios, 2025)

2.4.1 Payback Simples

O Payback Simples é uma forma de payback onde é desconsiderado a inflação e os juros, isso acontece porque seu objetivo é simplesmente analisar em quanto tempo, no mínimo, seu capital inicial será recuperado, atuando como um bom filtro inicial, permitindo que seja descartado rapidamente projetos ineficientes sem a necessidade de cálculos complexos com prazos máximos pré-estabelecidos por gestores. Seu cálculo se resume à seguinte fórmula (Mazzotti, 2024):

$$\text{Payback Simples} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa}} \quad (3)$$

Onde:

Investimento Inicial: É o valor total gasto para iniciar o projeto ou comprar o equipamento;

Fluxo de Caixa: É o valor líquido que o investimento gera no mesmo período específico.

2.4.2 Payback Descontado

O Payback Descontado é uma fórmula de cálculo mais precisa e complexa que o apresentado anteriormente, pois considera a desvalorização do dinheiro no tempo. Para isso, ele aplica uma taxa de desconto sobre o lucro, garantindo uma análise mais realista e segura. Por causa desse desconto, o payback descontado será sempre mais demorado do que o simples, seu cálculo também será diferente, pois exige duas etapas, primeiro é preciso encontrar o fluxo de caixa para o Valor Presente (VP) (Mazzotti, 2024):

$$VP = \frac{FC}{(1+k)^n} \quad (4)$$

Onde:

VP : Valor Presente, o fluxo de caixa já ajustado para o valor do dia;

FC : Fluxo de Caixa daquele período específico;

k : Taxa de atratividade;

n : O período de tempo em anos.

Após calcular o Valor Presente para o projeto, é feita uma soma contínua dos valores de VP até que o total acumulado iguale o seu investimento inicial. Assim, o valor que se igualar será o valor do payback descontado.

$$Payback Descontado = \frac{Investimento Inicial}{VP} \quad (5)$$

2.5 Carga Térmica e Equação de Balanço

A carga térmica total de um ambiente industrial (Q_T) representa a quantidade de calor que o sistema HVAC deve remover para manter as condições internas de operação. Este cálculo é de suma importância pois evidencia a quantidade de calor que o sistema precisa remover, ou adicionar, um projeto mal calculado pode resultar em problemas de subdimensionamento, transformando o sistema em ineficiente, ou podendo também estar superdimensionado, resultando em um custo desnecessário para a execução do sistema. De acordo com a metodologia da ASHRAE, a carga térmica total pode ser expressa como a soma das cargas sensíveis e latentes, como visto na Equação (6) abaixo (ASHRAE, 2008).

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (6)$$

Onde:

Q_T : Carga térmica total do ambiente;

Q_S : Carga térmica sensível;

Q_L : Carga térmica latente.

A carga térmica sensível é composta pelas contribuições de transmissão térmica pelas superfícies, radiação solar, infiltração de ar, ocupação, iluminação e equipamentos, enquanto que a carga latente está associada principalmente à infiltração de ar úmido e à presença de

ocupantes. Assim, o balanço térmico do ambiente pode ser representado pela soma de todas as fontes de ganho de calor (ASHRAE, 2008). Assim, a Equação (6) apresentada anteriormente pode ser reajustada da seguinte forma:

$$Q_T = Q_{Solar} + Q_{Cond} + Q_{Equip} + Q_{Illum} + Q_{Ocup} + Q_{Inf} \quad (7)$$

Onde:

Q_T : Carga térmica total do ambiente;

Q_{Solar} : Ganho solar pela cobertura e paredes;

Q_{Cond} : Condução pelas envolturas opacas;

Q_{Equip} : Calor gerado por máquinas e motores;

Q_{Illum} : Carga de iluminação;

Q_{Ocup} : Carga de ocupação (metabolismo humano);

Q_{Inf} : Carga de infiltração e renovação de ar.

Para o galpão industrial de referência deste estudo (600m², Ilhéus, orientação norte), os coeficientes de carga foram estimados com base nos dados climáticos do INMET para a cidade (T_{bs} = 36,5 °C e umidade relativa = 83% no verão) e nas diretrizes do ASHRAE Handbook of Fundamentals.

