

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE RODAS DE ENTALPIA PARA REDUÇÃO DO
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Alexandre F. Santos – projetos.ftp@gmail.com.

Faculdade Profissional – FAPRO

Cresencio Silvio Segura Salas - silvio.salas@lactec.com.br

Instituto Lactec. Curitiba – Paraná.

Daiane Busanello. – daiane.ftp@gmail.com.

Instituto Lactec. Curitiba – Paraná.

Lucio de Medeiros - lucio.medeiros@lactec.com.br

Instituto Lactec. Curitiba – Paraná.

3.2 - Aplicações de AVAC (Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento)

Resumo. Este estudo investiga a integração de rodas de entalpia nos sistemas de ar-condicionado para otimizar a eficiência energética em edifícios, com um foco especial em edificações buscando certificações como LEED, PROCEL e AQUA. Reduzindo o consumo elétrico em regiões do Brasil, utilizando dados climáticos e normas do ASHRAE para modelar um ambiente típico de Call Center em 35 cidades brasileiras. A análise abrange a variação da carga térmica ao longo das 8.760 horas do ano, considerando investimentos iniciais e custos operacionais. Os resultados demonstram períodos de retorno do investimento variando de 1 a 10 anos, dependendo das condições climáticas locais e das especificações técnicas adotadas.

Palavras-chave: Roda de Entalpia, Renovação de Ar, Qualidade do Ar, Ar Condicionado, Eficiência Energética.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de climatização está cada vez mais presente nos edifícios comerciais com o objetivo de garantir conforto térmico para os usuários, o que resulta em um aumento significativo na demanda elétrica nos países. Dados da Japanese Meteorological Agency (JMA) indicam que 2021 foi o ano mais quente registrado nos últimos sete anos (OMM, 2022).

A capacidade total de refrigeração de ar-condicionado residencial aumenta em consonância com o número de unidades instaladas ao longo do período de projeção, passando de aproximadamente 12.000 gigawatts (GW) em 2016 para quase 36.000 GW em 2050, conforme é apresentado na Figura 1. Os maiores aumentos ocorrem, previsivelmente, nas economias emergentes com climas mais quentes. A Índia registra o maior crescimento em termos absolutos, seguida pela China. Juntas, estas duas nações representam cerca de metade do aumento total da capacidade de refrigeração residencial (IEA, 2018).

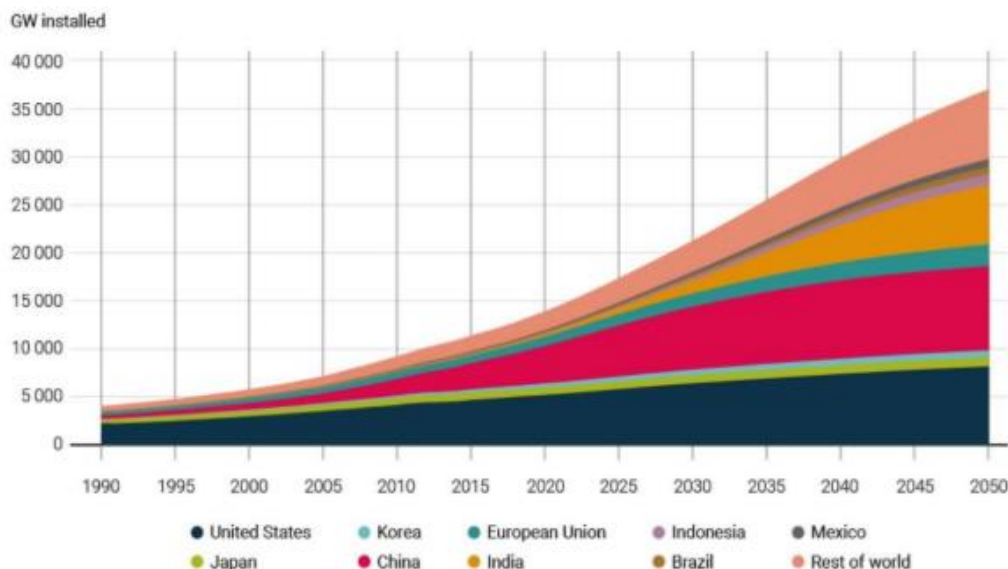


Figura 1 - Projeções de consumo de energia elétrica utilizando ar condicionado.
Fonte: IEA Future of Cooling (2018)

A energia elétrica é um recurso fundamental no cotidiano, demandando uma gestão cuidadosa para garantir sua eficiência e sustentabilidade. A economia de energia proporcionada pelo uso de um recuperador de calor. Ao integrar dados climáticos específicos de cada região com simulações computacionais detalhadas, é possível avaliar não apenas os custos de investimento e operacionais, mas também a eficiência técnica dos sistemas propostos.

