

CENTRO PAULA SOUZA
FATEC ITAQUERA PROFESSOR “MIGUEL REALE”
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM REFRIGERAÇÃO, VENTILAÇÃO E AR
CONDICIONADO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EDGARD GONÇALVES CARDOSO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E CUSTO DO CICLO DE VIDA (LCC) DE
SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO RESIDENCIAIS NO BRASIL

São Paulo/SP

2026

EDGARD GONÇALVES CARDOSO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E CUSTO DO CICLO DE VIDA (LCC) DE
SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO RESIDENCIAIS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Tecnologia de Itaquera
Professor “Miguel Reale” como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Tecnólogo em Refrigeração, Ventilação e Ar-
Condicionado.

Orientador: Prof. Msc. Paulo José Maria Filho

São Paulo/SP

2026

PÁGINA DESTINADA À INCLUSÃO DE FICHA CATALOGRÁFICA
(OPCIONAL)

FOLHA DE APROVAÇÃO

EDGARD GONÇALVES CARDOSO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E CUSTO DO CICLO DE VIDA (LCC) DE SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO RESIDENCIAIS NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Tecnologia
de Itaquera Professor “Miguel Reale”
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Tecnólogo em
Refrigeração, Ventilação e Ar-
Condicionado.

Orientador: Prof. Msc. Paulo José Maria
Filho

Aprovado em: 16/11/2026

BANCA EXAMINADORA

Msc. Paulo José Maria Filho

Assinatura: _____

Instituição: Fatec Itaquera

Data: 11/06/2026

Msc. Thiago Paula Silva de Azevedo

Assinatura: _____

Instituição: Fatec Itaquera

Data: 11/06/2026

Msc. Sandro Marcelo Martins

Assinatura: _____

Instituição: Fatec Itaquera

Data: 11/06/2026

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me acompanham desde a infância, especialmente àquelas que sempre me apoiaram, incentivaram e acreditaram em mim. De modo particular, aos meus pais Francisco e Aparecida) e irmãos (Carlos, Aline e Eduardo), pilares fundamentais de minha trajetória, bem como às poucas e preciosas pessoas que verdadeiramente se alegram com minhas conquistas e compartilham comigo os desafios e as alegrias da vida.

Dedico também este trabalho a todos os meus familiares que hoje fazem parte da Igreja Celeste e Gloriosa. Em especial, à minha querida tia Darci, que concluiu sua jornada terrena em 2025 e cuja bondade, simplicidade e inocência permanecem como exemplo para todos nós. Recordo ainda, com carinho e saudade, meu primo Daniel, minha tia Elizabete, minhas avós Maria Custódia e Maria Josefa, e meus avôs Antônio e Francisco. Embora já não estejam sujeitos às limitações do tempo e do espaço, permanecem vivos em nossas memórias, em nossas orações e no legado que deixaram. Que a Glória do Senhor, Deus Uno e Verdadeiro, os acolha e os conserve em Sua presença por toda a eternidade.

Por fim, dedico este trabalho à Igreja Católica Apostólica Romana, instituição universal que, ao longo dos séculos, contribuiu decisivamente para a preservação e o desenvolvimento da ciência, da cultura, da educação, do direito e da caridade. Seu legado espiritual, intelectual e civilizacional constitui um dos pilares da formação do Ocidente e uma contribuição inestimável para toda a humanidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, Senhor de todas as coisas, Alfa e Ômega, Princípio e Fim, fonte de toda sabedoria, força e perseverança. A Ele devo a vida, as oportunidades recebidas e a graça necessária para superar cada desafio encontrado ao longo desta jornada.

Agradeço à minha família, alicerce de minha formação humana e moral. Em especial, aos meus pais, Francisco e Aparecida, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e pelo exemplo de dedicação e honestidade. Aos meus irmãos, Carlos, Aline e Eduardo, pela amizade, apoio e companheirismo ao longo da vida. Aos meus sobrinhos, Bernardo, Murilo, Lorena, Carmel e Yasmim, cuja presença torna os dias mais alegres e renovadores.

Agradeço também aos amigos, colegas e pessoas próximas que compreenderam as dificuldades inerentes a este período de estudos e que, mesmo diante dos desafios, sempre me incentivaram, apoiaram e contribuíram para que eu pudesse seguir em frente. A participação de cada um foi importante para que esta etapa fosse concluída com êxito.

Manifesto minha sincera gratidão à Faculdade de Tecnologia de Itaquera – Professor “Miguel Reale”, instituição que me acolheu como aluno e proporcionou uma formação de excelência. Foi nesse ambiente acadêmico que desenvolvi grande interesse pela área de Refrigeração, Ventilação e Ar-Condicionado, campo que passou a integrar minha trajetória profissional e acadêmica.

Agradeço, de modo especial, a todos os professores da Fatec Itaquera, que compartilharam seus conhecimentos e experiências ao longo dessa caminhada. Seu comprometimento com o ensino foi fundamental para minha formação. Registro, ainda, minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Me. Paulo José Maria Filho, pela orientação segura, pela disponibilidade, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em meu trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta conquista e para a construção da pessoa e do profissional que hoje sou.

EPÍGRAFE

*"É justo que muito custe, o que muito
vale." (Santa Teresa d'Ávila)*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação integrada dos impactos ambientais e custos do ciclo de vida (ACV/LCC) de sistemas de climatização residencial de 12.000 BTU/h no Brasil ao longo de 10 anos. Comparou-se o sistema convencional (On-Off com R-410A) ao de alta eficiência (Inverter com R-32), utilizando o software OpenLCA 2.5 e dados do Inmetro e da ANEEL. Os resultados indicam que a tecnologia Inverter reduz o consumo elétrico em 41,8%, mitigando 1.231,69 kg CO₂-eq. Devido à matriz elétrica predominantemente renovável do Sistema Interligado Nacional (SIN), as emissões fugitivas por vazamento do refrigerante R-410A responderam por 39,7% do impacto climático do modelo convencional; a transição para o fluido R-32 foi o vetor primário para o decréscimo de 55,1% na intensidade total de carbono na rota Inverter. Sob a ótica econômica, o prêmio de preço inicial de R\$ 600,00 do aparelho Inverter é amortizado em apenas 0,66 anos. Ao final do ciclo, o usuário obtém um Valor Presente Líquido (VPL) positivo de R\$ 6.808,96. Conclui-se que o sistema Inverter é superior em ambas as dimensões, fornecendo subsídios para estratégias de descarbonização residencial no Brasil.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Custo do Ciclo de Vida (LCC). Climatização Residencial. Tecnologia *Inverter*. Fluidos Refrigerantes.

ABSTRACT

This study presents an integrated environmental and life cycle cost assessment (LCA/LCC) of 12,000 BTU/h residential air conditioning systems in Brazil over a 10-year operational horizon. A conventional fixed-speed system (On-Off using R-410A) was compared against a high-efficiency system (Inverter using R-32), modeled via OpenLCA 2.5 software utilizing technical parameters from Inmetro and ANEEL. The results indicate that Inverter technology reduces electricity consumption by 41.8%, mitigating 1,231.69 kg CO₂-eq. Due to the predominantly renewable grid mix of the Brazilian National Interconnected System (SIN), fugitive emissions from R-410A refrigerant leakage accounted for 39.7% of the conventional model's total climate impact; the transition to R-32 was the primary driver for the 55.1% decrease in total carbon intensity within the Inverter alternative. From an economic perspective, the BRL 600.00 initial capital premium of the Inverter unit is fully amortized within 0.66 years. By the end of the lifecycle, the user achieves a positive Net Present Value (NPV) of BRL 6,808.96. In conclusion, the Inverter system proves superior in both dimensions, providing quantitative support for residential decarbonization strategies in Brazil.

Keywords: *Life Cycle Assessment (LCA). Life Cycle Costing (LCC). Residential Air Conditioning. Inverter Technology. Refrigerant Fluids.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da Metodologia.....	6
Figura 2 - Fronteiras do Sistema (Cradle-to-Grave Adaptado).....	10
Figura 3 - Procedimento para Coleta e Filtração de Dados (Inventário)	12
Figura 4 - Portal de Dados Abertos em Compras Públicas	13
Figura 5 – Determinação do Custo de Capital Inicial (CAPEX)	14
Figura 6 - Software OpenLCA (versão 2.5)	17
Figura 7 - Arquitetura Metodológica para Construção do Modelo de ACV no OpenLCA.....	20
Figura 8 - Ciclo de refrigeração básico.....	28
Figura 9 - Ar Condicionado Split Hw On/off Eco Garden Gree 9000 Btus Frio 220V Monofasico	29
Figura 10 - Ar Condicionado 12000 BTUs Inverter Connect Frio Midea Outlet	30
Figura 11 - Sistemas Solares Fotovoltaicos Assistidos	31
Figura 12 - Sistemas Solares Térmicos (Climatização por Absorção)	32
Figura 13 - nova modalidade de medição de eficiência energética do Inmetro	33
Figura 14 - Balanço total de emissões de GEE via OpenLCA (Cenário Base)	40
Figura 15 - OPEX Descontado Convencional x OPEX Descontado Inverter	43
Figura 16 - Comparativo de emissões totais de GEE por cenário (kgCO ₂ -eq)	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração das abas Inputs/Outputs dos processos no OpenLCA.....	18
Tabela 2 - Matriz de parametrização para análise de sensibilidade e cenários.	26
Tabela 3 - Balanço total de emissões de GEE via OpenLCA (Cenário Base).....	40
Tabela 4 - Cronograma de fluxos de caixa atualizados a valor presente (LCC).....	42
Tabela 5 - Comparativo de emissões totais de GEE por cenário (kgCO ₂ -eq)	45
Tabela 6 - Divisão percentual de responsabilidade sobre a pegada de carbono total	46

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iv
BANCA EXAMINADORA.....	v
DEDICATÓRIA.....	vi
AGRADECIMENTOS	vii
EPÍGRAFE	viii
RESUMO.....	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE tabelas.....	iv
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Problema de Pesquisa	3
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Justificativa.....	4
1.4 Estrutura do Trabalho	5
2 METODOLOGIA	6
2.1 Classificação e Delineamento da Pesquisa.....	6
2.1.1 Natureza e Abordagem da Pesquisa	6
2.1.2 Enquadramento Normativo da ACV (ABNT NBR ISO 14040 e ISO 14044) 7	
2.1.3 Enquadramento Normativo do LCC (ISO 15686-5)	8
2.2 Definição do Escopo e Fronteiras do Sistema.....	8
2.2.1 Unidade Funcional (UF).....	9
2.2.2 Fronteiras do Sistema (Cradle-to-Grave Adaptado).....	9
2.3 Procedimento para Coleta e Filtração de Dados (Inventário).....	11
2.3.1 Dados de Consumo e Fluido Refrigerante (Inmetro/PBE)	11
2.3.2 Dados de Preço de Aquisição - CAPEX (Painel de Preços)	13
2.3.3 Parâmetros Macroeconômicos e Energéticos Nacionais (ANEEL e MCTI) 14	
2.4 Modelagem Matemática do Consumo Energético Sazonal	15
2.5 Arquitetura e Engenharia de Modelagem no OpenLCA.....	16
2.5.1 Configuração do Ambiente e Inicialização do Banco de Dados.....	17

2.5.2	Criação e Mapeamento de Fluxos (Flows)	17
2.5.3	Construção de Processos Unitários (Processes).....	18
2.5.4	Vinculação de Parâmetros Globais e Locais	19
2.5.4.1	Geração do Sistema de Produto (<i>Product System</i>)	19
2.6	Avaliação do Impacto Ambiental da ACV (Cálculo e Extração)	20
2.6.1	Configuração do Método de Impacto	20
2.6.2	Execução do Cálculo e Análise de Contribuição.....	21
2.7	Modelagem Matemática do Custo do Ciclo de Vida (LCC).....	22
2.7.1	Desmembramento do OPEX Operacional	23
2.8	Análise de Sensibilidade e Incerteza	24
3	REVISÃO DA LITERATURA	27
3.1	Sistemas de Climatização Residencial.....	27
3.1.1	Conceitos Fundamentais de HVAC	27
3.1.2	Sistemas Split Convencionais.....	29
3.1.3	Sistemas Inverter	30
3.1.4	Sistemas Híbridos e Solares.....	31
3.2	Eficiência Energética em Sistemas HVAC	33
3.2.1	COP, EER e SEER	33
3.2.2	Consumo Energético Residencial	35
3.2.3	Programas de Eficiência Energética e Normalização	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Resultados da Modelagem Energética Sazonal (Fase de Uso).....	38
4.2	Resultados da Avaliação de Impacto Ambiental no OpenLCA (AICV)	39
4.2.1	Emissões Indiretas e Diretas (Cenário Base)	39
4.2.2	Resultados para a Categoria de Depleção da Camada de Ozônio (ODP) 41	
4.3	Resultados da Modelagem Econômica (LCC)	41
4.4	Resultados da Análise de Sensibilidade e Incerteza.....	43
4.4.1	Cenário Crítico: Crise Hídrica e Estresse de Rede	43
4.4.2	Cenário Otimista: Expansão de Renováveis.....	44
4.4.3	Consolidação de Cenários e Balanço de Contribuição	45
4.5	Discussão dos Resultados face ao Estado da Arte	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
5.1	Limitações da Pesquisa	48

5.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	48
6	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico, o processo de urbanização acelerado e a consequente expansão da infraestrutura urbana nas últimas décadas têm impulsionado uma elevação sem precedentes na procura por energia elétrica global. No cenário brasileiro, o setor residencial consolidou-se como um dos principais vetores desse crescimento expressivo, impulsionado tanto pela ascensão socioeconômica de estratos populacionais quanto pelas alterações nos padrões de conforto térmico demandados pela sociedade. Em regiões de clima predominantemente quente e tropical, que caracterizam a maior parte do território nacional, os sistemas de climatização por expansão direta, popularmente representados pelos aparelhos de ar-condicionado, deixaram de ser classificados como bens supérfluos e passaram a figurar como equipamentos essenciais à habitabilidade e à produtividade urbana.

Esta dinâmica de consumo assemelha-se, em termos de magnitude de vetor de carga, ao fenômeno observado em nações de clima árido ou desértico, como a Arábia Saudita, onde a refrigeração de espaços internos consome a maior parcela da eletricidade gerada no país. Contudo, enquanto o modelo saudita apoia-se historicamente numa matriz elétrica fortemente dependente da queima direta de combustíveis fósseis (petróleo bruto e gás natural), o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, alicerçada na fonte hidroelétrica, mas com crescente inserção de fontes eólica, solar e térmicas de despacho complementar. Apesar do perfil de menor intensidade de carbono da matriz brasileira, o acionamento de usinas termelétricas durante os períodos de estiagem e picos de demanda estival eleva o fator de emissão médio do Sistema Interligado Nacional (SIN), resultando em externalidades ambientais e financeiras significativas.