2.6 Calor E Doenças Ocupacionais - NR-15 e IBUTG

A exposição de trabalhadores a calor excessivo ou locais com pouca ventilação em fábricas representa sério risco à saúde (como desidratação, insolação e problemas respiratórios) e leva à queda de produtividade. O calor pode ser definido como o aumento da temperatura do ar em determinado ambiente, seja por meio artificial, ou por motivo sazonal devido à época do ano, podendo ser chamado de ondas de calor, de modo que essas exposições prolongadas a alta temperatura é considerada insalubre conforme legislação, podendo resultar em doenças ocupacionais, e a longo prazo aumenta a taxa de enfermidades por doenças respiratórias e cardiovasculares (Bitencourt, et al., 2023).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o acúmulo de calor no corpo do trabalhador através da combinação de fatores externos presentes no ambiente de trabalho combinado com vestimentas que dificultam a perda de calor e EPIs utilizados pelo trabalhador pode causar provocar uma sobrecarga resultando em sintomas clínicos como por exemplo a

hipertermia, comprometimento da função renal e desidratação (OMS, 2025). Alguns exemplos são aventais impermeáveis, toucas, respiradores, botas e luvas, pois reduzem a forma do corpo de eliminar calor através da transpiração, retendo o excesso de calor em seu interior e fazendo com que o trabalhador aqueça mais rapidamente (CDC, 2026).

“Assim, o estresse térmico é o estado onde tanto o sistema fisiológico quanto o sistema psicológico são atingidos pela temperatura do ambiente em que se localiza, quando esta temperatura encontra-se em níveis extremos e muito exigentes.” (Rosa, 2019)

A Norma Regulamentadora NR-15, em seu Anexo III, trata das atividades insalubres, incluindo os limites de tolerância para exposição ocupacional ao calor, utilizando o Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) que obtém-se através da análise da temperatura do bulbo úmido natural, do bulbo seco e do globo, é aceito como parâmetro de mensuração desenvolvido para refletir os efeitos conjugados da umidade, radiação térmica e temperatura do ar, fatores que interagem e podem provocar estresse térmico no corpo humano (Camargos, et al., 2024).

$$IBUTG_{int} = 0,7.T_{bn} + 0,3.T_g \quad (8)$$

$$IBUTG_{int} = 0,7.T_{bn} + 0,2.T_g + 0,1.T_{bs} \quad (9)$$

Onde:

T_{bn} : Temperatura do bulbo úmido natural;

T_g : Temperatura de globo;

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco (ar).

O limite de tolerância para regime de trabalho contínuo, conforme a NR-15 (Anexo 3), pode atingir valores de IBUTG de até 25,0 °C, sendo esse limite variável conforme a taxa metabólica da atividade desempenhada. Nesse contexto, o sistema HVAC moderno, ao promover a redução da temperatura de globo e da temperatura de bulbo úmido natural através do controle da temperatura e da umidade do ar, resulta em uma das principais medidas de engenharia para adequação às condições de conforto térmico e atendimento aos limites de tolerância estabelecidos.

Assim, quando os limites de calor são ultrapassados, a empresa pode ser obrigada a adotar medidas de controle como ventilação, pausas térmicas, hidratação, ou pagar adicional de insalubridade, porém, boa parte dos riscos relacionados ao calor pode ser mitigada com sistemas HVAC bem projetados permitindo o controle da carga térmica, tendo como objetivo

a redução do esforço que o organismo faz para manter o balanço térmico, gerando uma neutralidade térmica do corpo humano, ou seja, a condição em que o trabalhador esteja em equilíbrio com o ambiente ao seu redor (Rosa, 2019).

2.7 IoT como ferramenta de controle e monitoramento

Conforme (Carrion, et al., 2019) o termo internet das coisas, ou IoT (do inglês, Internet of Things), pode ser definido como uma rede coletiva de conexão com dispositivos e sistemas para facilitar a troca de informações e coleta de dados para monitoramento e controle automatizado, que funciona desde a coleta de informação através de sensores, até a aplicação dos dados analisados em softwares específicos conforme a necessidade do consumidor final.

No contexto de sistemas HVAC, a IoT possibilitaria o monitoramento contínuo de variáveis ambientais, como temperatura, umidade, qualidade do ar e consumo energético, permitindo ajustes automáticos para otimização do desempenho. Seus sensores distribuídos ao longo do ambiente permitem coletar dados em tempo real sobre variáveis envolvidas no cálculo da carga térmica, como temperatura interna, radiação e ocupação, aumentando sua precisão referente aos modelos térmicos.

Além disso, a integração de sensores IoT permitem o monitoramento contínuo das variáveis T_{bn} , T_g e T_{bs} , possibilitando o cálculo automático do índice IBUTG e a verificação em tempo real das condições de conforto térmico e insalubridade ocupacional, possibilitando a implementação de estratégias de controle e manutenção inteligente.