Para o dimensionamento da carga térmica de um recinto, considera-se a dissipação térmica das pessoas e dos equipamentos, bem como a vazão de ar externo que deve ser insuflado no ambiente, segundo ASHRAE (2012).

Para os projetos de renovação de ar o Brasil possui normas, leis e portarias para que sejam levadas em consideração na hora do cálculo de renovação de ar, citamos:

- ASHRAE 62.1, atualizada em 2022, estabelece diretrizes para ventilação e qualidade do ar interior;
- NBR 17.037, publicada em 2023, detalha parâmetros técnicos e operacionais para sistemas de climatização, focando na eficiência energética e qualidade do ar, complementando as diretrizes da Lei 14.850/24, que define normas específicas sobre a qualidade do ar, assegurando ambientes internos com qualidade do ar interno adequada para proteger a saúde dos ocupantes.
- NBR 16401-3, visando incorporar avanços tecnológicos e práticas internacionais em qualidade do ar interior, alinhando a norma brasileira aos padrões internacionais.
- A Resolução RE Nº09 da Anvisa (2003) define critérios para a qualidade do ar interior, essencial para garantir ambientes saudáveis. Estabelece parâmetros para contaminação microbiológica e química, além de faixas recomendáveis para temperatura, umidade, velocidade do ar e taxa de renovação de ar conforme a NBR 16401-3 (2008).

A ventilação adequada é importante não apenas para a saúde, mas também para o desempenho térmico dos edifícios. A utilização de ar externo na climatização pode representar até 50% da carga térmica em locais de alta ocupação, impactando diretamente no consumo de energia do sistema de ar-condicionado (Witte et al., 1998; Kosar et al., 1998). A falta de renovação de ar adequada tem sido associada ao aumento da prevalência da SED em edifícios com sistemas de ar-condicionado, comparados a sistemas de ventilação natural (Seppanen O; Fisk WJ, 2002).

Em face dos desafios energéticos globais e das crescentes demandas por conforto térmico, iniciativas como o PROCEL e o PBE no Brasil têm sido fundamentais para promover a eficiência energética em edifícios. A disseminação de sistemas de ar-condicionado está prevista para aumentar significativamente até 2050, destacando a necessidade urgente de tecnologias mais eficientes para reduzir o impacto ambiental e o consumo de energia.

2. ESTADO DA ARTE

O uso de tecnologias como a roda entálpica, que atinge eficácias entre 50% e 80%, demonstra significativa economia de energia ao reduzir a carga de resfriamento necessária. A adoção de recuperadores de calor é incentivada por normas

como a ASHRAE Standards, promovendo a ventilação adequada e a eficiência energética. Embora o investimento inicial seja elevado, o baixo período de payback torna esses sistemas atraentes.

2.1 Recuperador de calor – Roda Dessecante

Os recuperadores de calor rotativos dessecantes são amplamente utilizados em sistemas de ar-condicionado para desumidificação. Esta tecnologia não é nova, com estudos realizados por Mei et al. (1992) e Pesarant e Mills (1987) nas décadas de 1970 e 1980. Carl Munters registrou uma patente para um sistema de secagem à base de roda dessecante, destacando a capacidade de materiais como a sílica gel de atrair moléculas de água. Esta tecnologia é utilizada para evitar o crescimento de mofo e bolor em ambientes residenciais e para remover carga de umidade em climas quentes e úmidos, onde sistemas de ar-condicionado convencionais são limitados (ASHRAE, 2019).

O rotor dessecante vertical é o tipo mais difundido, com dois fluxos de ar: um para adsorver umidade e outro para regeneração. A estrutura do rotor é em formato de colmeia, conforme apresentado na Figura 2, aumentando a área de contato do material higroscópico, que pode ser sílica gel ou uma mistura de sílica gel com zeólitos (Harriman, 2002). Existem mais de 20 variáveis que podem afetar a eficiência da roda dessecante, incluindo temperatura de bulbo seco de entrada e umidade absoluta de entrada.

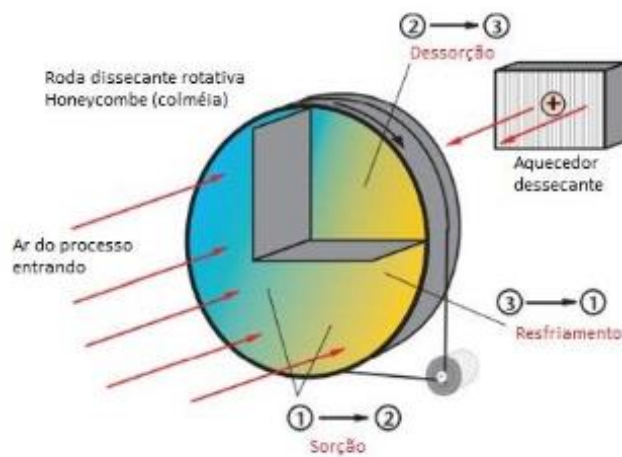


Figura 2 – Rotor Dessecante Vertical – Tipo Colmeia.
FONTE: Harrima, 2002.

