



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA DO CENTRO
TECNOLOGICO

Lucas de Souza

**A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO E A VIABILIDADE ECONÔMICA DA
SUBSTITUIÇÃO DE FLUIDOS REFRIGERANTES NOS SISTEMAS DE
CLIMATIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO EM EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE
MÉDIO PORTE**

Florianópolis
2024

Lucas de Souza

**A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO E A VIABILIDADE ECONÔMICA DA
SUBSTITUIÇÃO DE FLUIDOS REFRIGERANTES NOS SISTEMAS DE
CLIMATIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO EM EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE
MÉDIO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica com habilitação em Engenharia de Produção.
Orientadora: Caroline Rodrigues Vaz, Dra.

Florianópolis
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Souza, Lucas de

A geração de créditos de carbono e a viabilidade econômica da substituição de fluidos refrigerantes nos sistemas de climatização : estudo de caso em empreendimento hoteleiro de médio porte / Lucas de Souza ; orientadora, Caroline Rodrigues Vaz, 2024.

130 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Créditos de carbono. 3. Sustentabilidade. 4. Fluidos refrigerantes. I. Vaz, Caroline Rodrigues. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. III. Título.

Lucas de Souza

**A GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO E A VIABILIDADE ECONÔMICA DA
SUBSTITUIÇÃO DE FLUIDOS REFRIGERANTES NOS SISTEMAS DE
CLIMATIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO EM EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE
MÉDIO PORTE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico com habilitação em Engenharia de Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Produção Mecânica.

Florianópolis, 12 de Dezembro de 2024

Coordenação do Curso

Banca Examinadora

Prof.(a) Caroline Rodrigues Vaz, Dra.
Orientadora

Prof. Mônica Maria Mendes Luna, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Joel Boeng, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por iluminar e guiar os caminhos que percorri até o presente momento, estabelecendo valores e princípios que norteiam os pensamentos e as ações do homem que sou.

Agradeço à minha namorada e futura esposa, Larissa, que sempre esteve comigo nos períodos mais alegres e difíceis da minha vida, amparando-me e apoiando-me nas decisões que rumam os nossos destinos, assim como nas inúmeras horas em que precisei de alguém para apenas ouvir a externalização das minhas ideias, discussões e conclusões sobre o presente estudo, além de meus sentimentos e planos futuros para a construção da nossa família.

Agradeço à minha irmã, Juliana, que sempre foi uma grande incentivadora dos meus estudos, fomentando minha entrada no curso técnico de Refrigeração e Climatização no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), aos 14 anos, o que despertou meu interesse pela área de exatas, especialmente no curso de Engenharia de Produção Mecânica, ao qual este trabalho de conclusão de curso se refere.

Agradeço a todos os profissionais com quem tive a oportunidade de conversar e entrevistar durante a execução deste estudo, como técnicos instaladores, projetistas, engenheiros de diversas áreas, como climatização, produção e construção civil, além de empresas especializadas em geração de crédito de carbono, equipamentos de climatização e eficiência energética. A participação de cada um foi de suma importância para a construção de um estudo sólido que pudesse responder às dúvidas de todos os interessados ou envolvidos no objeto de estudo.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal de Santa Catarina que tive a oportunidade de conhecer e com quem aprendi conteúdos valiosos para a vida pessoal, profissional e acadêmica.

Estendo os agradecimentos àqueles que não acreditaram que este estudo pudesse ser desenvolvido, pois essa descrença serviu de incentivo para que eu focasse e me dedicasse a explorar uma nova concepção de tema no meio acadêmico e profissional, contribuindo para a aceleração da transição sustentável e necessária para os tempos atuais.

Por fim, agradeço à minha professora e orientadora, Caroline Rodrigues Vaz, por todas as horas de dedicação ao esclarecer minhas dúvidas e inquietações referentes à produção deste trabalho de conclusão de curso, ajudando a concatenar pensamentos e descrições técnicas em uma sequência lógica e clara dos assuntos abordados.