3 METODOLOGIA

A pesquisa adota uma metodologia mista composta por duas etapas complementares, a revisão bibliográfica e o estudo de caso teórico. Essa abordagem foi escolhida tendo em vista a necessidade de fundamentar os critérios técnicos de eficiência energética por meio da literatura e, em seguida, demonstrar numericamente os ganhos da modernização proposta.

3.1 Revisão Bibliográfica

Foram consultados artigos científicos, normas técnicas brasileiras, como a NR-15 e a ABNT NBR 16401, bem como normas internacionais, incluindo a ASHRAE 90.1:2022 e a ISO 16358. Também foram analisados documentos regulatórios do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e relatórios técnicos de fabricantes, como Mitsubishi Electric e Carrier. A seleção das

fontes priorizou publicações dos últimos cinco anos, com exceção de obras clássicas relevantes para o tema, como Sugarman (2005).

3.2 Definição do Cenário de Referência

Para o desenvolvimento do estudo de caso foi definido um galpão industrial hipotético, com base em dados reais e representativo de instalações industriais típicas da cidade de Ilhéus, Bahia. Permitindo assim uma análise de desempenho energético em condições próximas à realidade operacional, assim, as principais características do cenário adotado são:

- Área construída: 600 m² (30 m × 20 m, pé-direito 6 m)
- Localização: Ilhéus, BA (latitude 14,8°S; longitude 39,0°W)
- Cobertura: telha metálica tipo trapezoidal (alta condutância térmica)
- Ocupação: 40 trabalhadores em regime de trabalho moderado
- Maquinário: 15 motores elétricos de 3,5 kW médios
- Luminárias: vapor de sódio, densidade de potência 20 W/m² (sistema convencional)
- Horário de operação: 10 horas/dia, 360 dias/ano = 3.600 h/ano
- Tarifa de energia: R\$ 0,95/kWh (tarifa industrial média, COELBA 2025)

3.2.1 Cálculo da Carga Térmica Total

A partir das condições definidas anteriormente, foi realizado o levantamento das principais fontes de cargas térmicas presentes no ambiente, considerando a radiação solar, condução térmica, equipamentos e iluminação. Para a carga térmica total apresentada na Tabela 4, foi calculada pela Equação (7) citada anteriormente, com os seguintes coeficientes de carga para o clima de Ilhéus no período mais crítico do verão, conforme a ASHRAE (do inglês, Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado) e dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET):

Tabela 4 – Estimativa de carga térmica do galpão de referência (600m², Ilhéus – BA)

Fonte de Carga Térmica	Área / Qtd.	Fator de Carga (W/m ² ou W/un.)	Carga Parcial (kW)
Cobertura metálica (ganho solar)	600 m ²	80 W/m ²	48,0
Paredes externas (condução)	400 m ²	35 W/m ²	14,0
Máquinas e motores	15 unid.	3,5 kW/unid.	52,5
Iluminação industrial	600 m ²	20 W/m ²	12,0

Fonte de Carga Térmica	Área / Qtd.	Fator de Carga (W/m ² ou W/un.)	Carga Parcial (kW)
Ocupação (trabalhadores)	40 pessoas	175 W/pessoa	7,0
Infiltração / renovação de ar	600 m ²	18 W/m ²	10,8
Carga Térmica Total (Q_T)			144,3 kW

Fonte: ASHRAE Handbook of Fundamentals (2021); INMET Estação Ilhéus (2024). Dados do projeto.

É possível observar que as maiores contribuições para a carga térmica total estão associadas aos equipamentos e à radiação solar, o que é característico de ambientes industriais com elevada densidade de maquinário instalado, resultando em uma carga térmica total calculada de 144,3 kW, correspondendo a uma densidade de aproximadamente 240 W/m². Esse valor é típico de galpões industriais de médio porte com processo produtivo de intensidade moderada.

3.2.2 Estimativa de Consumo Energético

A equação utilizada para estimativa do consumo energético anual baseia-se na definição do coeficiente de desempenho (COP), que relaciona a capacidade térmica do sistema com a potência elétrica consumida. A partir dessa relação, é utilizada e reorganizada a Equação (1) apresentada anteriormente de forma que a potência elétrica possa ser expressa como a razão entre a carga térmica e o COP, considerando o tempo de operação, obtém-se o consumo energético ao longo do período analisado, apresentado na Equação (10):

$$E_{anual} = \frac{Q_T}{COP_{efetivo}} \cdot H_{operação} \quad (10)$$

Onde:

Q_T : Capacidade térmica total (kW);

E_{anual} : Potência elétrica consumida anual (kW);

$COP_{efetivo}$: COP do sistema a ser comparado;

$H_{operação}$: Tempo de operação do sistema.