Os benefícios incluem controle superior de umidade, eliminação de partículas poluentes, baixo consumo de energia e uso potencial de energia solar e residual. No entanto, há desvantagens, como quedas de pressão, bloqueio dos poros, ruído e necessidade de eletricidade para acionar o motor da roda (Shamim et al., 2021).

2.2 Recuperador de Calor – Roda de Entalpia

Ambientes fechados necessitam de renovação de ar para garantir a saúde dos usuários. Em ambientes climatizados, a entrada de ar externo pode ser problemática devido à diferença de temperatura, demandando muita energia para ajuste. A roda de entalpia reutiliza a energia do processo, reduzindo o consumo energético (McQuiston et al., 2005), realizando a troca de calor sensível e latente entre os fluxos de ar de renovação e exaustão, conforme apresentado na Figura 3, maximizando a área superficial através de uma matriz de liga metálica recoberta por material absorvente (Grimm; Rosaler, 1998).

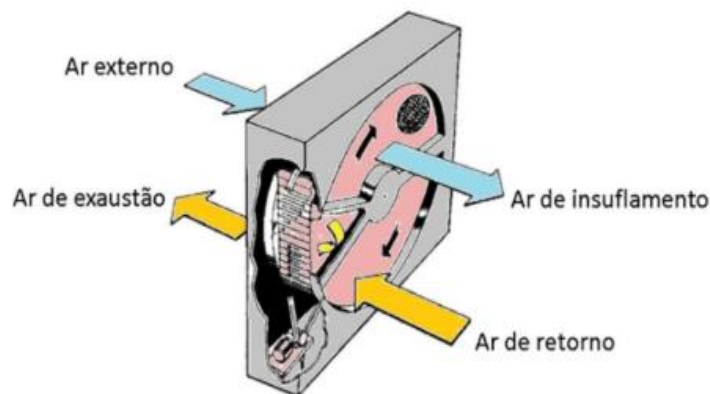


Figura 3 – Recuperadores de calor Rotativos
FONTE: ASHRAE (2020).

As rodas entálpicas têm vantagens como transferência de umidade, compactação, baixa perda de pressão do ar e disponibilidade de instalação em diversos sistemas de tratamento de ar (ASHRAE, 2020). No entanto, apresentam desvantagens como investimento inicial elevado, contaminação cruzada e vazamentos.

A utilização de recuperadores de calor por rodas entálpicas em ambientes climatizados oferece uma solução eficiente para a renovação do ar, evitando problemas de saúde sem aumentar excessivamente o consumo de energia. As rodas entálpicas, que trocam tanto calor sensível quanto latente, melhoram a eficiência energética ao pré-tratar o ar externo, reduzindo a carga de resfriamento ou aquecimento necessária. Apesar do investimento inicial ser elevado, a economia de energia resultante e a possibilidade de obter certificações ambientais, como a Green Building, tornam este sistema vantajoso. Contudo, é necessário gerenciar adequadamente o risco de contaminação cruzada e atender a normativas específicas para ambientes sensíveis, como hospitais (Vásquez et al., 2008).

2.3 Recuperador de calor – Placas Fixas

Os recuperadores de calor por placas, representado na figura 4, são sistemas estáticos de troca de calor "ar-ar" que ajustam a temperatura e removem o excesso de umidade do ar externo antes de introduzi-lo em um ambiente. No verão, o recuperador de calor reduz o calor e a umidade do ar externo antes de climatizá-lo. A principal diferença entre os trocadores sensíveis e entálpicos reside nos materiais de construção: os trocadores sensíveis utilizam materiais plásticos ou metálicos, enquanto os entálpicos empregam materiais porosos/permeáveis (Nasif, 2019).

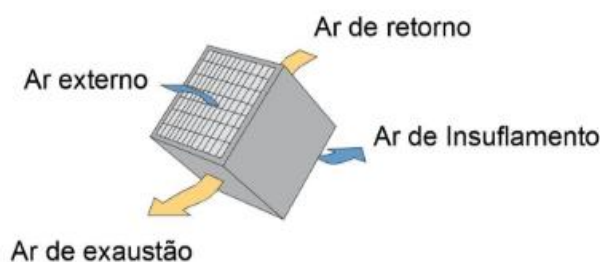


Figura 4 – Recuperador de calor com Placas Fixas
FONTE: ASHRAE (2020).

Em locais como hospitais, o uso de recuperadores de calor não é permitido, pois ocorre contaminação cruzada. Mesmo com um investimento inicial elevado, a eficiência energética e os benefícios ambientais tornam esses sistemas uma escolha valiosa para controle de umidade e qualidade do ar (LAWRANCE; SCHRECK, 2020).