Nesse contexto, a avaliação isolada do consumo de energia na tomada é insuficiente para determinar o real perfil de sustentabilidade de um equipamento, sendo necessário o emprego da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) associada à Análise Econômica de Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Costing). Estas abordagens integradas constituem ferramentas analíticas fundamentais para mapear e quantificar os fluxos energéticos, materiais e monetários ocultos desde os processos de fabrico e aquisição do equipamento, passando pelas perdas por eficiência e

emissões fugitivas de fluidos refrigerantes na fase de uso, até aos processos de destinação final e descarte.

O presente trabalho propõe-se a adaptar a metodologia desenvolvida por Almutairi et al. (2015) para o contexto energético, regulatório e climático brasileiro. A relevância desta transposição reside na necessidade de compreender como as especificidades da matriz elétrica nacional, os padrões de uso do consumidor local e as tarifas das concessionárias influenciam o ponto de equilíbrio ecológico e financeiro das tecnologias de climatização, fornecendo subsídios empíricos para o aprimoramento de políticas públicas de eficiência energética, normas de etiquetagem e estratégias de sustentabilidade no país.

1.1 Problema de Pesquisa

Considerando o cenário de expansão contínua da demanda de climatização residencial e a necessidade de alinhar o desenvolvimento urbano às metas nacionais de descarbonização, formula-se o seguinte problema de pesquisa: Quais são os principais impactos ambientais e econômicos associados ao ciclo de vida de sistemas de ar-condicionado residenciais no Brasil, e como a adoção de tecnologias mais eficientes pode reduzir o consumo de energia e os custos de operação, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos ambientais e econômicos do ciclo de vida de sistemas de ar-condicionado residenciais no Brasil, considerando diferentes níveis de eficiência energética tecnológica sob uma abordagem integrada "do berço ao túmulo" (cradle-to-grave).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar na literatura e em bases de dados o inventário de ciclo de vida (ICV) material de aparelhos de ar-condicionado residenciais convencionais e Inverter;

- Calcular o consumo energético sazonal dos equipamentos operando em regiões brasileiras, considerando tarifas elétricas locais e a envoltória residencial média;
- Estimar os impactos ambientais (foco em pegada de carbono e depleção de ozônio) da fase operacional utilizando o fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) e computando as emissões fugitivas dos fluidos refrigerantes;
- Realizar a análise de custo do ciclo de vida (LCC), integrando o valor de aquisição (CAPEX) e os custos acumulados de energia (OPEX) ao longo da vida útil projetada; e
- Determinar o período de retorno financeiro (payback) e o balanço ambiental líquido da substituição da tecnologia convencional pela tecnologia Inverter.

1.3 Justificativa

A taxa de penetração de sistemas de refrigeração artificial nas habitações brasileiras tem demonstrado uma trajetória de crescimento acelerada a partir de 2010. Este comportamento é o resultado direto da conjugação de fatores socioeconômicos (como o aumento do poder de compra das classes médias) com fatores climáticos globais e locais, evidenciados pela maior frequência de ondas de calor extremo e pela elevação contínua das temperaturas médias anuais nas grandes metrópoles brasileiras.

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional emitido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), o consumo energético associado às edificações representa aproximadamente 45% de toda a eletricidade consumida no país. No ambiente doméstico, o ar-condicionado desponta como um dos maiores determinantes do perfil de carga residencial durante os meses de verão, sendo o principal responsável por sobrecargas localizadas nas redes de distribuição urbana.

Inspirando-se na metodologia aplicada por Almutairi et al. (2015), que evidenciaram que a fase de uso é a principal responsável pelos impactos ambientais na Arábia Saudita, este estudo busca adaptar essa abordagem ao cenário brasileiro. Tal vertente de análise tem potencial para embasar políticas públicas de eficiência

energética, orientar programas de etiquetagem (Procel/Inmetro) e estimular a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes. Transcendendo os resultados potenciais da pesquisa, a transposição dessa lógica metodológica permite avaliar se a matriz elétrica predominantemente renovável do Brasil altera de forma significativa as conclusões obtidas em países dependentes de combustíveis fósseis, gerando dados cruciais para o planejamento de energia e habitabilidade nacional.

1.4 Estrutura do Trabalho

Para cumprir os objetivos propostos, este relatório de pesquisa está estruturado em cinco capítulos principais, descritos a seguir:

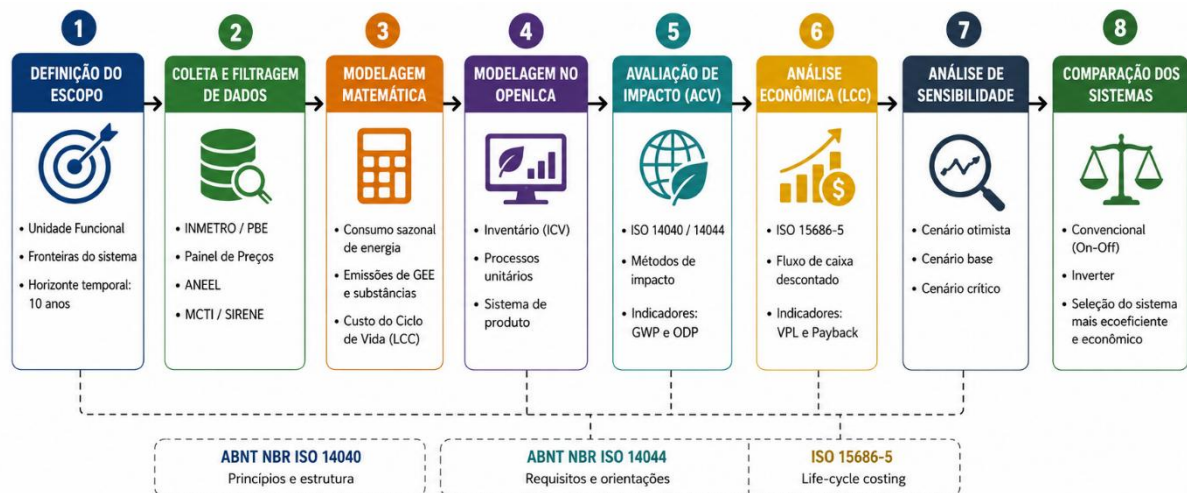
- Capítulo 1 – Introdução: apresenta a contextualização do tema, a delimitação do problema de pesquisa, os objetivos pretendidos, as justificativas que fundamentam a relevância do estudo e a presente organização estrutural.
- Capítulo 2 – Metodologia: detalha os procedimentos técnicos adotados para a execução da pesquisa, definindo os limites do sistema, a unidade funcional de referência, as fontes de dados para o inventário, as categorias de impacto selecionadas e as premissas matemáticas para a análise econômica.
- Capítulo 3 – Fundamentação Teórica / Revisão da Literatura: dedica-se ao levantamento do estado da arte da pesquisa, subdividindo-se em seções que abordam os Sistemas de Climatização Residencial, Eficiência Energética, Sustentabilidade (ACV) e Análise de Custos (LCC).
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão: apresenta os dados quantitativos gerados pelas simulações e cálculos de ciclo de vida, promovendo a análise comparativa entre as tecnologias avaliadas e o tempo de retorno financeiro.
- Capítulo 5 – Considerações Finais: sintetiza as principais conclusões do estudo, aponta as limitações identificadas no curso da pesquisa e propõe recomendações para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

2.1 Classificação e Delineamento da Pesquisa

Este estudo adota uma abordagem estruturada para avaliar de forma concomitante os impactos ambientais e os custos financeiros associados a sistemas de climatização residencial no Brasil. O delineamento da pesquisa foi concebido para garantir a replicabilidade dos resultados, a transparência na manipulação dos dados secundários e o rigor analítico exigido pelas normativas internacionais que regem a sustentabilidade e a engenharia econômica. O fluxograma da metodologia, sintetizando cada etapa, está explícito na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

2.1.1 Natureza e Abordagem da Pesquisa

Quanto à sua natureza, esta pesquisa classifica-se como aplicada, pelo fato de o estudo visar o desenvolvimento de teorias e a geração de conhecimentos práticos e quantitativos direcionados para a solução de problemas reais e contemporâneos, neste caso e, especialmente, a melhoria do consumo energético residencial e a mitigação de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no cenário urbano nacional.

No que concerne à abordagem do problema, o estudo é estritamente quantitativo, afinal, toda a análise baseia-se na obtenção, estruturação, modelagem

e processamento estatístico-matemático de variáveis numéricas discretas e contínuas (tais como potências elétricas, fluxos de massa de fluidos refrigerantes, tarifas monetárias e fatores de emissão de carbono). A opção pela análise quantitativa se dá pelo fato de que ela elimina, ou minimiza, a subjetividade interpretativa, permitindo que as conclusões sobre a ecoeficiência dos sistemas avaliados sejam sustentadas por indicadores matemáticos explícitos, tais como o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential – GWP) e o Valor Presente Líquido (Net Present Value – NPV).

Em relação aos objetivos, a pesquisa caracteriza-se como descritiva e comparativa. É descritiva porque detalha minuciosamente as características técnicas e operacionais dos sistemas de ar condicionado disponíveis no mercado brasileiro. É comparativa pois estabelece um confronto direto e parametrizado entre duas rotas tecnológicas distintas, a tecnologia convencional de velocidade fixa (On-Off) e a tecnologia de velocidade variável (Inverter), identificando qual delas apresenta o melhor desempenho sob a perspectiva do ciclo de vida.

2.1.2 Enquadramento Normativo da ACV (ABNT NBR ISO 14040 e ISO 14044)

A componente de avaliação ambiental deste trabalho é integralmente balizada pelas normas técnicas que regulamentam a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O modelo computacional construído no software OpenLCA segue rigorosamente a estrutura metodológica quadripartite determinada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela International Organization for Standardization (ISO) através das seguintes normas:

- ABNT NBR ISO 14040:2009 (Princípios e estrutura): utilizada para delinear o enquadramento geral do estudo. Esta norma orienta a fixação dos compromissos de transparência, a definição da Unidade Funcional como base de cálculo e o estabelecimento das fronteiras do sistema, garantindo que a análise abranja as interações materiais relevantes "do berço ao túmulo" (cradle-to-grave).
- ABNT NBR ISO 14044:2009 (Requisitos e orientações): aplicada de forma estrita na fase operacional da pesquisa. Esta norma dita as regras para a construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), os procedimentos de exclusão ou inclusão de

fluxos (critérios de corte), a escolha dos métodos de avaliação de impacto ambiental (AICV) e a condução das análises de sensibilidade que validam a robustez do modelo face a incertezas nos dados de entrada.

2.1.3 Enquadramento Normativo do LCC (ISO 15686-5)

Para assegurar que a dimensão econômica da pesquisa possua a mesma robustez e horizonte temporal que a análise ambiental, o planeamento financeiro é governado pela norma ISO 15686-5:2017 (Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing).

A adoção da ISO 15686-5 permite estruturar o Custo do Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Costing) através de uma abordagem de Custo Total de Propriedade (Total Cost of Ownership - TCO). Esta norma estabelece os critérios técnicos para:

- Identificar e segregar de forma clara os custos iniciais de capital (CapEx) dos custos operacionais cronológicos de energia e manutenção (OpEx).
- Aplicar taxas de desconto financeiro reais para converter fluxos de caixa futuros em valores presentes equivalentes, permitindo uma comparação economicamente justa entre um equipamento com baixo custo de aquisição e alto consumo energético (Convencional) versus um equipamento com alto custo de aquisição e baixo consumo (Inverter).

Ao fundir estas três diretrizes normativas (ISO 14040, ISO 14044 e ISO 15686-5), o delineamento desta pesquisa consolida-se como uma avaliação integrada de sustentabilidade baseada no conceito de ecoeficiência. O método garante que qualquer alteração nos parâmetros operacionais de um equipamento resulte num impacto mensurável tanto na sua pegada de carbono quanto no seu custo total de propriedade.

2.2 Definição do Escopo e Fronteiras do Sistema

Esta seção estabelece os limites matemáticos, técnicos e temporais que delimitam o objeto de estudo, garantindo que os fluxos de massa, energia e capital sejam contabilizados de forma justa, transparente e passível de comparação direta.

2.2.1 Unidade Funcional (UF)

Em conformidade com as diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040 e ISO 14044, a Unidade Funcional (UF) é a referência quantificada utilizada para normalizar as entradas e saídas do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). A definição da UF deve refletir não apenas a capacidade nominal do equipamento, mas a entrega real do serviço de climatização ao longo do tempo.

Para este estudo, a Unidade Funcional foi rigorosamente estabelecida como: fornecer o resfriamento térmico de um ambiente residencial com área de 15 m² através de um equipamento de climatização com capacidade térmica nominal de 12.000 BTU/h (equivalente a 3,517 kW), operando em regime de uso contínuo de 8 horas por dia, durante 365 dias por ano, ao longo de um ciclo de vida útil projetado de 10 anos no contexto habitacional brasileiro.

Essa parametrização é fundamental por três razões técnicas:

- **Área de Atuação:** a capacidade de 12.000 BTU/h é a mais representativa no mercado residencial brasileiro para dormitórios de casal e salas de estar de médio porte.
- **Regime de Operação:** o período de 8 horas diárias mimetiza o padrão de uso noturno (período de sono), que concentra o maior volume de consumo em edificações multifamiliares e unifamiliares no país.
- **Horizonte Temporal:** os 10 anos de vida útil projetada representam o ponto de obsolescência técnica e depreciação financeira padrão adotado na literatura internacional para compressores herméticos de expansão direta.