"Quando tudo parece estar indo contra você, lembre-se que o avião decola contra o vento, não a favor dele"
(Henry Ford)

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade da geração de créditos de carbono em empreendimentos hoteleiros de médio porte, por meio da substituição de fluidos refrigerantes com alto Potencial de Aquecimento Global (GWP) por alternativas mais sustentáveis. O estudo se baseia em uma revisão bibliográfica extensa, que explora os aspectos técnicos, econômicos e ambientais relacionados à substituição de fluidos refrigerantes em um estudo de caso aplicado à um empreendimento hoteleiro de médio porte. A metodologia empregada consistiu na coleta de dados sobre os sistemas de climatização existentes no empreendimento, na análise do potencial de redução de emissões de CO₂ com a substituição do fluido refrigerante e na avaliação da viabilidade econômica da geração de créditos de carbono. Foram considerados os custos de implementação, como a aquisição de novos equipamentos, instalação e manutenção, além das receitas provenientes da comercialização dos créditos de carbono. Os resultados indicam que a transição para o R-32 pode gerar uma quantidade significativa de créditos de carbono, o que se traduz em receita adicional para o empreendimento. O estudo demonstra que o investimento na substituição dos equipamentos e na implementação do projeto de geração de créditos de carbono pode ser recuperado em um tempo relativamente curto, tornando a proposta economicamente viável e atrativa para investidores. O estudo destaca ainda que a adoção de práticas sustentáveis no setor hoteleiro, como a substituição de fluidos refrigerantes, pode agregar valor à marca do empreendimento e fortalecer a imagem corporativa. A crescente demanda por serviços e produtos ecologicamente corretos tem impulsionado o mercado de créditos de carbono, criando novas oportunidades de negócios para empresas que investem em sustentabilidade. O estudo conclui que a geração de créditos de carbono através da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte é uma estratégia viável e vantajosa, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. A pesquisa contribui para o desenvolvimento de práticas inovadoras e sustentáveis no setor hoteleiro, e para a disseminação do conhecimento sobre os benefícios da geração de créditos de carbono. Além disso, o estudo oferece um modelo de análise que pode ser replicado para outros empreendimentos, incentivando a implementação de práticas de que correlacionam eficiência energética e sustentabilidade ambiental. A pesquisa destaca a importância da colaboração entre diferentes setores da sociedade na busca por soluções para os desafios ambientais, e o papel fundamental do conhecimento científico e tecnológico na construção de um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: Créditos de carbono; Fluidos refrigerantes; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study aims to analyze the feasibility of generating carbon credits in medium-sized hotel projects by replacing refrigerants with high Global Warming Potential (GWP) with more sustainable alternatives. The study is based on an extensive literature review that explores the technical, economic and environmental aspects related to the replacement of refrigerant fluids in a case study applied to a medium-sized hotel enterprise. The methodology employed consisted of collecting data on the existing air conditioning systems in the enterprise, analyzing the potential for reducing CO₂ emissions by replacing the refrigerant fluid, and assessing the economic viability of generating carbon credits. Implementation costs, such as the acquisition of new equipment, installation and maintenance, were considered, in addition to revenues from the sale of carbon credits. The results indicate that the transition to R-32 can generate a significant amount of carbon credits, which translates into additional revenue for the enterprise. The study demonstrates that the investment in replacing equipment and implementing the carbon credit generation project can be recovered in a relatively short time, making the proposal economically viable and attractive to investors. The study also highlights that the adoption of sustainable practices in the hotel sector, such as the replacement of refrigerant fluids, can add value to the enterprise's brand and strengthen its corporate image. The growing demand for environmentally friendly services and products has driven the carbon credit market, creating new business opportunities for companies that invest in sustainability. The study concludes that generating carbon credits through the replacement of refrigerants in medium-sized hotel ventures is a viable and advantageous strategy, both from an environmental and economic perspective. The research contributes to the development of innovative and sustainable practices in the hotel sector, and to the dissemination of knowledge about the benefits of generating carbon credits. In addition, the study offers an analysis model that can be replicated for other ventures, encouraging the implementation of practices that correlate energy efficiency and environmental sustainability. The research highlights the importance of collaboration between different sectors of society in the search for solutions to environmental challenges, and the fundamental role of scientific and technological knowledge in building a more sustainable future.