O COP efetivo adotado para cada sistema considera a degradação de desempenho em condições reais de operação, especialmente em carga parcial, com base em tendências observadas em curvas de desempenho de fabricantes e literatura técnica. Para os valores médios adotados, utilizou-se os dados apresentados na Tabela 3, onde sistemas com

funcionamento simples, essa degradação resulta em valores típicos próximos de 2,8 enquanto sistemas modernos com tecnologia inverter apresentam COP efetivo médio em torno de 4,5 devido ao melhor desempenho em regime de carga parcial.

Considerando a carga térmica total calculada pela Tabela 4 e aplicando a Equação (10) para a comparação dos dois cenários do sistema obtemos os seguintes resultados apresentados na Tabela 5:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{tradicional}} &= \left(\frac{144,3}{2,80} \right) \cdot 3600 \\
 E_{\text{tradicional}} &= 51,53 \cdot 3600 \\
 E_{\text{tradicional}} &= 185,52 \text{ MWh/ano} \\
 \\
 E_{\text{moderno}} &= \left(\frac{144,3}{4,50} \right) \cdot 3600 \\
 E_{\text{moderno}} &= 32,07 \cdot 3600 \\
 E_{\text{moderno}} &= 115,44 \text{ MWh/ano}
 \end{aligned}$$

Tabela 5 – Estimativa de consumo energético anual e custo operacional por cenário

Cenário	COP Efetivo	Potência Elétrica Consum. (kW)	Horas/ano (operação)	Consumo Anual (MWh)	Custo Anual (R\$ 0,95/kWh)
Sistema Tradicional	2,80	51,5	3.600	185,52	R\$ 176.225
Sistema Moderno	4,50	32,07	3.600	115,44	R\$ 109.668
Economia	–	–	–	70,08 MWh/ano	R\$ 66.557/ano
Redução Percentual				37,77%	37,77%

Fonte: ASHRAE Handbook of Fundamentals (2021); Tarifa COELBA (2025); Dados do projeto.

Considerando um custo de kWh fixo o ano inteiro, encontrou-se economia de R\$ 66.557,00 ao ano pelo consumo de energia elétrica e uma redução de 70,08 MWh/ano, ou 37,77%. Vale ressaltar que esse resultado representa também uma diminuição de aproximadamente 3,86 toneladas de CO₂ equivalente por ano, considerando o fator de emissão da rede elétrica brasileira de 0,0551 tCO₂/MWh (MCTI, 2023).

3.2.3 Análise de Payback

O payback simples foi calculado com base na Equação (4), enquanto o payback descontado foi determinado pela Equação (5), adotando-se uma taxa mínima de atratividade de 8% ao ano. O investimento inicial foi estimado a partir de valores de mercado referentes

aos equipamentos e serviços necessários para a modernização do sistema HVAC, permitindo assim avaliar sua viabilidade econômica tanto sob a perspectiva de retorno direto quanto considerando o valor do dinheiro no tempo, ademais, a incorporação de tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT) poderia potencializar a redução do consumo energético por meio do monitoramento em tempo real e controle automatizado, contribuindo para a diminuição do tempo de retorno do investimento.

Dessa forma, o orçamento de modernização foi elaborado com base em uma estimativa de preços médios de mercado para principais componentes dos sistemas HVAC industriais no Brasil em 2025, podendo variar conforme a complexidade da instalação, infraestrutura necessária e especificações técnicas. Assim, na Tabela 6 foi contemplando itens necessários para a implantação o refrigerador Daikin EW(W)(H)(L)T, inversores de Frequência, bombas, tubulação e infraestrutura, e a instalação do projeto:

Tabela 6 – Orçamento de modernização e análise de payback

Item de Custo	Qtd. / Área	Custo Unitário (R\$)	Subtotal (R\$)
Chiller Inverter (200 kW)	1 unid.	R\$ 280.000	R\$ 280.000
Unidade fan-coil	8 unid.	R\$ 8.500	R\$ 68.000
Sistema de automação (BAS/BMS + IoT)	1 sistema	R\$ 20.000	R\$ 20.000
Bombas hidráulicas	2 unid.	R\$ 15.000	R\$ 30.000
Recuperador de calor (ERV)	1 unid.	R\$ 18.000	R\$ 18.000
Infraestrutura (Tubulação e dutos de ar)	–	–	R\$ 50.000
Mão de obra e instalação	–	–	R\$ 40.000
Investimento total			R\$ 506.000
Economia anual R\$/kWh (Tabela 5)			R\$ 66.557/ano
Payback Simples			7,60 anos
Payback Descontado (TMA 8%/a)			≈ 12 anos