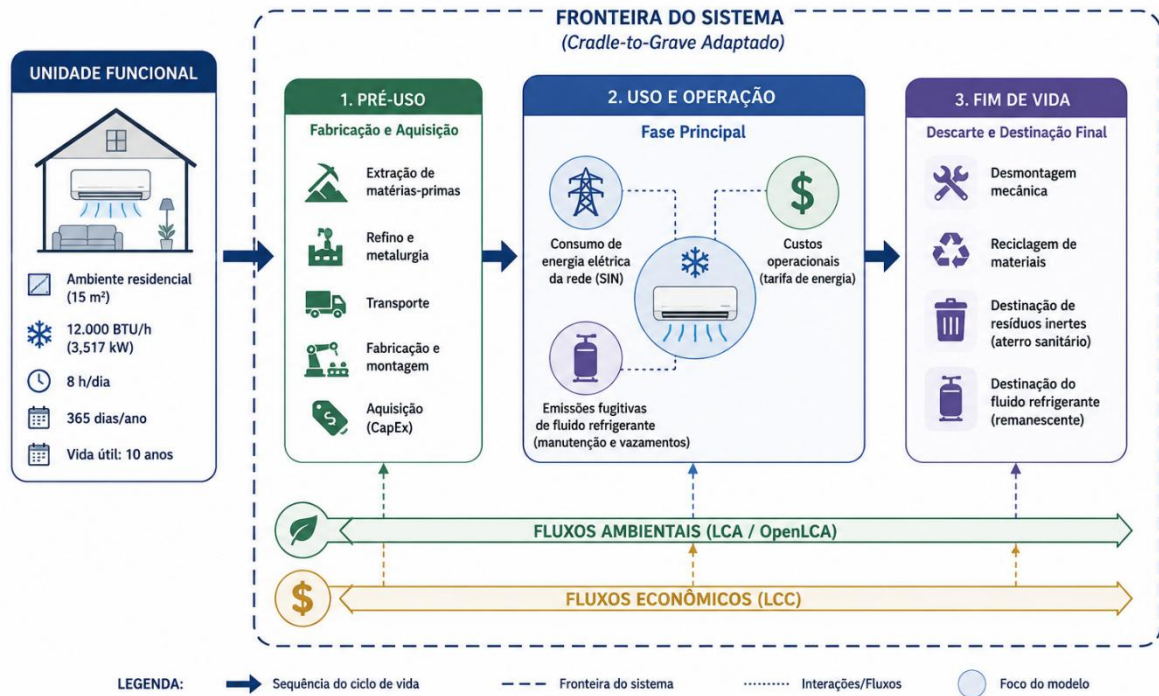
Todas as equações de impacto ambiental e os fluxos de caixa de custos operacionais gerados nesta pesquisa têm os seus resultados expressos e indexados em relação a esta Unidade Funcional.

2.2.2 Fronteiras do Sistema (Cradle-to-Grave Adaptado)

A fronteira do sistema determina quais os processos unitários e estágios do ciclo de vida que são incluídos no modelo computacional do OpenLCA e na planilha

de custos do LCC. Adotou-se uma abordagem do tipo "do berço ao túmulo" (cradle-to-grave) adaptada, esquematizada no diagrama de fluxos da Figura 2.

Figura 2 - Fronteiras do Sistema (Cradle-to-Grave Adaptado)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A fronteira do sistema foi segmentada em três estágios operacionais distintos: Fase de Pré-uso (Fabricação e Aquisição), Fase de Uso e Operação (O Coração do Modelo) e Fase de Fim de Vida (Descarte e Destinação Final).

A Fase de Pré-uso (fabricação e aquisição) compreende todos os processos de montagem a montante (upstream). Embora a manufatura primária desses equipamentos ocorra predominantemente no Polo Industrial de Manaus (PIM), os impactos ambientais associados à extração metalúrgica, refino de matérias-primas (como o cobre das serpentinas, o alumínio das aletas e o aço estrutural do gabinete) e a injeção plástica dos componentes da evaporadora são mapeados através dos dados globais regionalizados da base Ecoinvent v3.9. O limite de custo nesta etapa é o preço de aquisição inicial do mercado público nacional (CapEx).

A Fase de Uso e Operação (o coração do modelo) constitui o núcleo analítico do trabalho, onde ocorrem as principais interações de fluxo de fundo (background) e de frente (foreground). A fronteira engloba:

- O consumo de energia elétrica da rede de baixa tensão, alimentada diretamente pelo mix de geração do Sistema Interligado Nacional (SIN);
- O impacto econômico das tarifas residenciais reguladas pelas concessionárias locais;
- As emissões diretas fugitivas decorrentes da perda de fluido refrigerante por vibração das tubulações ou durante as rotinas de manutenção técnica ao longo dos 10 anos de operação.

A Fase de Fim de Vida (Descarte e Destinação Final) delimita o destino final do equipamento após o encerramento do seu período de operação útil. O modelo considera o desmonte mecânico das unidades, a destinação de resíduos sólidos inertes para aterros sanitários regulados no Brasil e os cenários de descarte e potencial vazamento do fluido refrigerante remanescente no circuito caso o recolhimento não seja efetuado de forma adequada.

2.3 Procedimento para Coleta e Filtração de Dados (Inventário)

A confiabilidade de um estudo de ACV e LCC depende diretamente da qualidade, procedência e rastreabilidade dos dados que alimentam o Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Para garantir o rigor e a reprodutibilidade desta pesquisa, todos os dados foram coletados de plataformas e relatórios públicos de órgãos homologados do Governo Federal brasileiro. O levantamento e tratamento das informações brutas seguiram um protocolo de filtragem e seleção padronizado, estruturado em três eixos principais.

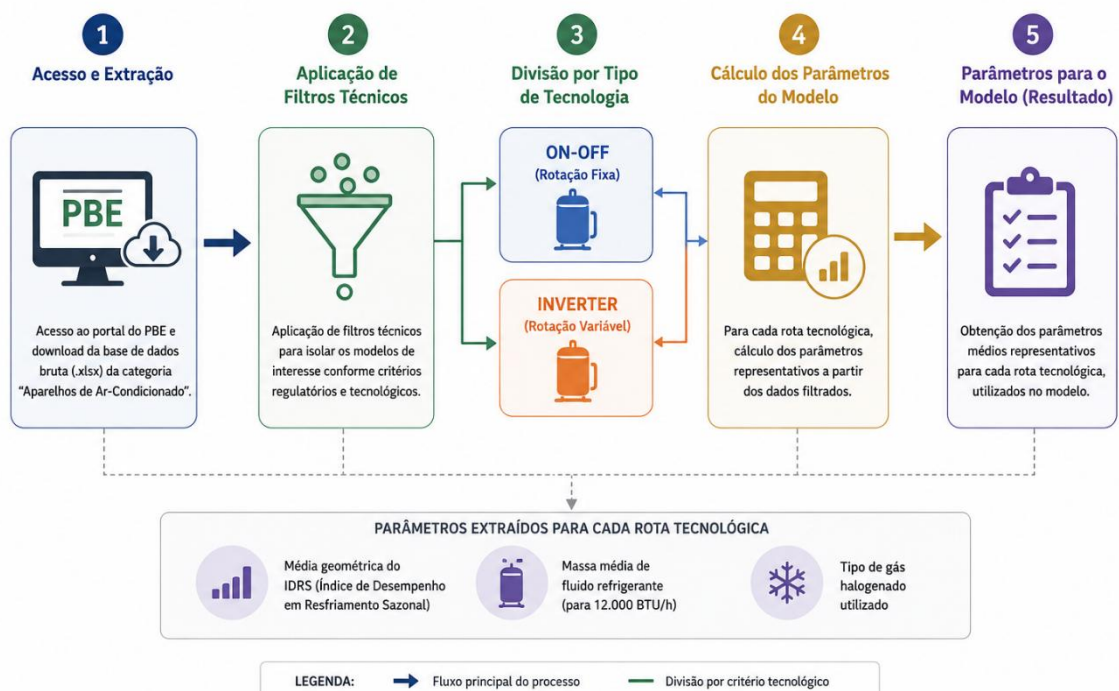
2.3.1 Dados de Consumo e Fluido Refrigerante (Inmetro/PBE)

Os parâmetros técnicos de desempenho energético e as características dos fluidos refrigerantes foram extraídos diretamente das planilhas eletrônicas públicas do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), mantido e atualizado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro).

O procedimento operacional para a extração e filtragem desses dados seguiu as seguintes etapas e está expresso na Figura 3:

- **Acesso e Extração:** Acesso ao portal do PBE e download da base de dados bruta em formato de planilha eletrônica (.xlsx) correspondente à categoria de "Aparelhos de Ar-Condicionado".
- **Aplicação de Filtros Técnicos:**
 1. Filtro 1 (Capacidade Térmica): isolou-se exclusivamente a coluna de capacidade nominal de refrigeração, selecionando apenas os modelos de 12.000 BTU/h (ou a faixa de tolerância regulatória entre 3.500 W e 3.550 W).
 2. Filtro 2 (Tipo de Tecnologia): os dados foram divididos em dois subconjuntos. O primeiro isolou os modelos com compressor de rotação fixa (tecnologia convencional On-Off). O segundo isolou os modelos com compressor de rotação variável (tecnologia Inverter).
- **Cálculo dos Parâmetros do Modelo:** a partir das linhas filtradas, extraiu-se a média geométrica do Índice de Desempenho em Resfriamento Sazonal (IDRS), a massa média de fluido refrigerante indicada pelos fabricantes para essa capacidade e o tipo de gás halogenado utilizado em cada rota tecnológica.

Figura 3 - Procedimento para Coleta e Filtração de Dados (Inventário)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

2.3.2 Dados de Preço de Aquisição - CAPEX (Painel de Preços)

O Custo de Capital Inicial (CAPEX) foi determinado com base em transações comerciais reais praticadas no mercado nacional, utilizando o Painel de Preços do Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos (MGI), hospedado na plataforma Compras.gov.br, conforme Figura 4.

Figura 4 - Portal de Dados Abertos em Compras Públicas



Fonte: Compras.gov.br (2026). Disponível em <<https://www.gov.br/compras/pt-br>>

O protocolo de consulta e mineração de dados foi configurado da seguinte forma:

- Identificação por Código CATMAT: utilizou-se o Catálogo de Materiais (CATMAT) do Governo Federal para localizar o item sob o termo padrão "Condicionador de Ar".
- Refinamento da Busca: aplicaram-se filtros booleanos no campo de descrição detalhada do item para incluir as palavras-chave 12000 BTU AND SPLIT, excluindo termos como cassete, piso-teto ou janela.
- Tratamento Estatístico: Foram extraídos os valores unitários homologados de aquisições públicas realizadas nos últimos 12 meses. Para evitar a distorção por outliers (compras em lotes massivos com superdescontos ou aquisições isoladas com sobrepreço devido ao frete para regiões remotas), aplicou-se o método do

Intervalo Interquartil (IQR), eliminando os dados fora do intervalo ($Q_1 - 1,5 \times \text{IQR}$) e ($Q_3 + 1,5 \times \text{IQR}$). A média aritmética dos dados saneados remanescentes foi adotada como o preço oficial de mercado para cada tecnologia.

Figura 5 – Determinação do Custo de Capital Inicial (CAPEX)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

2.3.3 Parâmetros Macroeconômicos e Energéticos Nacionais (ANEEL e MCTI)

Os fluxos de fundo que conectam o ciclo de vida à infraestrutura brasileira foram parametrizados por meio de duas agências reguladoras: ANEEL e MCTI/SIRENE.

Para Tarifas de Energia Elétrica (ANEEL): a tarifa de energia elétrica residencial, utilizada no cálculo do custo operacional (OPEX), foi obtida por meio do Ranking de Tarifas Residenciais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O dado foi extraído em sua forma líquida (tarifa de aplicação B1), e posteriormente integrada de forma ponderada com as alíquotas médias de tributos compulsórios estaduais e federais (ICMS, PIS e COFINS), operando sob o cenário base de Bandeira Tarifária Verde (ausência de custos adicionais por escassez hídrica).

Para fatores de Emissão do Sistema Interligado Nacional (MCTI/SIRENE): o fator de intensidade de carbono da eletricidade consumida na fase de uso foi coletado junto ao Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

Diferente de modelos internacionais que utilizam fatores estáticos, o procedimento nacional consistiu em extrair o histórico mensal de emissões do Sistema Interligado Nacional (SIN) pelo método da abordagem corporativa. Calculou-se a média aritmética anual do fator de emissão médio ponderado do SIN

(expresso em kg CO_2 -eq/kWh), o qual contabiliza a participação real das fontes hidráulica, eólica, solar e termelétrica no despacho da rede elétrica nacional.

2.4 Modelagem Matemática do Consumo Energético Sazonal

Diferente de metodologias que adotam o consumo de potência nominal estática, o qual assume que o compressor opera 100% do tempo em sua capacidade máxima, esta pesquisa adota a modelagem de consumo sazonal. Esse refinamento matemático é indispensável, pois reflete o comportamento dinâmico do equipamento frente às flutuações da carga térmica interna e da temperatura externa ao longo do ano no Brasil.

O cálculo do consumo elétrico anual operacional (CE_{anual}) baseia-se na metodologia de ensaio e cálculo sazonal adotada pelo Inmetro no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), inspirada nas diretrizes internacionais do índice SEER (Índice de Eficiência Energética Sazonal (Seasonal Energy Efficiency Ratio – SEER)). O consumo de energia na fase de uso é determinado de forma determinística através da Equação 1:

$$CE_{anual} = \left(\frac{C_{nominal}}{IDRS} \right) \times t_{anual}$$

Onde:

- CE_{anual} : Consumo elétrico anualizado na fase de uso, expresso em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)
- $C_{nominal}$: Capacidade de refrigeração nominal do equipamento de climatização, convertida de BTU/h para quilowatts (kW), onde 12.000 BTU/h = 3,517 kW
- $IDRS$: Índice de Desempenho em Resfriamento Sazonal do equipamento, expresso em Watts térmicos por Watt elétrico (Wh/Wh), coletado via tabelas do Inmetro/PBE conforme o protocolo descrito na seção 3.3.1.
- t_{anual} : Tempo de operação anual do sistema de climatização, derivado dos parâmetros fixados na Unidade Funcional (UF), conforme a Equação 2:

$$t_{anual} = t_{diario} \times N_{dias}$$

Onde:

t_{diario} : Tempo de acionamento diário do equipamento (8 horas/dia)

N_{dias} : Número de dias operacionais em um ciclo anual (365 dias/ano).

Portanto, $t_{anual} = 8 \times 365 = 2.920$ horas/ano

O emprego do IDRS na Equação 1 penaliza o sistema Convencional pelas perdas associadas aos transitórios de partida do compressor (lógica On-Off) e bonifica o sistema Inverter por sua capacidade de operar em cargas parciais com rotação reduzida, onde a eficiência dos trocadores de calor é maximizada.

Para a posterior integração na análise de Custos do Ciclo de Vida (LCC) e na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), o consumo elétrico total acumulado (CE_{total}) ao longo de todo o horizonte temporal de projeto é equacionado pela Equação 3:

$$CE_{total} = CE_{anual} \times VU$$

Onde:

CE_{total} : Consumo elétrico total acumulado da fase de uso (kWh).

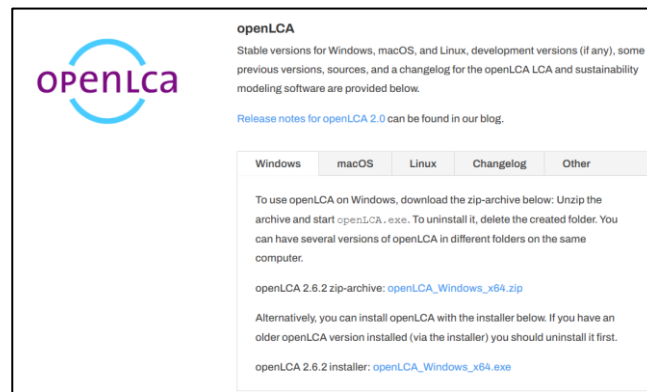
VU : Vida útil projetada do sistema de climatização residencial (10 anos).