3 Materiais e Métodos

A metodologia compreende a integração de dados coletados de diversas cidades brasileiras, fornecendo informações para o cálculo da carga térmica. Esses dados incluem temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa da cidade e outros parâmetros internos relevantes para a análise da carga térmica ao longo de cada hora do ano.

Conforme apresentado na Figura 5, o estudo possui a simulação de um ambiente de call center, incluindo a modelagem de um sistema de ar-condicionado com e sem roda de entalpia. A seleção das cidades considera as condições climáticas das 35 cidades do Brasil, conforme dados do ASHRAE Weather Data Viewer, a vazão de ar está conforme a NBR 16401/2008.

A análise abrange a viabilidade do projeto, considerando tanto os custos de investimento (CAPEX) quanto os custos operacionais (OPEX), além das especificações técnicas dos equipamentos envolvidos. Por fim, são conduzidas análises técnicas e econômicas para avaliar as soluções encontradas, identificando as cidades com melhor e pior desempenho para a implementação do recuperador de calor.

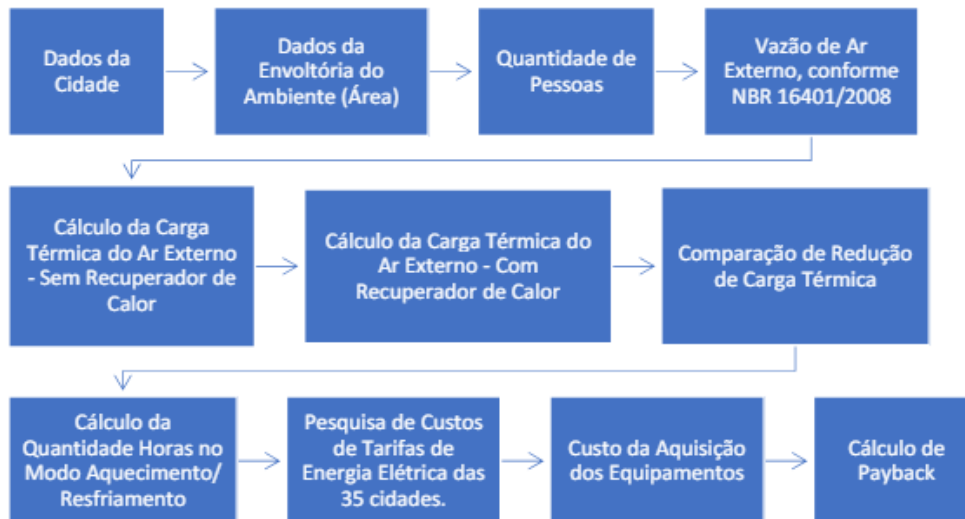


Figura 5- Etapas dos Cálculos.
Fonte: Autoria Própria, 2024

4 Análise e discussão

Ao comparar sistemas de ar-condicionado UTA simples (Sistema 01), com sistemas UTA acompanhados de recuperadores de calor (Sistema 02), conforme demonstrado na Tabela 1, observa-se variações significativas nos custos operacionais, de aquisição e nos períodos de retorno do investimento (payback).

Para ambos os sistemas, foi utilizado um Sistema de Fluxo de Refrigerante Variável (VRF). No Sistema 01, uma evaporadora 100% de ar externo e uma condensadora foram dimensionadas, enquanto no Sistema 02, foi empregada uma evaporadora 100% de ar externo, um recuperador de calor e uma condensadora

	SISTEMA 1	SISTEMA 2
Equipamentos	Ventilador de insuflamento	Ventilador de insuflamento
	Serpentina de Resfriamento	Serpentina de Resfriamento
	Resistências	Resistências
	Ventilador de Exaustão	Ventilador de Exaustão
	-	Recuperador de calor

Tabela 1 – Equipamentos utilizados em cada sistema a ser analisado
Fonte: Autoria Própria, 2024

Para realizar a comparação de operação dos sistemas, foi utilizado dados psicrométricos fornecidos pela ASHRAE Data Viewer ASHRAE (2021). No estudo de caso, está sendo considerado a presença de 550 pessoas no local de trabalho e uma área de 1000 m².

Durante o cálculo de carga térmica já é possível verificar a diferenças de cargas térmicas quando se utilizada o recuperador de calor, conforme Tabela 2 e Tabela 3.

Cidade	Média da Carga térmica do ar externo referente ao aquecimento ponderada pelo tempo (kW)	Média da Carga térmica do ar externo referente ao resfriamento ponderada pelo tempo (TR)
Brasília	40,52	9,48
Curitiba	46,96	11,76
Manaus	0,00	39,27
São Paulo	37,44	11,49

*Tabela 2 – Carga Térmica Sem Recuperador de Calor
Fonte: Autoria Própria, 2024*

Cidade	Média da Carga térmica do ar externo referente ao aquecimento ponderada pelo tempo (kw)	Média da Carga térmica do ar externo referente ao resfriamento ponderada pelo tempo (TR)
Brasília	30,95	6,07
Curitiba	30,05	7,52
Manaus	0,00	25,13
São Paulo	23,96	7,36

*Tabela 3 – Carga Térmica Sem Recuperador de Calor
Fonte: Autoria Própria, 2024*

Os dados mostram uma redução significativa na carga térmica para aquecimento e resfriamento quando os recuperadores de calor são utilizados, em todas as cidades analisadas. A eficiência dos recuperadores de calor pode ser observada na redução percentual, que varia de aproximadamente 23,64% a 36,05%, dependendo da cidade e do tipo de carga térmica (aquecimento ou resfriamento).