Fonte: Pesquisa de mercado (2025); Dados do projeto.

$$\begin{aligned}
 \text{Payback Simples} &= \frac{506.000}{66.557} \\
 \text{Payback Simples} &\cong 7,60 \text{ anos} \\
 \text{Payback Descontado} \rightarrow PV &= \left(\frac{66.557}{(1+0,08)^t} \right)
 \end{aligned}$$

Tabela 7 - Valores Payback Descontado

Ano	PV (R\$)	Acumulado (R\$)
0	0	-506.000,00
1	61.626,85	-444.373,15
2	57.061,90	-387.311,25
3	52.835,09	-334.476,16
4	48.921,38	-285.554,78
5	45.297,58	-240.257,20
6	41.942,20	-198.315,00
7	38.835,37	-159.479,63
8	35.958,68	-123.520,95
9	33.295,07	-90.225,88
10	30.828,77	-59.397,11
11	28.545,16	-30.851,95
12	26.430,70	-4.421,25
13	24.472,87	+20.051,62

Fonte: Dados do projeto.

Como visto na Tabela 7, o payback simples de 7,60 anos é considerado favorável para o investimento, tendo em vista que a margem de vida útil do sistema é entre 15 a 20 anos, e o investimento será totalmente recuperado ao longo do 13º ano, entretanto, para encontrar precisamente o ano em que o payback descontado será pago, é feita a análise de proporção direta entre o saldo que resta pagar no final do ano 12 e o valor presente total gerado pelo sistema durante o ano 13, onde o valor deixou de ser negativo, portanto, o tempo exato para o retorno do investimento é de 12 anos e 2 meses. Vale ressaltar que a análise é conservadora, não foram considerados eventuais incentivos fiscais para investimentos em eficiência energética, como a resolução ANEEL de tarifas verdes para indústrias, reduções de passivos trabalhistas pela conformidade com NR-15, ganhos de produtividade, nem o aumento da tarifa de energia ao longo do período, fatores que, podem reduzir significativamente o payback real.

3.2.4 Avaliação de Conformidade NR-15 (IBUTG)

O Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) foi estimado para três cenários distintos, o primeiro sem climatização, o segundo com sistema convencional, e o terceiro com sistemas modernos inverter, utilizando os parâmetros definidos pela NR-15 no seu anexo 3. Os valores de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido natural e temperatura de

globo foram obtidos a partir das condições climáticas locais de Ilhéus e dos parâmetros operacionais do sistema. Os resultados então foram comparados aos limites de tolerância estabelecidos pela norma, onde para atividades moderadas em regime de trabalho contínuo, o limite máximo é de aproximadamente 26,7 °C de IBUTG. A análise permite verificar a conformidade térmica do ambiente e avaliar a necessidade de medidas de controle para garantir condições adequadas de segurança e saúde ocupacional.

Foi dimensionado o sistema para um galpão industrial, um ambiente interno e coberto onde os trabalhadores estão protegidos da radiação solar direta pelo teto da edificação, portanto, os cálculos foram obtidos utilizando a Equação (8).

Tabela 8 – Cenários simulados para a obtenção do IBUTG

Cenário	T_{bn} <i>Estimado</i>	T_g <i>Estimado</i>	IBUTG
Sem climatização	28,0 °C	34,0 °C	29,8 °C
Sistema Convencional	23,0 °C	27,0 °C	24,2 °C
Sistema Moderno	19,0 °C	24,0 °C	20,5 °C

Fonte: Dados do projeto.

O resultado da Tabela 8 evidencia que o ambiente sem climatização ultrapassa o limite, resultando em risco de estresse térmico, queda de produtividade e necessidade de pausas ou pagamento de adicional de insalubridade, enquanto que para o cenário com sistemas HVAC atendem às exigências do limite do índice. Apesar do sistema convencional estar abaixo do limite, a variação de temperatura em dias quentes pode gerar desconfortos pontuais aos ocupantes, enquanto que para o cenário com o sistema moderno, o valor encontrado apresenta uma grande margem de segurança, tornando o ambiente mais salubre e otimizado para o rendimento dos trabalhadores.