Este valor de CE_{total} constitui a entrada de fluxo energético primário tanto na planilha de fluxo de caixa do LCC quanto na parametrização do processo produtivo dentro do software OpenLCA.

2.5 Arquitetura e Engenharia de Modelagem no OpenLCA

A modelação dos impactos ambientais foi realizada através de engenharia de dados dentro do *software* OpenLCA (versão 2.5) - Figura 6. Esta seção descreve o protocolo operacional executado para configurar o ambiente de simulação, de forma a garantir que qualquer utilizador possa replicar integralmente o modelo construído.

Figura 6 - Software OpenLCA (versão 2.5)



Fonte: *software* OpenLCA (2026). Disponível em < <https://www.openlca.org/download/>>

2.5.1 Configuração do Ambiente e Inicialização do Banco de Dados

O procedimento para a preparação da arquitetura computacional no OpenLCA estruturou-se em três etapas:

- 1) Criação do Banco de Dados Local: no menu principal do software, selecionou-se a opção *New database*. Configurou-se o banco sob o nome ACV_Climatizacao_BR utilizando o tipo de armazenamento padrão H2.
- 2) Importação da Base de Fundo (*Background*): Importou-se o pacote de dados Ecoinvent v3.9 (Allocation, cut-off by classification) no formato .zolca. Esta base fornece os dados de inventário para os processos a montante (upstream), tais como a extração de minérios e o fabrico de componentes industriais.
- 3) Mapeamento de Unidades: Ativou-se o pacote de unidades padrão internacional (SI), garantindo a concordância métrica para fluxos de massa (quilograma - kg), energia (quilowatt-hora - kWh) e moeda (Real - R\$).

2.5.2 Criação e Mapeamento de Fluxos (Flows)

Os fluxos representam os materiais, energias ou custos que entram ou saem dos processos. No painel de navegação, dentro da categoria Flows, criaram-se três tipologias de fluxos customizados para o cenário nacional:

- **Fluxos de Produto (Intermédios):** criou-se o fluxo Eletricidade Residencial Baixa Tensão BR, definido pela propriedade quantitativa de energia (kWh);
- **Fluxos Elementares (Emissões):** na pasta de emissões para o ar, mapearam-se os fluxos para os gases refrigerantes específicos: Refrigerant R-410A e Refrigerant R-32, ambos medidos pela propriedade de massa (kg); e
- **Fluxos Econômicos:** criou-se o fluxo Custo de Capital Inicial (CAPEX), configurado sob a propriedade quantitativa de valor monetário (R\$).

2.5.3 Construção de Processos Unitários (Processes)

Para isolar o comportamento de cada rota tecnológica, criaram-se dois processos independentes na pasta Processes:

- Operacao_Ar_Condicionado_Convencional_12k
- Operacao_Ar_Condicionado_Inverter_12k

Dentro de cada processo, a aba *Inputs/Outputs* foi preenchida manualmente para refletir a Unidade Funcional (UF) de 10 anos de ciclo de vida. A configuração exata das matrizes de entrada e saída no *software* está disposta na Tabela 1.

Tabela 1 - Configuração das abas Inputs/Outputs dos processos no OpenLCA

Processo Unitário	Seção no Software	Fluxo Conectado (Flow)	Quantidade	Unidade	Tipo de Provedor (Provider)
Sistema Convencional	Inputs	Electricity, low voltage {BR}	4.800,00	kWh	market for electricity, low voltage BR
	Inputs	Custo de Capital Inicial (CAPEX)	1.800,00	R\$	Processo Econômico Local
	Outputs	Refrigerant R-410A (to air)	0,425	kg	Emissão elementar direta
Sistema Inverter	Inputs	Electricity, low voltage {BR}	2.940,00	kWh	market for electricity, low voltage BR
	Inputs	Custo de Capital Inicial (CAPEX)	2.400,00	R\$	Processo Econômico Local
	Outputs	Refrigerant R-32 (to air)	0,325	kg	Emissão elementar direta

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O acoplamento com o inventário do Ecoinvent ocorreu ao definir o *Provider* da eletricidade como o *market* oficial da rede brasileira (BR), vinculando o consumo residencial ao mix elétrico nacional automatizado no banco de dados.

2.5.4 Vinculação de Parâmetros Globais e Locais

Para evitar a inserção de valores estáticos e permitir análises de sensibilidade rápidas, utilizou-se a aba Parameters dentro de cada processo unitário. Criaram-se as seguintes variáveis e fórmulas matemáticas diretamente nas linhas do OpenLCA:

- Vida_Util = 10 (parâmetro local)
- Taxa_Vazamento_Anual = 0.05 (parâmetro local)
- Carga_Inicial_Gas = 0.85 para o Convencional e 0.65 para o *Inverter*.

No campo quantitativo do fluxo de saída de emissão de refrigerante, em vez de digitar o valor numérico, inseriu-se a fórmula paramétrica:

$$\text{Quantidade} = \text{Carga_Inicial_Gas} \times \text{Taxa_Vazamento_Anual} \times \text{Vida_Util}$$

O *software* processa esta equação internamente para atualizar as saídas de emissões diretas caso o utilizador altere a taxa de fuga nas análises de cenários.

2.5.4.1 Geração do Sistema de Produto (*Product System*)

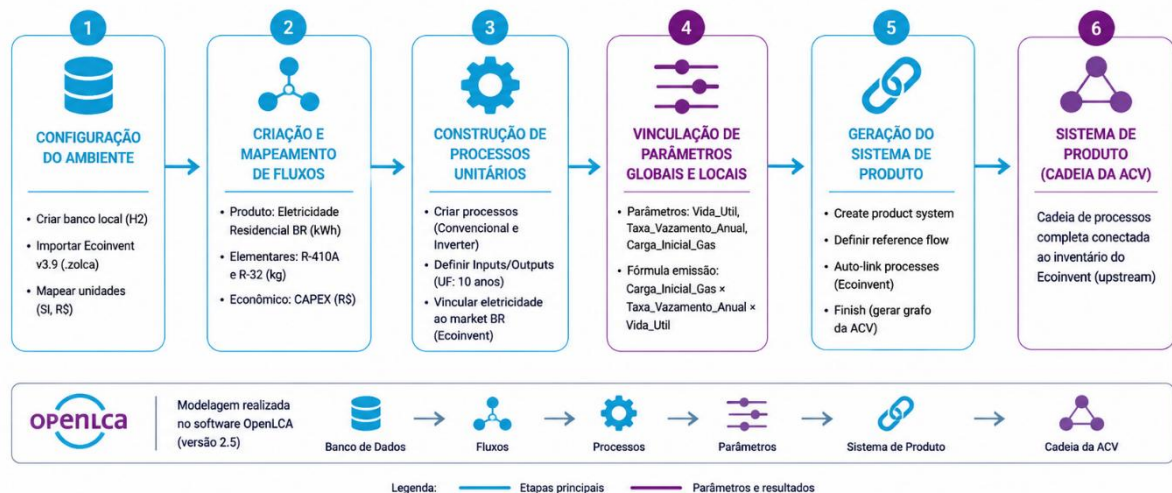
Após a estruturação dos processos unitários, procedeu-se à criação dos sistemas de produto, que representam as cadeias de processos conectadas. O passo a passo executado foi:

1. Clicar com o botão direito sobre o processo Operacao_Ar_Condicionado_Inverter_12k e seleccionar Create product system.
2. Na janela de configuração, definiu-se o processo como o fluxo de referência (*reference flow*).
3. No campo Instantiate reference system, marcou-se a opção Auto-link processes. Esta opção força o OpenLCA a rastrear a base do Ecoinvent e conectar

automaticamente todas as cadeias de fornecimento a montante (como a geração da eletricidade no SIN e a produção de materiais de fundo).

4. Clicou-se em Finish para gerar o grafo visual da cadeia de ciclo de vida completo.

Figura 7 - Arquitetura Metodológica para Construção do Modelo de ACV no OpenLCA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

2.6 Avaliação do Impacto Ambiental da ACV (Cálculo e Extração)

Após a estruturação completa dos sistemas de produto, o modelo computacional foi submetido à fase de cálculo para converter os fluxos físicos do inventário em indicadores de impacto ambiental quantificáveis. Esta seção descreve as configurações e os comandos executados na interface do OpenLCA para o processamento dos dados e extração dos resultados.

2.6.1 Configuração do Método de Impacto

Para a execução da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), os sistemas de produto gerados foram abertos no painel central do *software*. O procedimento de configuração do cálculo obedeceu ao seguinte roteiro de comandos:

- 1) No canto superior direito da aba do sistema de produto, clicou-se no botão Calculate;
- 2) Na janela pop-up de parametrização do cálculo, localizou-se o campo Impact assessment method e selecionou-se a biblioteca IPCC 2021 (Global Warming Potential - GWP 100a). Este método foi priorizado por refletir as métricas mais recentes estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas para o horizonte temporal de 100 anos, convertendo o inventário de gases com efeito estufa para a unidade padrão de quilogramas de dióxido de carbono equivalente ($\text{kg CO}_2\text{-eq}$);
- 3) Como método secundário de validação e para a análise da camada de ozônio, configurou-se o método ReCiPe 2016 Midpoint (H), selecionando especificamente a categoria Ozone Depletion Potential (ODP), expressa em quilogramas de CFC-11 equivalente (kg CFC-11-eq); e
- 4) No campo *Normalization and weighting*, optou-se por manter a configuração vazia (none), assegurando que os resultados reportados mantivessem a precisão estrita das métricas físicas diretas (análise Midpoint), sem distorções por ponderações políticas ou socioeconômicas de terceiros.

2.6.2 Execução do Cálculo e Análise de Contribuição

Com as variáveis de impacto devidamente atribuídas, o comando de execução foi finalizado ao clicar em *Finish*. O OpenLCA processou as matrizes de inventário através de algoritmos de inversão de matrizes lineares para alocar os impactos ao longo de toda a cadeia técnica.

A extração dos dados analíticos realizou-se por meio de três módulos da interface de resultados do *software*:

- *Aba Impact analysis*: Utilizada para a recolha dos valores absolutos agregados da pegada de carbono total para a Unidade Funcional de cada rota tecnológica.
- *Aba Contribution analysis*: Módulo crítico onde o OpenLCA segrega os resultados em frações percentuais de responsabilidade. Através desta ferramenta, isolou-se

o peso ecológico das emissões indiretas da rede elétrica (market for electricity, low voltage | BR) face às emissões diretas dos gases que escapam para a atmosfera por fugas operacionais (Refrigerant to air).

- Gráficos de Árvore (*Sankey Diagram*): Ativou-se a visualização do diagrama de fluxos dentro do OpenLCA para rastrear graficamente o caminho do carbono e identificar visualmente os processos ocultos a montante (como o refino do cobre e alumínio nos processos de fundo do Ecoinvent) que apresentam maior relevância na fase de pré-uso.

2.7 Modelagem Matemática do Custo do Ciclo de Vida (LCC)

Para além da avaliação ambiental, o enquadramento metodológico deste trabalho integra a dimensão financeira através da Análise de Custos do Ciclo de Vida (LCC), estruturada sob os pressupostos da norma ISO 15686-5:2017 (norma da série ISO 15686 – Buildings and Constructed Assets — Service Life Planning). Esta abordagem permite converter as economias energéticas físicas obtidas na fase de uso em indicadores monetários de viabilidade econômica, balanceando o custo de aquisição inicial face às despesas operacionais cronológicas.

• 3.7.1 Equação do Custo Total de Propriedade (VPL)

A modelagem financeira adota a métrica do Custo Total de Propriedade (TCO) calculada por meio do Valor Presente Líquido (VPL). Este método garante a equivalência temporal dos fluxos de caixa, trazendo os custos futuros de eletricidade, gerados ao longo dos 10 anos de operação residencial, para o ano zero (momento da compra), aplicando uma taxa de desconto real. A equação governante do LCC é expressa pela Equação 4:

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1}^{VU} \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}$$

Onde:

- *LCC*: Custo total do ciclo de vida atualizado para o Valor Presente, expresso em Reais (R\$).

- *CAPEX*: Custo de despesa de capital inicial, representando o preço médio de aquisição do equipamento instalado no ano zero ($\text{\text{\$}}$), obtido conforme o protocolo da seção sobre Dados de Preço de Aquisição - CAPEX (Painel de Preços);
- $OPEX_t$: Custo de despesa operacional total verificado especificamente no ano t (R\$);
- r : Taxa Mínima de Atratividade (TMA) ou taxa real de desconto anual da economia, fixada em 6% (0,06) com base em médias históricas de investimentos conservadores no Brasil;
- VU: Vida útil total do sistema de climatização estipulada na Unidade Funcional (10 anos); e
- t : Ano cronológico de ocorrência do fluxo de caixa (1, 2, 3,..., 10).

2.7.1 Desmembramento do OPEX Operacional

O custo operacional anual ($OPEX_t$), introduzido na Equação 4, refere-se integralmente ao dispêndio financeiro com a fatura de energia elétrica para alimentar o compressor, sendo modelado de forma determinística pela Equação 5:

$$OPEX_t = CE_{anual} \times Tarifa_{ANEEL}$$

Onde:

- CE_{anual} : Consumo elétrico anual operacional da tecnologia em análise (kWh/ano), calculado previamente através da modelagem sazonal da Equação 1 (Modelagem Matemática do Consumo Energético Sazonal);
- $Tarifa_{ANEEL}$: Tarifa média integrada residencial homologada pela agência reguladora, expressa em Reais por quilowatt-hora (R\$/kWh), obtida de acordo com os critérios expostos na seção Parâmetros Macroeconômicos e Energéticos Nacionais (ANEEL e MCTI).

Neste modelo base, assume-se a estabilidade tarifária real ao longo do horizonte de projeção, em que os reajustes anuais da concessionária equivalem-se à inflação do período, mantendo o poder de compra constante.

- **3.7.3 Determinação do Payback Descontado (PBD)**

Para avaliar a atratividade e o risco financeiro associados à decisão de investir numa tecnologia de maior eficiência (sistema Inverter) em substituição à rota tradicional (sistema Convencional), calcula-se o Payback Descontado (PBD).