A cidade de Manaus com um clima predominantemente quente e úmido, Manaus apresentou uma redução notável na carga de resfriamento (36,02%).

A implementação de recuperadores de calor não só reduz a carga térmica dos sistemas de climatização, mas também promove a sustentabilidade ao diminuir o consumo energético. A menor demanda por energia para aquecimento e resfriamento resulta em menores emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a economia de energia gerada pode compensar o investimento inicial em tecnologias de recuperação de calor, resultando em um retorno do investimento atrativo.

4.1 Custo Operacional e Custo de Aquisição

Em relação aos custos operacionais, o sistema com recuperador de calor (Sistema 2) apresenta uma clara vantagem nas cidades analisadas, com custos operacionais totais consideravelmente menores em comparação com o sistema simples (Sistema 1), conforme Gráfico 1. Essa diferença é especialmente pronunciada em Manaus, onde o Sistema 2 demonstra um custo operacional total significativamente inferior, mesmo considerando o investimento mais elevado em equipamentos.

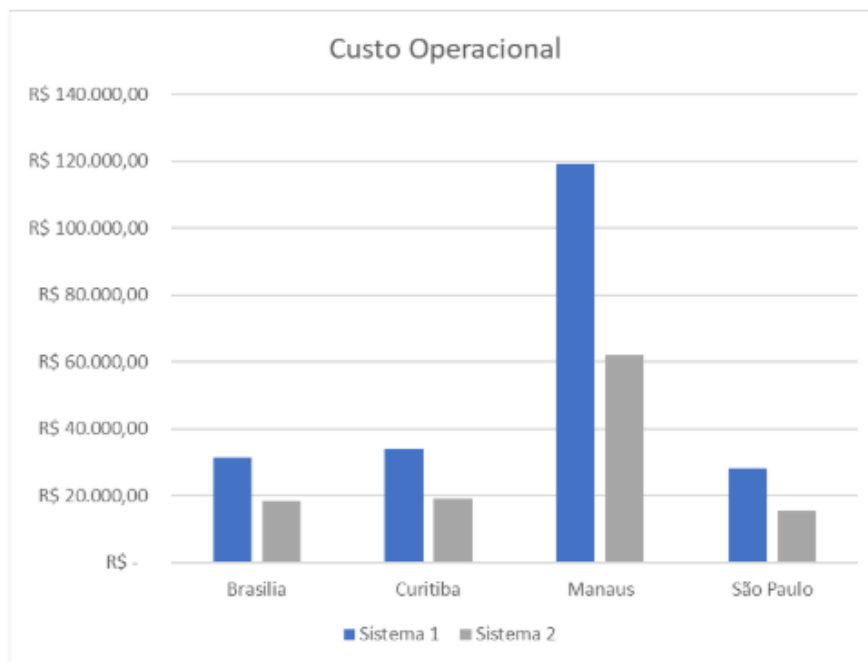


Gráfico 1 – Custo Operacional dos Sistemas
Fonte: Autoria Própria, 2024

Por outro lado, os custos de aquisição do Sistema 2, conforme Gráfico 2, são substancialmente maiores em comparação com o Sistema 1, especialmente em Manaus e São Paulo. No entanto, o investimento inicial mais alto pode ser mitigado por programas de incentivo governamentais ou subsídios destinados a projetos de eficiência energética. Governos frequentemente oferecem financiamentos a juros reduzidos, subsídios ou incentivos fiscais para empresas que investem em tecnologias sustentáveis, como recuperadores de calor. Alternativamente, a opção de leasing pode ser considerada, permitindo que as organizações utilizem o equipamento pagando uma taxa regular ao longo do tempo, em vez de um custo inicial elevado. Essas estratégias reduzem o ônus financeiro inicial e promovem a adoção mais ampla de tecnologias de eficiência energética.

Além disso, o Sistema 2 oferece um retorno do investimento mais rápido em três das quatro cidades analisadas, sugerindo que, a longo prazo, pode ser mais vantajoso em termos financeiros, proporcionando economias significativas nos custos operacionais que compensam o investimento inicial mais alto.