3.2.5 Aplicação de IoT no sistema

A aplicação da internet das coisas representa uma evolução significativa na forma de monitoramento e controle do ambiente industrial, assim, para o estudo de caso optou-se pela adoção de soluções comerciais referindo-se à capacidade de um dispositivo ou software funcionar imediatamente após ser conectado, sem necessidade de configuração manual, instalação complexa de drivers ou intervenção do usuário (plug & play), visando sua rápida implementação. Sua integração consiste em dispositivos inteligentes conectados para atuar de duas maneiras diferentes, a manutenção da salubridade e a validação do consumo, e o monitoramento ambiental, considerando assim a utilização de relés com sensores integrados

de temperatura e umidade, como o Sensor de Temperatura e Umidade Sonoff TH Elite com sensor Si7021, assegurando o controle do conforto térmico em conformidade com a NR-15.

Para a validação operacional e econômica, o projeto conta com a instalação de medidores de energia inteligentes de painel, como os medidores com protocolo de medidor inteligente de consumo de energia com tecnologia wifi Sonoff POW Ring, acoplados ao quadro de distribuição do Chiller. Esses equipamentos permitem processar e medir dados reais de potência ativa e consumo (kWh) em nuvem, atestando na prática a economia gerada pela tecnologia Inverter e monitorando o tempo de retorno financeiro do investimento realizado.

3.3 Comparação De Índices De Eficiência

A Tabela 3 apresenta a comparação dos índices de eficiência energética entre sistemas convencionais e modernos, a análise quantitativa mostra que o ganho proporcionado pela modernização da tecnologia é significativo, com o COP efetivo médio aumentando de 2,8 para 4,5, o que representa uma elevação percentual de aproximadamente 60,72%. Esse aumento de eficiência resulta diretamente na redução do consumo elétrico para uma mesma carga térmica, assim considerando locais onde há predominância de operação em regime de resfriamento ao longo do ano, tende a impactar mais a diminuição do consumo energético anual.

A modulação contínua do compressor inverter também elimina os elevados picos de corrente da partida de motores em sistemas comuns, que podem atingir de 5 a 7 vezes o valor da corrente nominal, reduzindo assim perdas energéticas e desgastes de componentes, resultando em um aumento da vida útil dos equipamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 9 permite analisar e comparar os resultados obtidos durante a realização do trabalho, comparando o sistema convencional e o moderno, e um resumo dos valores encontrados.

Tabela 9 – Quadro comparativo de resultados entre sistema convencional e moderno

Indicador	Sistema Convencional	Sistema Moderno	Variação
Consumo elétrico anual (MWh)	185,5	115,44	-37,77%
Custo operacional anual (R\$)	R\$ 176.225	R\$ 109.668	-R\$ 66.557
COP efetivo médio	2,80	4,50	+60,72%
IBUTG médio	24,2	20,5	-3,7 °C

Indicador	Sistema Convencional	Sistema Moderno	Variação
Conformidade NR-15 (Anexo III)	Limítrofe	Conforme	Atendida
Payback simples	–	7,60 anos	Viável
Payback descontado (TMA 8%)	–	≈ 12 anos	Aceitável
Emissões de CO ₂ evitadas (tCO ₂ /ano)	–	≈ 3,86	Sustentável

Fonte: Dados do projeto.

Do ponto de vista energético, a redução de 37,77% no consumo elétrico anual comprova a efetividade térmica da modernização para o sistema inverter, economia que se tem devido ao ganho significativo do COP efetivo médio, que em condições de carga parcial o sistema inverter é consideravelmente superior ao de sistemas convencionais, com diferença crescente conforme o clima se aproxima de regiões úmidas como o cenário em Ilhéus.

Do ponto de vista econômico, o payback simples de 7,60 anos e o descontado de aproximadamente 12 anos e 2 meses são viáveis levando em consideração a vida útil declarada de 15 a 20 anos dos equipamentos analisados no estudo. Analisando também a diferença entre os valores de IBUTG dos sistemas, fica claro que a modernização vai além do financeiro, representando a melhora na qualidade do ambiente de trabalho e produtividade dos trabalhadores.

Por fim, a redução estimada de 3,86 toneladas de CO₂ por ano, alinha o projeto às metas de descarbonização do setor industrial brasileiro, agregando valor reputacional e potencial acesso a linhas de financiamento verde.