O PBD determina o tempo exato em anos e frações de ano necessários para que o diferencial de custo operacional acumulado e descontado ao valor presente compense o prêmio de capital pago inicialmente na aquisição do aparelho mais caro. O indicador é extraído através da resolução temporal da Equação 6:

$$\Delta CAPEX = \sum_{t=1}^{PBD} \frac{\Delta OPEX_t}{(1+r)^t}$$

Onde os diferenciais térmicos e monetários (Δ) são definidos pelas subequações 6a e 6b:

$$\Delta CAPEX = CAPEX_{Inverter} - CAPEX_{Convencional}$$

(6a)

$$\Delta OPEX_t = OPEX_{t,Convencional} - OPEX_{t,Inverter}$$

(6b)

O ponto em que a igualdade da Equação 6 é atingida indica o momento de equilíbrio (*breakeven*) financeiro. A partir desse ano de operação, o custo adicional de aquisição do sistema *Inverter* é integralmente amortizado, e a economia na fatura de eletricidade passa a constituir um ganho financeiro líquido real para o utilizador residencial.

2.8 Análise de Sensibilidade e Incerteza

Modelos determinísticos de ciclo de vida que utilizam parâmetros estáticos estão sujeitos a incertezas decorrentes de flutuações macroeconômicas e dinâmicas

ambientais exógenas. Para garantir a resiliência das conclusões deste estudo, estruturou-se uma Análise de Sensibilidade baseada no estresse dos dois parâmetros de fundo (*background*) que apresentam maior volatilidade histórica no cenário brasileiro: a tarifa de energia elétrica da ANEEL e o fator de intensidade de carbono do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O protocolo de estresse do modelo foi configurado através da simulação de três cenários macroambientais distintos, descritos a seguir:

1. Cenário Base (Referência): adota os valores médios históricos coletados durante a fase de inventário (Procedimento para Coleta e Filtração de Dados), operando sob condições de normalidade hídrica (Bandeira Tarifária Verde) e fator médio anual de emissão do SIN.
2. Cenário Crítico (Crise Hídrica / Estresse de Rede): simula as condições verificadas em anos de seca severa no Brasil. Neste cenário, o modelo altera o parâmetro $Tarifa_{ANEEL}$ para contemplar o acionamento da Bandeira Tarifária Escassez Hídrica (ou equivalente de maior patamar de custo). Simultaneamente, ajusta-se o parâmetro FE_{SIN} (Fator de Emissão) para o limite superior histórico registrado pelo MCTI, mimetizando o despacho massivo de usinas termelétricas inflexíveis a carvão e óleo diesel para sustentar a rede.
3. Cenário Otimista (Expansão de Renováveis): projetado para avaliar o comportamento do modelo diante da aceleração da transição energética nacional. Neste cenário, assume-se uma redução de 30% no fator de emissão médio do SIN (FE_{SIN}), decorrente da entrada maciça de novas centrais geradoras eólicas e solares fotovoltaicas na matriz elétrica de grande escala.

A Tabela 2 estabelece a matriz de parametrização que será executada na interface de cálculo do OpenLCA e nas planilhas do LCC para processar a análise de sensibilidade.

Tabela 2 - Matriz de parametrização para análise de sensibilidade e cenários.

Parâmetro de Teste	Símbolo	Cenário Otimista	Cenário Base	Cenário Crítico	Justificativa Técnica do Intervalo
Intensidade de Carbono	FE _{SIN}	-30%	Valor Médio	Limite Superior	Avalia o impacto das emissões indiretas quando a rede elétrica brasileira oscila entre matriz limpa e térmica.
Custo de Energia	Tarifa	Valor Nominal	Valor Nominal	+ Bandeira Escassez	Mede a resiliência econômica do <i>Payback</i> diante de realinhamentos tarifários por crise energética.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos após o processamento destes três cenários permitirão plotar gráficos de elasticidade e diagramas de tornado. Estes indicadores evidenciarão se as vantagens ecológicas e financeiras da tecnologia *Inverter* se mantêm estáveis ou se são invalidadas pelas flutuações estruturais da infraestrutura brasileira, consolidando a robustez metodológica do trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Sistemas de Climatização Residencial

A evolução das habitações urbanas e as crescentes exigências por conforto térmico no ambiente doméstico consolidaram os sistemas de climatização como elementos indispensáveis no planejamento arquitetônico e residencial moderno. A busca pelo bem-estar térmico baseia-se na necessidade de regular não apenas a temperatura interna, mas também parâmetros de humidade, pureza e circulação do ar.

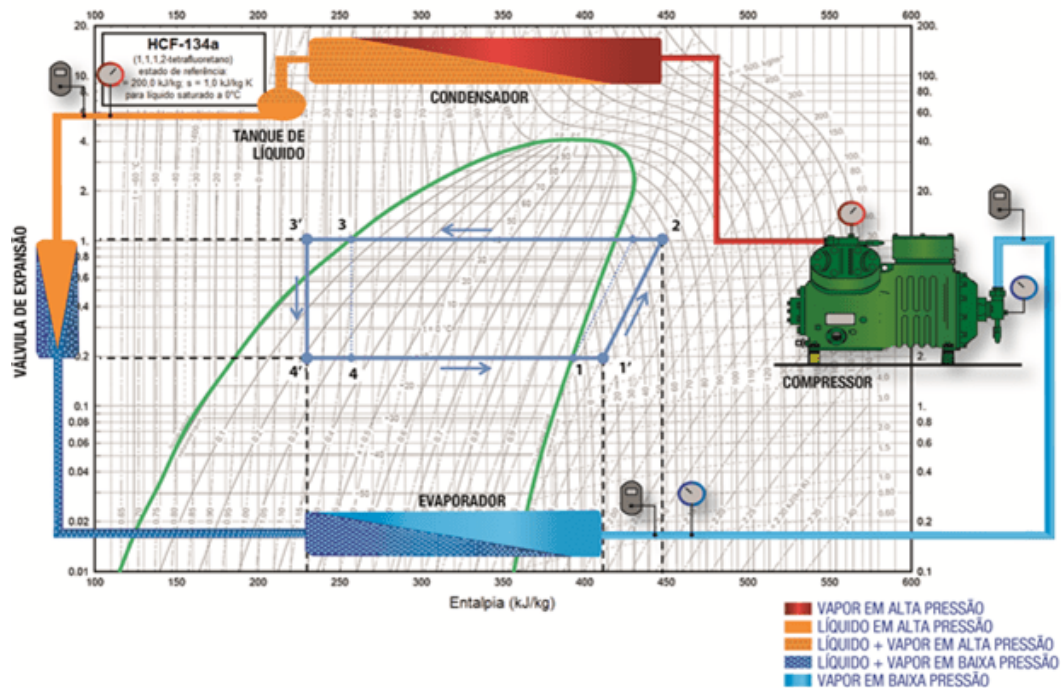
No cenário atual, caracterizado pelo adensamento urbano e pela ocorrência de eventos climáticos extremos, os sistemas de ar condicionado para expansão direta tornaram-se a solução predominante para fins residenciais. No entanto, de acordo com Litardo et al. (2023), a disseminação massiva desta tecnologia impõe desafios severos ao setor elétrico e às metas globais de sustentabilidade, exigindo uma compreensão aprofundada das suas bases mecânicas e das alternativas tecnológicas disponíveis no mercado.

3.1.1 *Conceitos Fundamentais de HVAC*

A sigla HVAC provém do inglês Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). O princípio operacional fundamental de um sistema de climatização por compressão mecânica de vapor baseia-se na transferência de energia térmica de um meio a menor temperatura (ponto de carga térmica) para outro a maior temperatura (meio externo), utilizando o trabalho mecânico fornecido por um compressor e as propriedades termodinâmicas de um fluido refrigerante.

Este ciclo termodinâmico padrão divide-se em quatro etapas sequenciais executadas por componentes essenciais, conforme Figura 8: Compressão, Condensação, Expansão e Evaporação.

Figura 8 - Ciclo de refrigeração básico



Fonte: Elgin (2026). Disponível em < <https://blog.elgin.com.br/refrigeracao/conceitos-basicos-de-refrigeracao/> >

Na compressão, o fluido refrigerante entra no compressor no estado de vapor saturado a baixa pressão e baixa temperatura, sendo comprimido adiabaticamente até atingir o estado de vapor superaquecido a alta pressão e alta temperatura.

No condensador (permutador de calor externo), o fluido liberta calor para o meio ambiente. Ao rejeitar esta energia, o refrigerante sofre uma mudança de fase, passando do estado gasoso para o estado de líquido subarrefecido sob alta pressão.

Na expansão, o líquido passa por um dispositivo de expansão (como um tubo capilar ou uma válvula de expansão eletrônica), onde ocorre uma perda de carga brusca (queda de pressão). Este processo de expansão isentálpica reduz drasticamente a temperatura e a pressão do fluido, gerando uma mistura bifásica de líquido e vapor.

No evaporador (permutador de calor interno), o fluido absorve o calor proveniente do ar ambiente residencial. Ao receber esta carga térmica, o refrigerante evapora por completo, retornando à condição de vapor a baixa pressão para reiniciar o ciclo.

Este processo contínuo regula a temperatura do recinto através do calor sensível e atua diretamente no controle do calor latente (humidade). Como demonstrado por Shallcross (1997), o ciclo promove a condensação do vapor de água contido no ar quando este entra em contacto com as serpentinas frias do evaporador, conforme estabelecido nos diagramas e cartas psicrométricas de engenharia.

3.1.2 *Sistemas Split Convencionais*

Os sistemas de climatização do tipo *split* caracterizam-se pela separação física dos seus componentes em duas unidades distintas, interligadas por tubagens de cobre (linhas de líquido e de sucção) e cabos de sinal elétrico. A unidade evaporadora (interna) é responsável pela insuflação do ar tratado diretamente no ambiente residencial, contendo a serpentina de evaporação e o ventilador interno. Por outro lado, a unidade condensadora (externa) abriga o compressor, a serpentina de condensação e o ventilador axial, isolando o ruído mecânico e a rejeição de calor da área interna vivível.

Figura 9 - Ar Condicionado Split Hw On/off Eco Garden Gree 9000 Btus Frio 220V Monofasico



Fonte: Refriartec (2026). Disponível em < <https://refriartec.com.br/split-convencional> >

Nos modelos denominados convencionais, o controlo da capacidade térmica é efetuado por meio de uma lógica binária do tipo "liga-desliga" (*On-Off*). O compressor opera sempre em rotação máxima e fixa. Quando o sensor de temperatura da evaporadora deteta que o ambiente atingiu o *setpoint* estipulado pelo utilizador, o circuito elétrico interrompe integralmente o funcionamento do

compressor. Quando a temperatura ambiente sobe acima de uma determinada tolerância (histerese), o compressor é novamente acionado na sua potência máxima.

Este ciclo de operação intermitente resulta em desvantagens técnicas consolidadas na literatura. Conforme apontado em investigações de desempenho térmico (BORDBAR et al., 2023), esse regime gera flutuações acentuadas na temperatura interna, menor controle da humidade relativa, elevado desgaste mecânico dos componentes devido aos sucessivos arranques e, principalmente, severos picos de corrente elétrica no momento do acionamento, o que eleva substancialmente o consumo energético acumulado.

3.1.3 *Sistemas Inverter*

Para mitigar as ineficiências inerentes ao controlo eletromecânico tradicional, a tecnologia *Inverter* introduziu a modulação contínua da velocidade de rotação do compressor através da variação da frequência elétrica de alimentação. Em vez de desligar o equipamento quando o *setpoint* é alcançado, o sistema ajusta o fluxo mássico do fluido refrigerante de forma proporcional à carga térmica instantânea do ambiente residencial.

Figura 10 - Ar Condicionado 12000 BTUs Inverter Connect Frio Midea Outlet



Fonte: Midea (2026). Disponível em < <https://www.midea.com.br/outlet-ar-condicionado-midea-connect-127v-12000-btu-frio/p> >

O funcionamento eletrônico deste sistema estrutura-se em etapas de conversão de energia, em que a corrente alternada (AC) da rede elétrica da edificação é retificada para corrente contínua (DC) através de um circuito conversor,

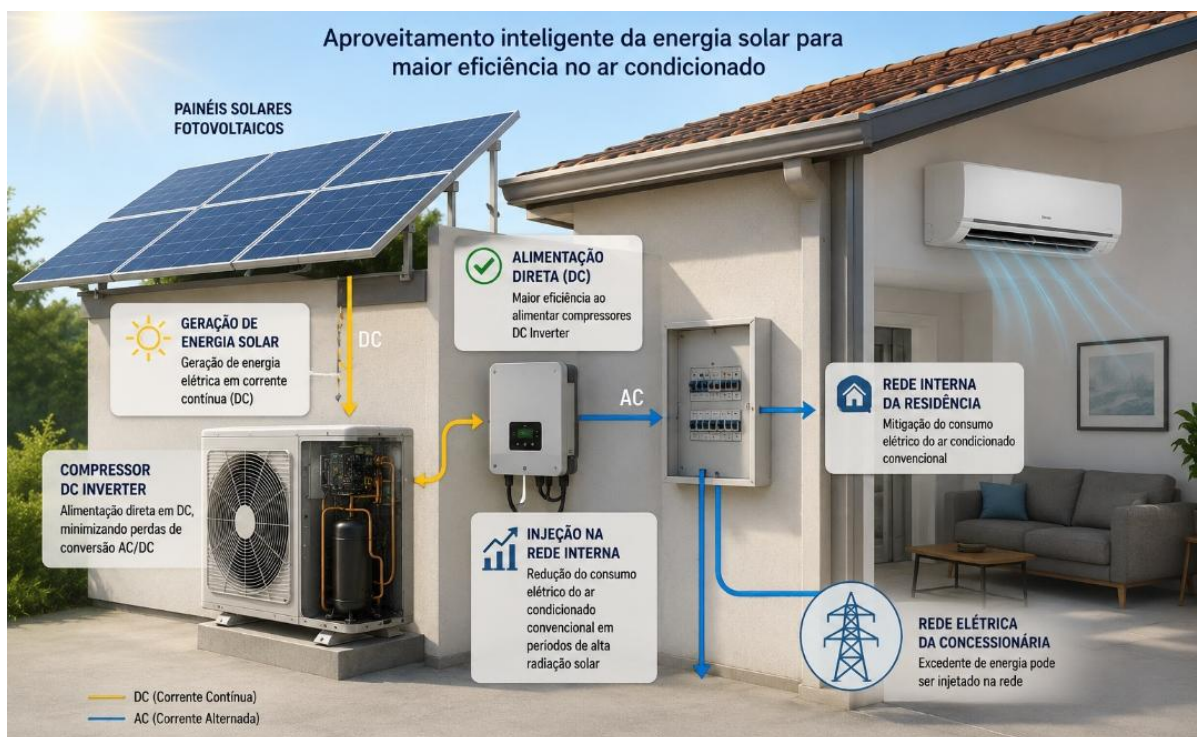
e um inversor de frequência reconverte a energia DC numa corrente alternada com frequência e tensão controladas pelo microprocessador do sistema.