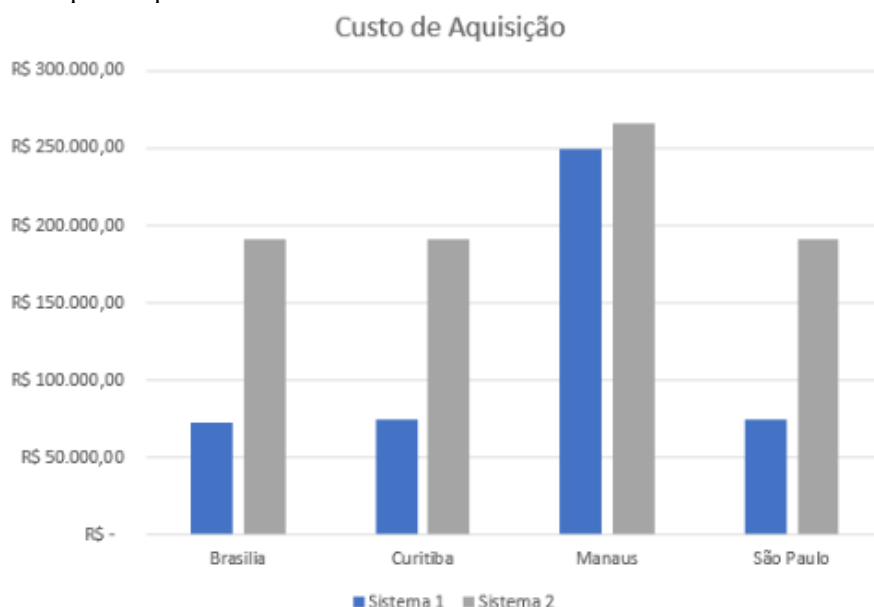


Gráfico 2 – Custo de Aquisição Sistemas
Fonte: Autoria Própria, 2024.

Portanto, ao avaliar a viabilidade de diferentes sistemas de climatização, é importante considerar não apenas os custos operacionais, mas também os custos de aquisição e os períodos de retorno do investimento. Além disso, é crucial levar em conta as características específicas de cada localidade, como as tarifas de energia elétrica, ao tomar decisões relacionadas à eficiência energética em edificações.

4.2 Economia de Energia

O uso de sistemas com recuperador de calor em comparação com sistemas convencionais revela economias significativas de energia em diversas cidades. Em Manaus, por exemplo, a implementação do sistema com recuperador de calor resulta em uma economia anual de 169.948 kWh, indicando uma redução substancial no consumo de energia em comparação com o sistema convencional.

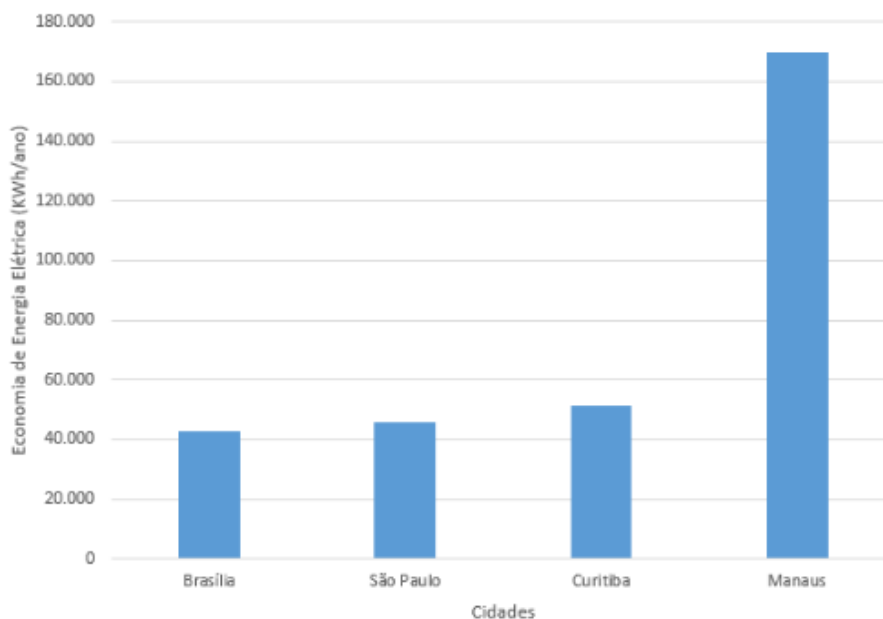


Gráfico 3 – Economia de Energia Elétrica
Fonte: Autoria Própria, 2024.

Essa análise ressalta a importância de desenvolver estratégias de eficiência energética adaptadas às condições climáticas locais para otimizar o desempenho econômico e ambiental a longo prazo. Considerar não apenas as características climáticas, mas também as demandas específicas de energia dos edifícios são essenciais para garantir a sustentabilidade das soluções adotadas.

4.3 Payback

Esses sistemas mostram um potencial impacto positivo na eficiência energética e sustentabilidade ambiental em contextos urbanos variados. Identificando quais cidades se beneficiariam mais da implementação de recuperadores de calor, considerando as características climáticas locais.