4.1 Limitações Do Estudo

O presente trabalho baseia-se em um estudo de caso teórico com parâmetros estimados, para a validação definitiva, recomenda-se o levantamento in loco de dados reais de consumo, como a medição com analisador de energia; simulação termodinâmica via software com dados meteorológicos horários da cidade; e análise de sensibilidade da tarifa de energia e da taxa de ocupação do galpão. Essas etapas podem compor um desdobramento futuro da pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa permitiu concluir que o alto consumo de energia dos sistemas de ar-condicionado em indústrias localizadas em regiões quentes não é apenas um problema técnico, mas também um problema financeiro, pois, continuar usando equipamentos obsoletos

pelo tempo, com compressores de rotação fixa, encarece a produção devido ao desperdício de energia elétrica. Além disso, expõe as empresas a riscos relacionados à saúde dos trabalhadores, pois esses sistemas têm dificuldade em controlar o calor e a umidade de forma constante, assim, a troca por tecnologias modernas resolve a raiz desse problema provando que controlar bem o clima do ambiente é essencial para manter o negócio competitivo no longo prazo.

O trabalho contribui para a área de pesquisa relacionada à administração de empresas, pois modernizar a climatização de uma fábrica exige que os gestores tenham uma visão completa do projeto, a viabilidade econômica demonstrada nos cálculos comprova que a decisão de compra não deve focar apenas no preço inicial dos equipamentos, mas sim na economia mensal e na prevenção de processos ou multas trabalhistas, demonstrando também que investir na saúde dos funcionários, e em práticas sustentáveis é algo que também traz retorno financeiro.

Como sugestões de melhoria para o problema levantado, recomenda-se que as indústrias acompanhem de forma contínua o gasto de energia das máquinas, afinal a instalação de sensores de IoT deve deixar de ser vista como gasto extra, passando a ser utilizada como uma ferramenta de gestão fundamental. Esses aparelhos entregam em tempo real dados que ajudam a administrar e prever manutenções, e entender exatamente onde a energia está sendo gasta.

Por fim, o estudo cumpre seu propósito ao oferecer um modelo de avaliação claro e prático para o setor industrial, como recomendação para trabalhos futuros sugere-se aplicar essa base teórica realizando medições no próprio local, dentro de fábricas em funcionamento. A utilização de aparelhos reais para medir o consumo de energia e os níveis de calor no ambiente de trabalho permitirá comprovar na prática os cálculos apresentados neste artigo, incentivando o avanço contínuo da eficiência energética nas indústrias brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIYARZADEH, Aidin. **COP calculation & monitoring for HVAC application**. Schneider Electric Blog, 13 abr. 2016. Disponível em: <https://blog.se.com/industry/machine-and-process-management/2016/04/13/cop-calculation-monitoring-hvac-application/>. Acesso em: 15 maio 2026.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Addenda, 2008.

- BITENCOURT, Daniel Pires *et al.* **Trabalho a céu aberto: passado, presente e futuro sobre exposição ocupacional ao calor**. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, [S.l.], v. 48, p. 2-8, 2023.
- CAMARGOS, B. H. L. *et al.* **Medidas atenuantes à exposição ocupacional acima do limite de IBUTG em galpões industriais**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, 2024.
- CARRION, Patricia; QUARESMA, Manuela. **Internet das Coisas (IoT): Definições e aplicabilidade aos usuários finais**. Human Factors in Design, Florianópolis, v. 8, 2019.
- CDC - CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. **PPE Heat Burden**. CDC.gov, mar. 2026. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/heat-stress/recommendations/ppe.html>. Acesso em: 15 maio 2026.
- DAIKIN EUROPE N.V. **Split Residential Air to Air Solutions**. Daikin, [202-?]. Disponível em: https://catalogues.daikin.eu/flipbooks/EN/General_catalogue/04split/281/index.html. Acesso em: 15 maio 2026.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. EPE, [S.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 1 nov. 2025.
- GUIMARÃES, Joathan *et al.* **Avaliação do coeficiente de performance e eficiência de segunda lei em bancada de refrigeração utilizando compressor alternativo hermético e fluido refrigerante R-134a**. Revista de Gestão e Secretariado\$, [S.l.], p. 3, 2024.
- HVAC SYSTEMS ENCYCLOPEDIA. **HVAC Equipment Minimum Efficiency Requirements**. HVAC Systems Encyclopedia, 2026. Disponível em: https://ingener.by/codes-standards-regulations-safety/codes-standards-regulations/ashrae-standards-detailed/ashrae-90-1-energy-standard/hvac-minimum-efficiency/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 15 maio 2026.
- INNOVAR CONTROLS. **O que é HVAC e por que ele é tão importante em ambientes industriais**. Innovar Controls, 21 ago. 2025. Disponível em: <https://innovarcontrols.com/o-que-e-hvac-e-por-que-ele-e-tao-importante-em-ambientes-industriais/>. Acesso em: 31 out. 2025.
- LUSTOSA, Glenda Bezerra. **Consulta Pública Nº 16 - SEI**. Secretaria de Desenvolvimento da Indústria, Comércio e Serviços, [S.l.], 8 jul. 2022.
- MAZZOTTI, Marcelo. **Payback: o que é e como calcular?**. Salesforce Brasil Blog, 7 mar. 2024. Disponível em: <https://www.salesforce.com/br/blog/payback/>. Acesso em: 15 maio 2026.
- MDIC - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Modelo Regulatório do Inmetro**. Gov.br, jun. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/regulamentacao/modelo-regulatorio-do-inmetro>. Acesso em: 1 nov. 2025.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Eficiência Energética em Edifícios: um importante vetor de desenvolvimento**. Portal Gov.br, 27 mar. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/eficiencia-energetica-em-edificios-um-importante-vetor-de-desenvolvimento>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 15 - Atividades e Operações Insalubres. Anexo N.º 3: Limites de Tolerância para Exposição ao Calor**. Gov.br, 9 nov. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselho-s-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-15-anexo-03.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2025.