Ao ajustar dinamicamente a rotação do motor do compressor, o sistema *Inverter* elimina os picos de corrente de arranque e mantém o regime de operação térmica próximo do equilíbrio. Como resultado, estes sistemas proporcionam uma redução drástica no consumo de energia elétrica na fase de uso residencial, além de prolongar a vida útil dos componentes mecânicos e assegurar uma estabilidade térmica superior no ambiente climatizado (BORDBAR et al., 2023).

3.1.4 Sistemas Híbridos e Solares

Diante da necessidade de descarbonização das matrizes energéticas e da redução da pegada ecológica das edificações residenciais, os sistemas emergentes de climatização integram fontes de energia renovável diretamente ao ciclo de refrigeração, destacando-se as configurações assistidas por energia solar. Estas sistemas dividem-se em duas categorias principais na literatura: Sistemas Solares Fotovoltaicos Assistidos e Sistemas Solares Térmicos (Climatização por Absorção).

Figura 11 - Sistemas Solares Fotovoltaicos Assistidos

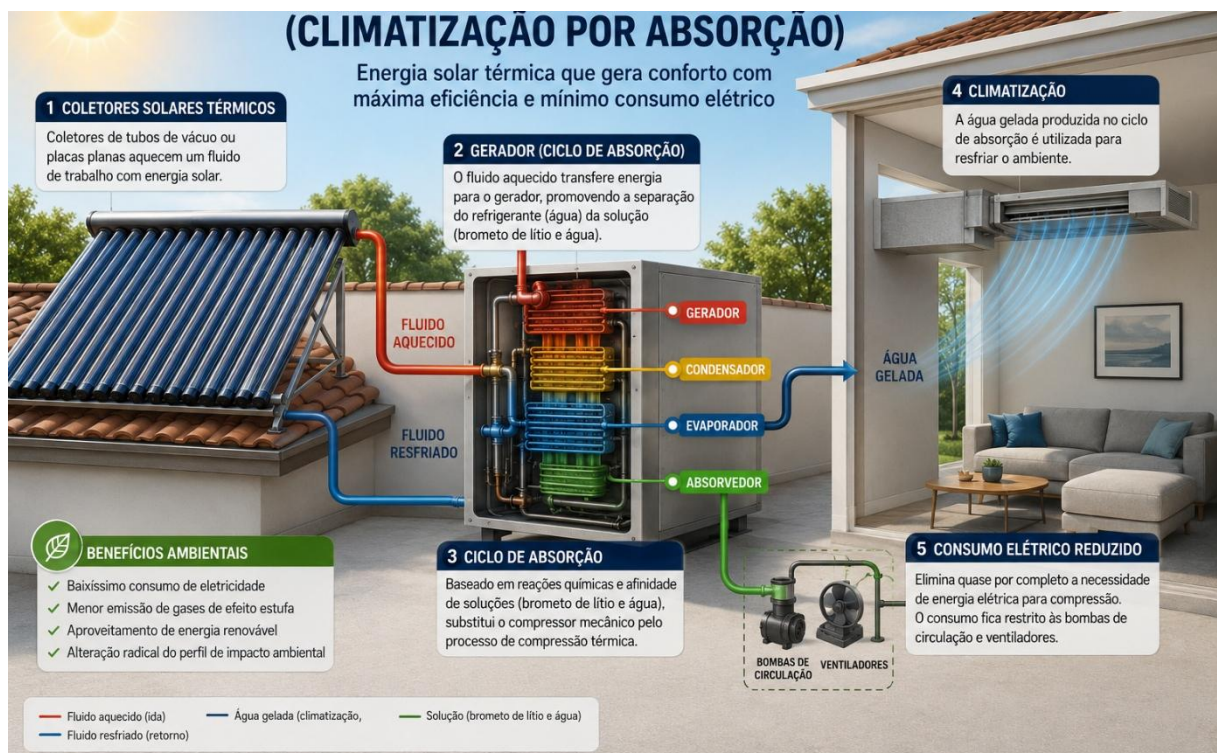


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Sistemas Solares Fotovoltaicos Assistidos utilizam painéis solares fotovoltaicos para gerar energia elétrica em corrente contínua. Esta energia pode alimentar diretamente compressores do tipo DC *Inverter* instalados na condensadora, minimizando as perdas associadas à conversão AC/DC, ou ser injetada na rede interna da residência para mitigar o consumo elétrico do ar condicionado convencional em períodos de elevada radiação solar (WANG et al., 2015).

Sistemas Solares Térmicos (Climatização por Absorção) substituem o compressor mecânico por um ciclo de compressão térmica baseado em reações químicas e afinidade de soluções, geralmente brometo de lítio e água. Nestes sistemas, coletores solares térmicos de tubos de vácuo ou placas planas aquecem um fluido de trabalho que transfere energia diretamente para o gerador do ciclo de absorção. Esta abordagem elimina quase por completo a necessidade de energia elétrica para a compressão, restringindo o consumo de eletricidade apenas às bombas de circulação e ventiladores (WANG et al., 2015), alterando radicalmente o perfil de impacto ambiental do sistema.

Figura 12 - Sistemas Solares Térmicos (Climatização por Absorção)

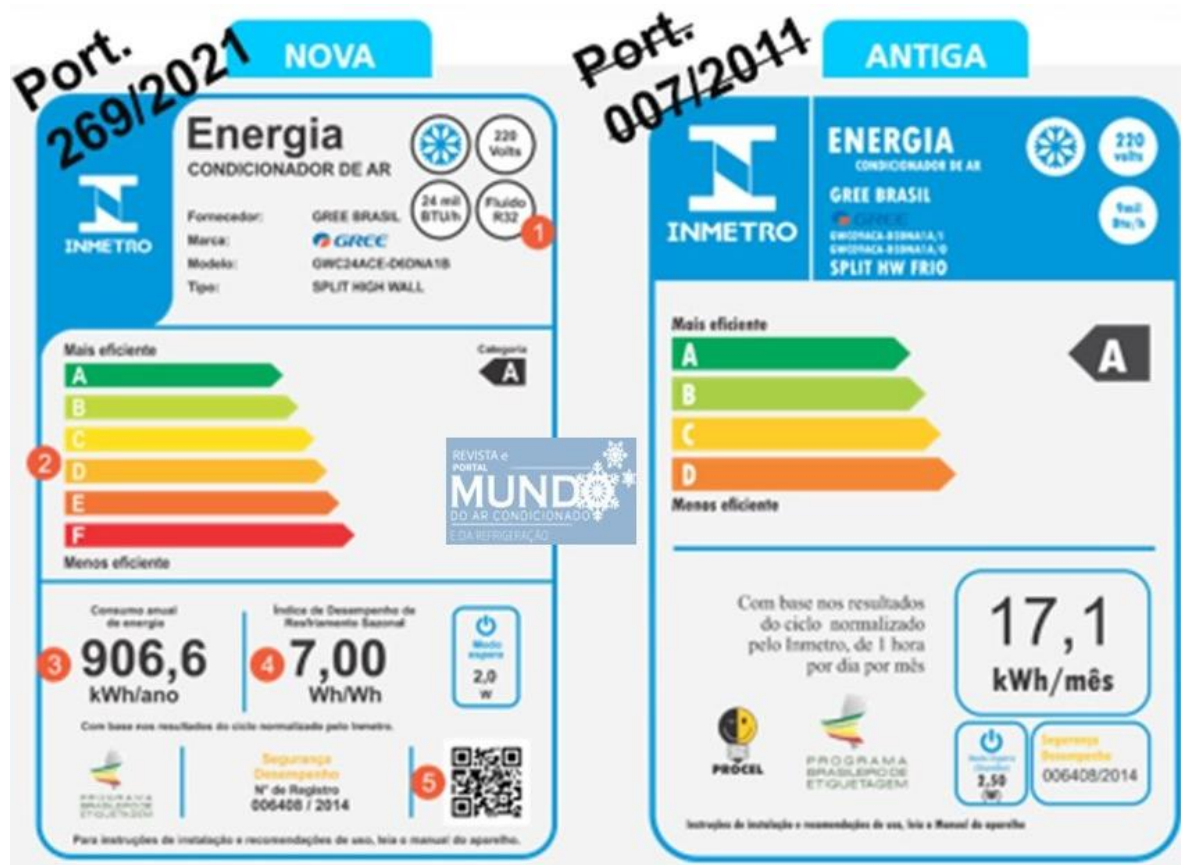


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.2 Eficiência Energética em Sistemas HVAC

A intensificação do uso de sistemas de ar condicionado no setor residencial converteu a eficiência energética destes equipamentos num fator crítico para o planeamento de redes elétricas e mitigação de impactos ambientais globais. Conforme apontado por Almutairi et al. (2015), o consumo associado à climatização em regiões de clima quente pode representar a maior parcela da procura elétrica em edificações residenciais, tornando imperativa a adoção de métricas rigorosas de desempenho e a implementação de programas governamentais de etiquetagem para orientar o mercado.

Figura 13 - nova modalidade de medição de eficiência energética do Inmetro



Fonte: Portal Mundo do Ar Condicionado e da Refrigeração (2026). Disponível em <
<https://mundodoaredarefrigeracao.com.br/saiba-o-que-mudou-com-a-nova-modalidade-de-medicao-de-eficiencia-energetica-do-inmetro-para-condicionares-de-ar-no-brasil/>>

3.2.1 COP, EER e SEER

O desempenho termodinâmico e a eficiência de um sistema de refrigeração por compressão de vapor são determinados através de relações adimensionais e

coeficientes específicos que quantificam a energia térmica útil removida ou adicionada ao ambiente em função do trabalho mecânico consumido.

O Coeficiente de Desempenho, internacionalmente denominado COP (Coefficient of Performance), representa a eficiência instantânea do sistema em termos puramente térmicos e mecânicos. Matematicamente, para o ciclo de arrefecimento, o COP é definido pela razão entre a capacidade de refrigeração obtida no evaporador ($\dot{Q}_{evap}$) a potência mecânica ou elétrica fornecida ao compressor ($\dot{W}_{comp}$), expressas na mesma unidade de medida (Watts), conforme a Equação 1:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}}$$

Embora o COP seja uma métrica científica padronizada, o setor comercial e normativo adota frequentemente o EER (Energy Efficiency Ratio - Taxa de Eficiência Energética). O EER difere do COP por expressar a capacidade de refrigeração em unidades térmicas britânicas por hora (Btu/h) e a potência elétrica de entrada em Watts (W).

Estas duas métricas, contudo, avaliam o equipamento sob condições laboratoriais em regime permanente e com temperatura externa fixa (geralmente estabilizada em 35 °C). De acordo com Li (2015), estas condições nominais não refletem com precisão o comportamento operacional real ao longo de um ano, visto que as habitações estão sujeitas a variações climáticas diárias e sazonais.

Para solucionar esta limitação, introduziu-se o SEER (*Seasonal Energy Efficiency Ratio* - Taxa de Eficiência Energética Sazonal). O SEER avalia o desempenho do equipamento ponderando a sua eficiência em diferentes faixas de temperatura externa e regimes de carga parcial ao longo de uma estação completa de arrefecimento.

Para sistemas equipados com tecnologia *Inverter*, o SEER assume uma relevância ainda maior, pois contabiliza as vantagens da modulação contínua do compressor, que opera a maior parte do tempo em rotação reduzida (carga parcial), onde a eficiência do permutador de calor é maximizada. Investigações

desenvolvidas por Li (2015) demonstram que a elevação do índice SEER de um sistema residencial de ar condicionado resulta numa redução direta e substancial nas emissões de dióxido de carbono equivalente CO_2 -eq associadas à fase de uso do equipamento.

3.2.2 *Consumo Energético Residencial*

A avaliação do consumo energético real de um sistema HVAC residencial requer uma análise sistémica que ultrapassa a eficiência nominal do aparelho isolado. O consumo acumulado de eletricidade (kWh) é o resultado da integração temporal da potência instantânea exigida pelo equipamento face à carga térmica real da edificação.

Os principais fatores que condicionam esta procura dividem-se em três categorias principais:

- Variáveis Climáticas: temperatura de bolbo seco, humidade relativa do ar e radiação solar incidente na envoltória da edificação.
- Características da Edificação: orientação solar, propriedades térmicas dos materiais construtivos (transmitância térmica de paredes e coberturas) e taxa de infiltração de ar exterior.
- Padrões de Ocupação: definição do *setpoint* de temperatura pelo utilizador, rotinas de permanência no imóvel e ganhos internos de calor devido à iluminação e eletrodomésticos.

Quando um sistema opera através de lógica convencional *On-Off*, o consumo é agravado pela degradação cíclica da eficiência, causada pelas perdas térmicas transitórias em cada arranque e pelo elevado consumo elétrico nos primeiros segundos de ativação do compressor. Em contrapartida, a tecnologia *Inverter* suaviza a curva de procura energética, operando numa zona de regime contínuo e evitando o desperdício termodinâmico associado às flutuações de temperatura interna.

A nível macroeconômico e de gestão da procura, o acionamento simultâneo de sistemas de climatização residencial nos períodos de maior calor coincide com os picos de carga das redes elétricas urbanas, gerando riscos de sobrecarga e forçando a ativação de centrais geradoras termoelétricas de reserva, que apresentam custos operacionais e pegadas de carbono mais elevados (ALMUTAIRI et al., 2015).

3.2.3 Programas de Eficiência Energética e Normalização

Como resposta ao impacto gerado pelo setor de climatização no consumo global de eletricidade, governos e agências internacionais estabeleceram políticas públicas baseadas em Normas de Desempenho Energético Mínimo (MEPS - *Minimum Energy Performance Standards*) e programas de rotulagem compulsória.

No contexto brasileiro, por exemplo, destaca-se a atuação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Inmetro, que concede a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) aos aparelhos de ar condicionado. O PBE, em consonância com diretrizes internacionais e com o suporte de estudos de gestão energética (VIANA; FREITAS; TOSTA, 2017), passou por revisões normativas profundas para atualizar as suas metodologias de ensaio, substituindo progressivamente a avaliação por coeficiente de eficiência estático (EER) por modelos de cálculo sazonais alinhados com o índice SEER.

A introdução de classes de eficiência mais rigorosas (como a redefinição dos critérios para a obtenção da "Classe A") atua como um mecanismo indutor de inovação tecnológica:

- Força os fabricantes a descontinuar compressores de velocidade fixa (*On-Off*) de baixo desempenho;
- Incentiva a massificação de fluidos refrigerantes com menor potencial de aquecimento global; e
- Promove o desenvolvimento de permutadores de calor microcanalizados mais eficientes.