Observou-se uma correlação significativa entre as características climáticas e os paybacks dos sistemas de climatização. Em cidades como Manaus, Fortaleza e Macapá, onde o clima é quente e úmido durante todo o ano, os paybacks são geralmente baixos, próximos ou abaixo de 1 ano, conforme gráfico 4. Isso reflete a alta demanda por refrigeração nessas regiões tropicais, tornando os sistemas com recuperador de calor uma solução economicamente viável em curto prazo.

Por outro lado, em áreas com clima temperado e subtropical, como Curitiba, Porto Alegre e São Paulo, onde as variações sazonais são mais pronunciadas, os paybacks tendem a ser mais longos, variando entre 5 e 8 anos. Em cidades com climas quentes e secos, como Brasília e Campo Grande, os paybacks podem ser ainda mais longos, refletindo a menor economia de energia devido à baixa umidade relativa do ar.

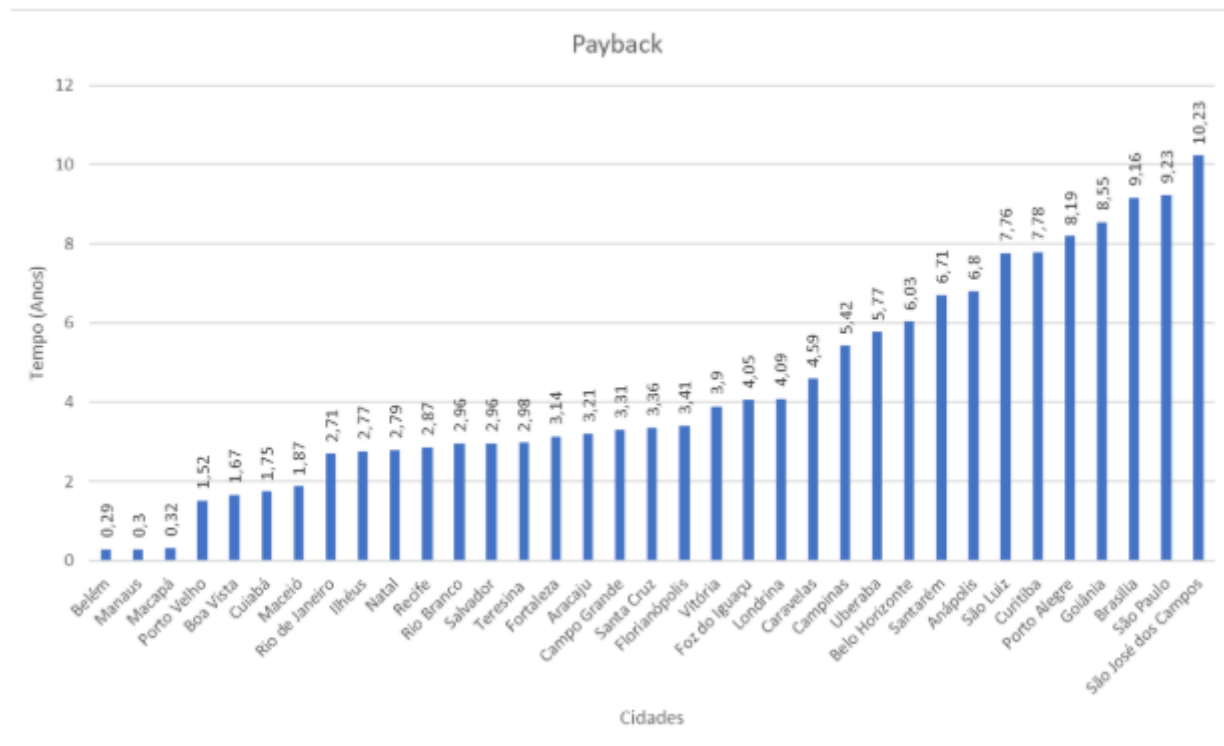


Gráfico 4 - Paybacks
Fonte: Autoria Própria, 2024.

5 Conclusão

O presente estudo destaca a importância da qualidade do ar interior (QAI) para garantir ambientes climatizados saudáveis e confortáveis, abordando aspectos essenciais como a renovação de ar, controle de temperatura, umidade e filtragem. A utilização de rodas de entalpia foi identificada como uma solução eficaz para equilibrar eficiência energética com padrões adequados de QAI, conforme definido por normas e regulamentos como a RESOLUÇÃO RE N°09 (ANVISA, 2003) e a NBR 16401/2008.

Além disso, a implementação de recuperadores de calor contribui significativamente para a redução do consumo energético e para a obtenção de certificações ambientais, como LEED, PROCEL e AQUA. A análise econômica demonstrou que, apesar do investimento inicial necessário para a instalação dessas tecnologias, os benefícios a longo prazo, incluindo a redução dos custos operacionais e o rápido retorno do investimento, tornam a tecnologia uma opção viável para muitas regiões brasileiras.