- MITSUBISHI ELECTRIC. **Mitsubishi Electric Europe**. Mitsubishi, 2023. Disponível em: <https://europe.mitsubishielectric.com/en/pr/global/2023/>. Acesso em: 15 maio 2026.
- MITSUBISHI ELECTRIC EUROPE B.V. **How does an air conditioner work?**. Mitsubishi Electric, 2023. Disponível em: <https://www.mitsubishi-les.com/en-de/knowledge/null-71.html>. Acesso em: 15 maio 2026.
- OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Workplace heat stress**. World Health Organization, ago. 2025. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/workplace-heat-stress>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- PORTAL ENGENHARIA E ARQUITETURA. **A descarbonização de edificações e o setor de ar condicionado**. Engenharia e Arquitetura, 28 out. 2022. Disponível em: <https://www.engenhariae arquitetura.com.br/2022/10/a-descarbonizacao-de-edificacoes-e-o-setor-de-ar-condicionado-2>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- PRODUTTIVO. **Sistema HVAC: o que é e como fazer manutenção**. Produttivo, 21 out. 2025. Disponível em: <https://www.produttivo.com.br/blog/sistema-hvac/>. Acesso em: 15 maio 2026.
- REPÓRTER BRASIL. **40 graus na fábrica: como fica a saúde do trabalhador na era do calor extremo**. Repórter Brasil, 18 jan. 2024. Disponível em: <https://reporterbrasil.org.br/2024/01/40-graus-fabrica-calor-extremo/>. Acesso em: 6 nov. 2025.
- RIOS, Jylia. **Payback: saiba o que é e como esse indicador funciona na prática**. C6 Bank, maio 2025. Disponível em: <https://www.c6bank.com.br/blog/payback-o-que-e>. Acesso em: 1 nov. 2025.
- ROSA, Victor Cupertino. **O Estresse Térmico Visto Como Um Risco Ocupacional**. Revista Gestão Industrial, [S.l.], p. 5, 2019.
- SHIN, Ji-Hyun; CHO, Young-Hum. **Machine-Learning-Based Coefficient of Performance Prediction Model for Heat Pump Systems**. MDPI - Publisher of Open Access Journals, [S.l.], p. 4, 2022.
- SIMPLY AIR HEATING AND COOLING. **Most Energy-Efficient Split System Air Conditioner**. Simply Air, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://simplyair.com.au/most-energy-efficient-split-system-air-conditioner>. Acesso em: 15 maio 2026.
- SUGARMAN, Samuel C. **HVAC Fundamentals**. Liburn, GA: The Fairmont Press, Inc., 2005.
- SUPREMA LUVAS. **NR que fala do Limites de Tolerância p/Exposição ao Calor**. Suprema Luvas, 26 set. 2018. Disponível em: <https://supremaluvras.com.br/nr-15-anexo-3-limites-tolerancia-calor/>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- VALUE PROJETOS. **Aquecer, ventilar e condicionar: entenda o que é HVAC e a importância do sistema para conforto térmico de ambiente**. Value Projetos, 7 jul. 2024. Disponível em: <https://valueprojetos.com.br/aquecer-ventilar-e-condicionar-entenda-o-que-e-hvac-e-a-importancia-do-sistema-para-conforto-termico-de-ambiente/>. Acesso em: 31 out. 2025.