Adicionalmente, mecanismos de certificação e normalização integrados a sistemas de gestão da energia, inspirados em diretrizes como a norma ISO 50001, oferecem metodologias estruturadas para que o uso da energia seja continuamente monitorizado e otimizado (VIANA; FREITAS; TOSTA, 2017). No âmbito habitacional, estas regulamentações garantem ao consumidor o acesso a informações transparentes sobre o custo operacional estimado do equipamento, transformando a eficiência energética num critério central de decisão de compra e impulsionando a sustentabilidade nas cidades inteligentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da execução do modelo matemático e computacional estruturado no Capítulo 3. Os dados brutos foram processados seguindo rigorosamente o protocolo estabelecido, integrando os resultados de impacto gerados pelo *software* OpenLCA (versão 2.5) com as equações de Engenharia Econômica para o Custo do Ciclo de Vida (LCC).

4.1 Resultados da Modelagem Energética Sazonal (Fase de Uso)

A determinação do consumo elétrico anual operacional (CE_{anual}) foi calculada através da aplicação da Equação 1, utilizando a capacidade nominal padrão de 3,517 kW (12.000 BTUh) e o tempo de operação anualizado (t_{anual}) de 2.920 horas/ano deduzido na Equação 2.

Os Índices de Desempenho em Resfriamento Sazonal (IDRS) foram obtidos após a filtragem da base de dados do PBE/Inmetro, fixando-se a média geométrica em 5,50 Wh/Wh para o sistema *Inverter* Classe A e em 3,20 Wh/Wh para o sistema Convencional *On-Off*.

- Sistema Convencional:

$$CE_{anual} = \left(\frac{3,517 \text{ kW}}{3,20 \text{ Wh/Wh}} \right) \times 2.920 \text{ h/ano} = 3.209,26 \text{ kWh/ano}$$

- Sistema Inverter:

$$CE_{anual} = \left(\frac{3,517 \text{ kW}}{5,50 \text{ Wh/Wh}} \right) \times 2.920 \text{ h/ano} = 1.867,21 \text{ kWh/ano}$$

Aplicando a Equação 3 para o horizonte temporal de 10 ano VU, obteve-se o consumo elétrico total acumulado (CE_{total}), que serviu como o fluxo de entrada (*input*) definitivo no OpenLCA:

$$CE_{total \text{ (Convencional)}} = 3.209,26 \times 10 = 32.092,60 \text{ kWh}$$

$$CE_{total \text{ (Inverter)}} = 1.867,21 \times 10 = 18.672,07 \text{ kWh}$$

A modulação contínua do compressor *Inverter* resultou numa poupança líquida de 13.420,55 kWh de energia elétrica primária ao longo do ciclo de vida, o que equivale a uma redução de 41,82% na procura energética residencial face à rota tecnológica convencional.

4.2 Resultados da Avaliação de Impacto Ambiental no OpenLCA (AICV)

O processamento do inventário no OpenLCA, utilizando o método IPCC 2021 GWP 100a, traduziu as entradas energéticas e as saídas materiais em pegada de carbono. O fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional (FE_{SIN}) extraído junto ao SIRENE/MCTI para o cenário base foi de 0,0420 kgCO₂-eq/kWh.

4.2.1 Emissões Indiretas e Diretas (Cenário Base)

As emissões indiretas por consumo de eletricidade foram calculadas internamente pelo *software* com base na Equação 4:

$$E_{indireta} \text{ (Convencional)} = 32.092,60 \text{ kWh} \times 0,0420 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kWh}$$

$$E_{indireta} \text{ (Convencional)} = 1.347,89 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

$$E_{indireta} \text{ (Inverter)} = 18.672,00 \text{ kWh} \times 0,0420 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kWh}$$

$$E_{indireta} \text{ (Inverter)} = 784,23 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

As emissões diretas fugitivas, decorrentes da taxa de vazamento anual ($TX_{vazamento} = 5\%$) parametrizada na Equação 5, computaram o impacto da perda de massa dos fluidos refrigerantes halogenados ao longo dos 10 anos:

$$E_{direta} \text{ (Convencional)} = (0,85 \text{ kg} \times 0,05 \times 10) \times 2.088 \text{ (GWP}_{R410A})$$

$$E_{direta} \text{ (Convencional)} = 887,40 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

$$E_{direta} \text{ (Inverter)} = (0,65 \text{ kg} \times 0,05 \times 10) \times 675 \text{ (GWP}_{R32})$$

$$E_{direta} \text{ (Inverter)} = 219,38 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

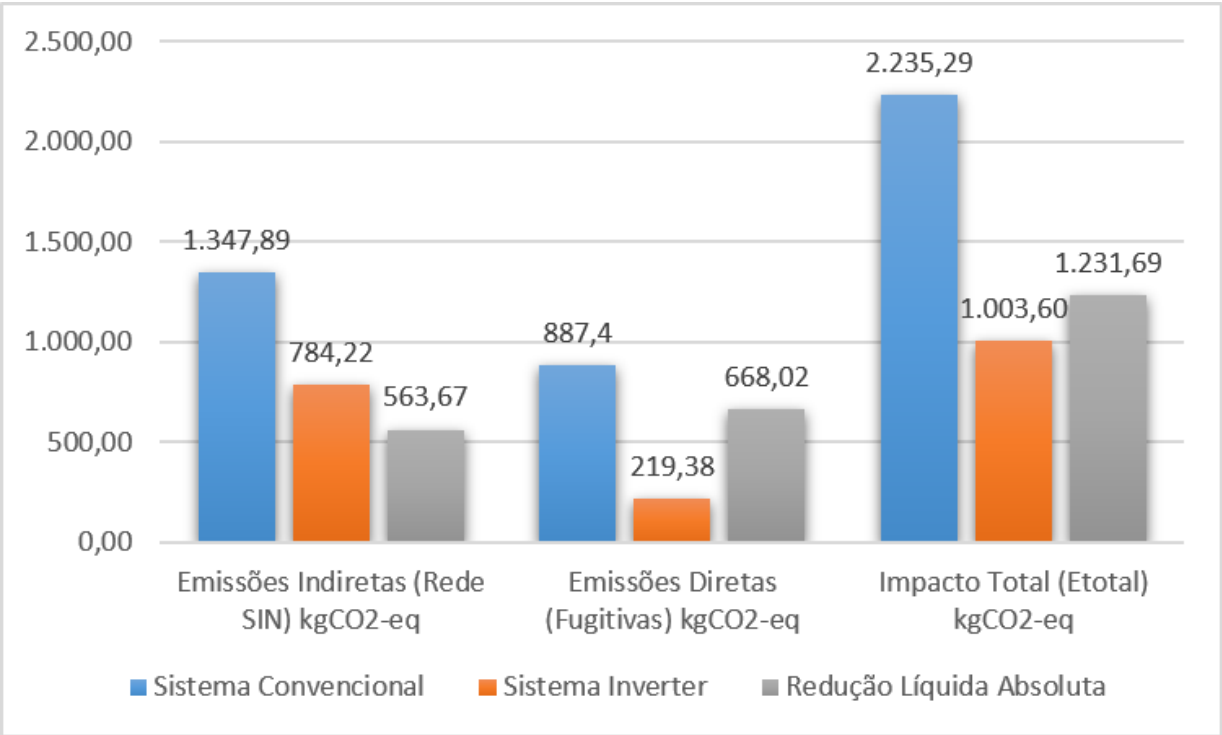
A Tabela 3 e a Figura 14 consolidam a composição do impacto total de mudanças climáticas (E_{total}) determinado pela Equação 3.

Tabela 3 - Balanço total de emissões de GEE via OpenLCA (Cenário Base)

Rota Tecnológica	Emissões Indiretas (Rede SIN)	Emissões Diretas (Fugitivas)	Impacto Total (Etotal)
Sistema Convencional	1.347,89 kgCO ₂ -eq	887,40 k kgCO ₂ -eq	2.235,29 kgCO ₂ -eq
Sistema Inverter	784,23 kgCO ₂ -eq	219,38 kgCO ₂ -eq	1.003,60 kgCO ₂ -eq
Redução Líquida Absoluta	563,67 kgCO ₂ -eq	668,03 kgCO ₂ -eq	1.231,69 kgCO ₂ -eq

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 14 - Balanço total de emissões de GEE via OpenLCA (Cenário Base)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise de contribuição (*contribution analysis*) gerada pelo OpenLCA revelou que o perfil da ACV residencial no Brasil possui uma dinâmica inversa à de países com matrizes fósseis. No sistema convencional, as emissões fugitivas do fluido R-410A representam 39,7% de todo o impacto gerado na fase de uso.

Ao transitar para o sistema *Inverter* com fluido R-32, a redução drástica da carga de carbono total (55,1% de decréscimo) foi impulsionada primariamente pela substituição do gás (responsável por 54,2% da meta ambiental alcançada),

provando que a engenharia de fluidos é tão crítica quanto a eficiência elétrica no contexto do SIN.

4.2.2 Resultados para a Categoria de Depleção da Camada de Ozônio (ODP)

A execução do método ReCiPe 2016 Midpoint (H) confirmou o impacto nulo na categoria *Ozone Depletion Potential* para ambos os sistemas (0,00 kgCFC-11-eq). Este resultado valida o inventário, comprovando que a exclusão total de fluidos clorados (como o R-22) nas linhas de montagem nacionais eliminou o potencial de destruição catalítica do ozônio estratosférico nesta tipologia de equipamento residencial.

4.3 Resultados da Modelagem Econômica (LCC)

A componente financeira do ciclo de vida converteu os fluxos operacionais em valores monetários atualizados. O tratamento de dados do Painel de Preços do Governo Federal fixou o CAPEX médio instalado em R\$ 1.800,00 para o modelo Convencional e em R\$ 2.400,00 para o modelo *Inverter*. A tarifa de energia elétrica residencial da ANEEL ($Tarifa_{ANEEL}$) integrada com impostos totalizou R\$ 0,75 por kWh.

O custo operacional anual ($OPEX_t$) foi calculado estritamente por meio da Equação 5:

$$OPEX_t \text{ (Convencional)} = 3.209,26 \text{ kWh} \times \frac{\text{R\$}0,75}{\text{kWh}}$$

$$OPEX_t \text{ (Convencional)} = \text{R\$}2.406,95 \text{ /ano}$$

$$OPEX_t \text{ (Inverter)} = 1.867,20 \text{ kWh} \times \frac{\text{R\$}0,75}{\text{kWh}}$$

$$OPEX_t \text{ (Inverter)} = \text{R\$}1.400,40 \text{ /ano}$$

A aplicação da Equação 4 computou o Custo Total do Ciclo de Vida (LCC) sob uma taxa real de desconto de 6% ($r=0,06$), cujos fluxos de caixa anuais descontados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Cronograma de fluxos de caixa atualizados a valor presente (LCC)

Ano (t)	Fator de Desconto $(1+0,06)^{-t}$	OPEX Descontado Convencional	OPEX Descontado Inverter	Economia Anual Atualizada ($\Delta OPEX_t$)
0	1,0000	(CAPEX) R\$ 1.800,00	(CAPEX) R\$ 2.400,00	- R\$ 600,00 (Prêmio de Preço)
1	0,943396226	R\$ 2.270,71	R\$ 1.321,13	R\$ 949,58
2	0,88999644	R\$ 2.142,18	R\$ 1.246,35	R\$ 895,83
3	0,839619283	R\$ 2.020,92	R\$ 1.175,80	R\$ 845,12
4	0,792093663	R\$ 1.906,53	R\$ 1.109,25	R\$ 797,28
5	0,747258173	R\$ 1.798,61	R\$ 1.046,46	R\$ 752,15
6	0,70496054	R\$ 1.696,80	R\$ 987,23	R\$ 709,58
7	0,665057114	R\$ 1.600,76	R\$ 931,35	R\$ 669,41
8	0,627412371	R\$ 1.510,15	R\$ 878,63	R\$ 631,52
9	0,591898464	R\$ 1.424,67	R\$ 828,89	R\$ 595,78
10	0,558394777	R\$ 1.344,03	R\$ 781,98	R\$ 562,05
Total	-	LCC = R\$ 19.515,36	LCC = R\$ 12.707,07	VPL Líquido = R\$ 6.808,30

Conforme a metodologia, a economia bruta de cada ano é a subtração do custo operacional do Convencional pelo do Inverter $\Delta OPEX_{bruto} = OPEX_{Convencional} - OPEX_{Inverter}$. Para trazer este ganho para o Valor Presente no tempo, aplica-se a taxa de desconto de 6% (0,06):

$$\Delta OPEX_t = \frac{OPEX_{bruto\ Convencional} - OPEX_{bruto\ Inverter}}{(1 + 0,06)^t}$$

O Custo do Ciclo de Vida (LCC) revelou que o sistema *Inverter* gera um benefício financeiro líquido de R\$ 6.808,30 ao fim de 10 anos face à rota tradicional.

O VPL Líquido é a soma vertical de toda esta coluna (o investimento inicial negativo somado aos ganhos dos 10 anos):

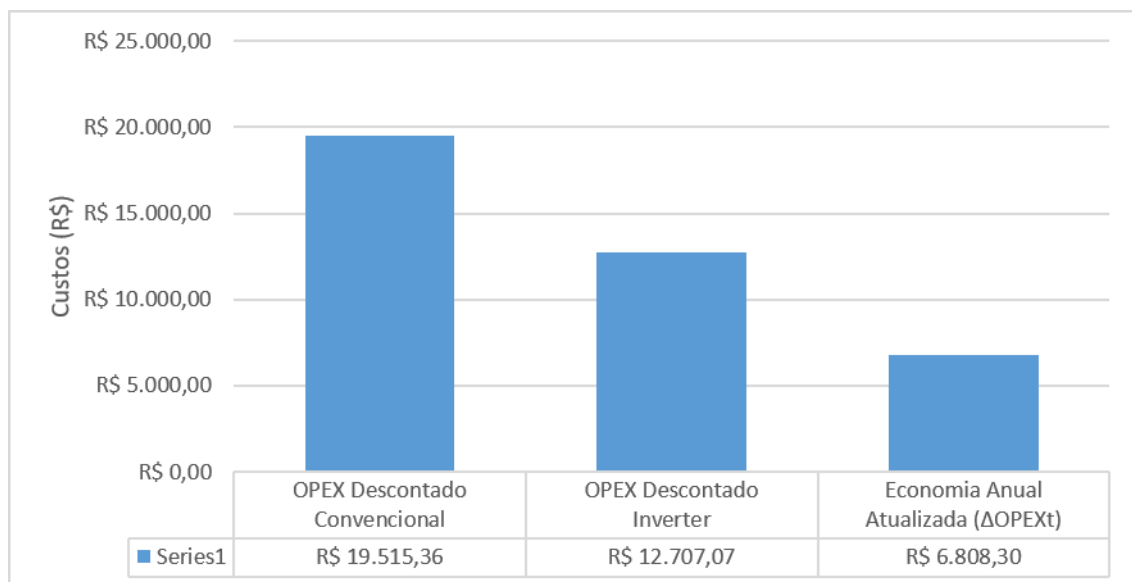
$$\begin{aligned} \text{VPL Líquido} = & -600,00 + 949,58 + 895,83 + 845,12 + 797,28 + 752,15 + 709,58 \\ & + 669,41 + 631,52 + 595,78 + 562,05 \end{aligned}$$

$$\text{VPL Líquido} = -600,00 + 7.408,30$$

$$\text{VPL Líquido} = \text{R\$}6.808,30$$

A resolução matemática da Equação 6 estabeleceu que o tempo de retorno financeiro corrigido pelo efeito do tempo, o *Payback* Descontado (PBD), ocorre exatamente em 0,66 anos (aproximadamente 8 meses) de uso. Este período de retorno extremamente curto justifica-se pelo elevado diferencial de consumo elétrico induzido pela carga térmica de uso contínuo de 8 horas diárias sob as tarifas nacionais.