Finalmente, a disseminação de tecnologias eficientes para a climatização, como as rodas de entalpia, é essencial para promover a sustentabilidade energética e a qualidade ambiental interna dos edifícios no Brasil. Este estudo reforça a necessidade de abordagens adaptativas e personalizadas para cada região, considerando não apenas as condições climáticas, mas também as demandas específicas de energia dos edifícios e as expectativas de retorno do investimento para garantir a sustentabilidade e o desempenho econômico a longo prazo.

5.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar análises de sensibilidade para diferentes cenários de ocupação do ambiente, considerando a variação na eficiência de ventilação da zona de respiração e a aplicação de diferentes níveis de renovação de ar conforme a norma ABNT 16401-3. Além disso, é importante considerar a degradação gradual no desempenho dos equipamentos ao longo do tempo. Fatores como obstrução do filtro, acúmulo de sujeira, incrustações, vazamentos de ar nos sistemas de recuperação de energia, desequilíbrios entre as correntes de ar e corrosão devem ser considerados para uma avaliação precisa do desempenho dos equipamentos de recuperação de energia e de ar-condicionado. Essa abordagem fornecerá dados mais realistas para a análise do retorno sobre o investimento da instalação.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Instalação de sistemas residenciais de ar-condicionado – Split e compacto. NBR 16655 parte 3**, 2008.
- ABNT. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 3: Qualidade do ar interior. NBR 16401-3**, 2008.
- ABRAVA. **Climatização e Refrigeração. 2021**. São Paulo.
- ABRAVA. **Avac-r cresceu em 2021 e continuará aquecido em 2022**. 2021.
- ANVISA. **Resolução Número 09**. 2003.
- ASHRAE. **Ashrae Handbook**. 2020.
- ASHRAE. **Air-to-air energy recovery equipment**. 2019.
- GRIMM, N. R.; ROSALER, R. C. **HVAC systems and components handbook**. McGraw-Hill, 1998
- HARRIMAN, L. G. **The dehumidification handbook**. Munters Corporation, 2002.
- IEA. **The Future of Cooling Opportunities for energy- efficient air conditioning**. Paris, 2018.
- KOSAR, D. R.; WITTE, M. J.; SHIREY, D. B.; HEDRICK, R. L. **Dehumidification issues of standard 62-1989**. ASHRAE Journal, v. 40, n. 3, p. 71– 75, 1998.
- MCQUISTON, C. F.; PARKER, D. J.; SPITLER, D. J. **Heating, Ventilating, and Air Conditioning Analysis and Design**. Book, in. January, p. 100-150, 2005.
- OA SEPPÄNEN, WJ FISK, MJ MENDELL. **Association of Ventilation Rates and CO2 Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings**. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>>. Acessado em 19/04/2024.
- ONU. **2021 joins top 7 warmest years on record: WMO**. Disponível em:<<https://news.un.org/en/story/2022/01/1110022>>. Acessado: 19/04/2022
- PESARANT, A. A.; MILLS, A. F. **Moisture transport in silica gel packed beds-I. Theoretical study**. 1987.
- SHAMIM, J. A.; HSU, W. L.; PAUL, S.; YU, L.; DAIGUJI, H. **A review of solid desiccant dehumidifiers: Current status and near-term development goals in the context of net zero energy buildings**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1. mar. 2021. Elsevier Ltd.
- LAWRANCE, W.; SCHRECK, T. **Rotary heat exchangers save energy and prevent a need for recirculation which contributes to the decrease the risk of COVID-19 transfer**. *REHVA Journal*, in. October, p. 65–68, 2020.
- VÁSQUEZ, J.; LIN, B.; MOHAMMAD, M.; LI, A. **The Enthalpy Wheel**, San Jose State University, 2008.
- NASIF, M. S. **Air-to-air fixed plate energy recovery heat exchangers for building's HVAC systems**. In: S. A. Sulaiman (Org.); *Sustainable Thermal Power Resources Through Future Engineering*. 1o ed, p.63–71, 2019. Singapore: Springer Verlag

TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY ANALYSIS OF ENTHALPY WHEELS FOR REDUCING ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION IN BRAZIL

Abstract. *This study investigates the integration of enthalpy wheels in HVAC systems to optimize energy efficiency in buildings, with a specific focus on structures aiming for certifications such as LEED, PROCEL, and AQUA. The goal is to reduce electrical consumption in various regions of Brazil by utilizing climate data and ASHRAE standards to model a typical call center environment across 35 Brazilian cities. The analysis encompasses the variation in thermal load over the 8,760 hours of the year, taking into account initial investments and operational costs. The results demonstrate payback periods ranging from 1 to 10 years, depending on local climatic conditions and the technical specifications adopted.*

Keywords: *Enthalpy Wheel, Air Renewal, Air Quality, HVAC, Energy Efficiency.*