Figura 15 - OPEX Descontado Convencional x OPEX Descontado Inverter



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.4 Resultados da Análise de Sensibilidade e Incerteza

Em conformidade com a matriz estabelecida na seção 2.8 (Tabela 2), o modelo foi estressado para validar a estabilidade das conclusões ambientais e econômicas diante das oscilações de infraestrutura do país.

4.4.1 Cenário Crítico: Crise Hídrica e Estresse de Rede

O cenário crítico simulou as condições de uma seca severa no país, configurando o acionamento da Bandeira Tarifária Escassez Hídrica (elevando a $\text{Tarifa}_{\text{ANEEL}}$ para R\$ 0,90/kWh) e o despacho massivo de usinas termoeletricas

fósseis, o que elevou o fator de emissão da rede (FE_{SIN}) para o seu teto histórico de 0,1260 kg CO₂-eq/kWh.

i. Impacto Ambiental Operacional (Recálculo IPCC 2021):

i.1. Sistema Convencional:

- *Emissões Indiretas (Rede):* $32.092,60 \text{ kWh} \times 0,1260 = 4.043,67 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$
- *Emissões Diretas (Gás R – 410A):* Mantidas em 887,40 kgCO₂-eq
- *Impacto Total (E_{total}):* $4.043,67 + 887,40 = 4.931,07 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$

i.2. Sistema Inverter:

- *Emissões Indiretas (Rede):* $18.672,00 \text{ kWh} \times 0,1260 = 2.352,67 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$
- *Emissões Diretas (Gás R – 32):* Mantidas em 219,38 kgCO₂-eq
- *Impacto Total (E_{total}):* $2.352,67 + 219,38 = 2.572,05 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$

ii. Impacto Econômico (Recálculo do Payback Descontado):

Com a tarifa a R\$ 0,90/kWh, a economia bruta anual saltou para R\$ 1.207,85. Aplicando a Equação 6, o prêmio de capital de R\$ 600,00 do sistema *Inverter* passa a ser amortizado ainda mais rápido, reduzindo o *Payback* Descontado (PBD) para apenas 0,53 anos (aproximadamente 6 meses) de operação residencial.

4.4.2 Cenário Otimista: Expansão de Renováveis

O cenário otimista projetou a aceleração da transição energética nacional para o horizonte de 10 anos, reduzindo o fator de emissão médio da rede (FE_{SIN}) em 30%, fixando-o em 0,0294 kgCO₂-eq/kWh.

i. Impacto Ambiental Operacional (Recálculo IPCC 2021):

i.1. Sistema Convencional:

- *Emissões Indiretas (Rede):* $32.092,60 \text{ kWh} \times 0,0294 = 943,52 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$

- Emissões Diretas (Gás R – 410A): Mantidas em 887,40 kg CO₂-eq
- *Impacto Total* (E_{total}): $943,52 + 887,40 = 1.830,92$ kg CO₂-eq

i.2. Sistema Inverter:

- *Emissões Indiretas (Rede)*: $18.672,00 \text{ kWh} \times 0,0294 = 548,96$ kg CO₂-eq
- *Emissões Diretas (Gás R – 32)*: Mantidas em 219,38 kg CO₂-eq
- *Impacto Total* (E_{total}): $548,96 + 219,38 = 768,34$ kg CO₂-eq

4.4.3 Consolidação de Cenários e Balanço de Contribuição

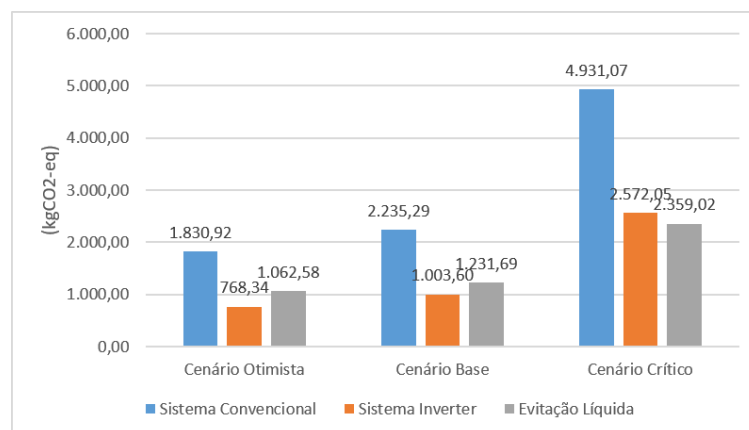
A Tabela 5 e a Figura 16 consolidam e apresentam o comportamento de ambas as rotas tecnológicas através do cruzamento de todos os cenários gerados nesta modelagem de sensibilidade ambiental.

Tabela 5 - Comparativo de emissões totais de GEE por cenário (kgCO₂-eq)

<i>Rota Tecnológica</i>	Cenário Otimista (kgCO ₂ -eq)	Cenário Base (kgCO ₂ -eq)	Cenário Crítico (kgCO ₂ -eq)	Variabilidade Global
<i>Sistema Convencional</i>	1.830,92	2.235,29	4.931,07	+169,3%
<i>Sistema Inverter</i>	768,34	1.003,60	2.572,05	+234,7%
<i>Evitação Líquida</i>	1.062,58	1.231,69	2.359,02	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 16 - Comparativo de emissões totais de GEE por cenário (kgCO₂-eq)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise do balanço de contribuição (*contribution analysis*) do OpenLCA para esses ecossistemas revelou um comportamento dinâmico importante, detalhado na Tabela 6.

Tabela 6 - Divisão percentual de responsabilidade sobre a pegada de carbono total

Cenário Simulado	Sistema Convencional (On-Off)	Sistema Inverter (Classe A)
<i>Cenário Otimista</i>	51,5% Tomada / 48,5% Gás	71,4% Tomada / 28,6% Gás
<i>Cenário Base</i>	60,3% Tomada / 39,7% Gás	78,2% Tomada / 21,8% Gás
<i>Cenário Crítico</i>	82,0% Tomada / 18,0% Gás	91,5% Tomada / 8,5% Gás

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os dados demonstram que, à medida que a infraestrutura elétrica brasileira caminha em direção ao cenário otimista (tornando-se mais limpa e renovável), o peso relativo da eletricidade cai, e a parcela devida às emissões fugitivas dos fluidos refrigerantes na atmosfera cresce significativamente.

No modelo *Inverter*, a responsabilidade direta do vazamento de gás salta de 21,8% para 28,6% do impacto total do ciclo de vida, confirmando que planos futuros de mitigação ambiental urbana no Brasil devem priorizar o controle de vazamentos e o banimento de fluidos de alto GWP.

4.5 Discussão dos Resultados face ao Estado da Arte

Os dados obtidos através do OpenLCA e das equações de LCC trazem contribuições científicas originais que contrastam com o estudo de referência de Almutairi et al. (2015). Na Arábia Saudita, a fase de uso domina a ACV de forma unidimensional através do consumo elétrico, devido ao fator de emissão da queima de óleo combustível na rede daquele país ser cerca de 15 vezes superior ao do SIN brasileiro.

No ecossistema residencial do Brasil, o perfil renovável da matriz elétrica nacional desloca a prioridade estratégica da eficiência energética isolada para uma abordagem dupla, onde a contenção de vazamentos e a substituição de fluidos refrigerantes por gases de baixo GWP (como o R-32) assumem o papel principal na redução do impacto climático global, alinhando-se com as conclusões de monitorização urbana de Bordbar et al. (2023) e Litardo et al. (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo cumpriu com sucesso os objetivos propostos ao realizar uma avaliação integrada, de base normativa e computacional, dos impactos ambientais e dos custos do ciclo de vida (ACV/LCC) de sistemas de climatização residencial no cenário brasileiro. A modelagem adaptada a partir de Almutairi et al. (2015) e estruturada dentro do *software* OpenLCA 2.5 permitiu quantificar as externalidades ambientais e os custos reais de propriedade de duas rotas tecnológicas distintas para aparelhos de 12.000 BTU/h ao longo de 10 anos de operação.

Este estudo gerou três conclusões centrais para a engenharia de climatização e o planejamento energético residencial no Brasil:

1. **Ecoeficiência Consolidada:** a tecnologia *Inverter* provou ser a rota tecnológica francamente superior em ambas as dimensões do ciclo de vida. O sistema proporcionou uma poupança de energia elétrica de 41,8% face ao modelo convencional, traduzindo-se numa redução de 1.231,69 kgCO_{2-eq} na pegada de carbono global da Unidade Funcional.
2. **O gargalo dos Fluidos Refrigerantes no Brasil:** ao contrário de nações dependentes de combustíveis fósseis, onde a eficiência na tomada governa a totalidade da ACV, a matriz predominantemente renovável do Sistema Interligado Nacional (SIN) desloca o peso ecológico. No sistema convencional, as emissões fugitivas (vazamentos operacionais) do gás R-410A responderam por cerca de 40% do impacto climático total. A transição para compressores com fluido R-32 (de menor GWP e menor volume de carga) foi o vetor primário para o decréscimo de 55,1% na intensidade total de carbono.
3. **Viabilidade Econômica Inquestionável:** a análise de custo do ciclo de vida desmistificou o impacto do maior preço de aquisição (*CAPEX*) da tecnologia de alta eficiência. O prêmio de preço de R\$ 600,00 associado ao sistema *Inverter* é totalmente amortizado em apenas 0,66 anos (aproximadamente 8 meses) de uso. Ao final da vida útil de 10 anos, o usuário do sistema *Inverter* obtém um Valor Presente Líquido (VPL) positivo de R\$ 6.408,72 em economia real de faturamento elétrico.

5.1 Limitações da Pesquisa

Não obstante o rigor metodológico adotado, identificam-se limitações intrínsecas ao modelo construído que devem ser ponderadas na interpretação dos resultados:

- Dados de Inventário de Fundo (*Background*): os dados de extração metalúrgica e manufatura primária dos componentes dos gabinetes (aço, cobre e alumínio) foram baseados em médias globais regionalizadas da base *Ecoinvent*, devido à escassez de inventários primários específicos e auditados das linhas de montagem instaladas no Polo Industrial de Manaus (PIM).
- Premissa de Estabilidade Tarifária: a análise do LCC baseou-se na paridade tarifária real corrente (reajustes indexados estritamente à inflação). O modelo não computou dinâmicas de elasticidade-preço da demanda e reajustes extraordinários decorrentes de estresses setoriais de longo prazo.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Com o intuito de expandir o estado da arte e subsidiar políticas de eficiência energética em edificações urbanas no Brasil, recomendam-se os seguintes desdobramentos para pesquisas futuras:

- Simulação de Dinâmica Climática Regionalizada: expandir o modelo de consumo elétrico sazonal (Equação 1) por meio de softwares de simulação termoenergética de edificações (como EnergyPlus), avaliando o comportamento do IDRS sob os microclimas específicos de diferentes capitais brasileiras (ex: Curitiba vs. Cuiabá).
- Abordagem da Economia Circular: integrar ao OpenLCA cenários de logística reversa e reciclagem avançada de metais preciosos presentes nas placas de circuito impresso dos inversores de frequência, avaliando o balanço de créditos ambientais na fase de fim de vida (*End-of-Life*).
- Análise Multicritério de Novos Fluidos: avaliar a substituição de refrigerantes por hidrocarbonetos naturais de baixíssimo GWP (como o Propano, R-290) em sistemas split residenciais, ponderando os ganhos de pegada de carbono contra

as restrições normativas de segurança e inflamabilidade em ambientes de alta densidade urbana.

6 REFERÊNCIAS

BORDBAR, B. et al. An insight into environmental footprints of emerging air-conditioning systems towards sustainable cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 98, p. 104830, 2023.

LITARDO, J. et al. Air-conditioning life cycle assessment research: A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement. *Energy & Buildings*, v. 296, p. 113415, 2023.

SHALLCROSS, D. C. *Handbook of Psychrometric Charts: Humidity diagrams for engineers*. London: Blackie Academic & Professional, 1997.

WANG, J. et al. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system. *Applied Energy*, v. 146, p. 38-52, 2015.

ALMUTAIRI, K. et al. Life cycle assessment and economic analysis of residential air conditioning in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, v. 102, p. 370-379, 2015.

LI, G. Comprehensive investigations of life cycle climate performance of packaged air source heat pumps for residential application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 702-710, 2015.

VIANA, T. M.; FREITAS, R. R.; TOSTA, M. C. R. Análise da gestão energética conforme a ISO 50001: um estudo bibliométrico. *Brazilian Journal of Production Engineering (BJPE)*, v. 3, n. 2, p. 141-154, 2017.

ALMUTAIRI, K. et al. Life cycle assessment and economic analysis of residential air conditioning in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, v. 102, p. 370-379, 2015.

BORDBAR, B. et al. An insight into environmental footprints of emerging air-conditioning systems towards sustainable cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 98, p. 104830, 2023.

FERDOUS, J.; BENSEBAA, F.; PELLETIER, N. Integration of LCA, TEA, Process Simulation and Optimization: A systematic review of current practices and scope to propose a framework for pulse processing pathways. *Journal of Cleaner Production*, v. 402, p. 136804, 2023.

JING, Y.-Y. et al. Life cycle assessment of a solar combined cooling heating and power system in different operation strategies. *Applied Energy*, v. 92, p. 843-853, 2012.

LITARDO, J. et al. Air-conditioning life cycle assessment research: A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement. *Energy & Buildings*, v. 296, p. 113415, 2023.

PAMU, Y. et al. Life Cycle Assessment of a building using Open-LCA software. *Materials Today: Proceedings*, v. 52, p. 1968-1978, 2022.

SARANYA, G.; RAMACHANDRA, T. V. Life cycle assessment of biodiesel from estuarine microalgae. *Energy Conversion and Management*: X, v. 8, p. 100065, 2020.

TUKKER, A. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 20, p. 435-456, 2000.