Keywords: Carbon credits; Refrigerants; Sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Cronograma de redução da produção e consumo dos HFCs aprovado pela Emenda de Kigali	28
Tabela 3 – Características de Operação de Fluidos Refrigerantes	38
Tabela 4 – Dados de Fluidos Refrigerantes	39
Tabela 6 – Descrição dos ambientes do empreendimento Hoteleiro	78
Tabela 7 – Caracterização dos equipamentos com fluido R-410A	87
Tabela 8 – Caracterização dos equipamentos com fluido R-32	88
Tabela 9 – Previsão de instalação para o sistema de climatização	90
Tabela 10 – Dados da instalação dos equipamentos de R-410A	92
Tabela 11 – Dados padronizados para os equipamentos de R-410A	93
Tabela 12 – Dados padronizados para os equipamentos de R-32	93
Tabela 13 – Dados da instalação dos equipamentos de R-32	95
Tabela 14 – Comparação de indicadores para os fluidos R-410A e R-32	96
Tabela 15 – Geração de créditos de carbono da instalação	97
Tabela 16 – Geração de créditos de carbono por manutenções ao longo de 20 anos	98
Tabela 17 – Receita e custos envolvidos no processo de geração de créditos de carbono futuro	102
Tabela 18 – Valor dos fluidos refrigerantes R-22 e R-410 entre 2017 e 2024	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building Information Modeling
CAA	Custo de aquisição por ambiente
CACA	Custo da quilograma do fluido refrigerante à preço de mercado
CACAi	Custo de aquisição de carga adicional da instalação
CAE	Custos de aquisição dos equipamentos
CAF	Carga adicional de fluido
CATA	Carga adicionada total de fluido refrigerante do ambiente
CATE	Custo de aquisição total do empreendimento
CAU	Carga adicionada de fluido refrigerante unitária
CEL	Comprimento externo à linha de espera
CET	Comprimento excedido de tubulação
CFCs	Clorofluorcarbonetos
CH ₂ F ₂	Difluorometano
CH ₄	Metano
CIE	Custos de instalação dos equipamentos
CL	Comprimento linear de tubulação frigorígena
CLC	Comprimento linear das curvas
CME	Custos de manutenção dos equipamentos
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Coeficiente de Performance
COr	Correção por reciclagem
COv	Correção por vazamento
CPF	Carga padrão de fluido refrigerante
CPL	Comprimento padrão de linha frigorígena
CPTA	Carga padrão total do ambiente
CPTE	Carga padrão total do empreendimento
CT	Carga Térmica
CTAE	Carga total adicionada no empreendimento
CTFE	Carga total de fluido do empreendimento
CTo	Custo Total
CTT	Comprimento total de tubulação

DA	Descrição dos ambientes
EIA	Environmental Investigation Agency
ETS	Sistemas de comércio de emissões
EU ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential
HCFCs	Hidroclorofluorcarbonetos
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
IDRS	Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	International Organization for Standardization
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N2O	Óxido Nitroso
NAEI	National Atmospheric Emissions Inventory
NBR	Norma Brasileira
NC	Número de curvas que existe na tubulação frigorígena
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NE	Número de equipamentos no ambiente
O3	Ozônio
ODP	Ozone Depletion Potential
ONU	Organização das Nações Unidas
P+L	Produção mais Limpa
P.I.D.	Proporcional-Integral-Derivativa
PDD	Project Design Document
PL	Projeto de Lei
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
POE	óleos polioléster
R-125	pentafluoroetano
R-22	freon
R-32	difluorometano
RA	Andares que o equipamento se repete
RAC	Refrigeração e Ar Condicionado
RC	Receita da geração de créditos de carbono
RCr	Receita de recarga
REVIT	Revit Technology Corporation
ROI	Análise de retorno sobre o investimento
tCO2D	Tonelada de dióxido de carbono não emitidas pela instalação

tCO2E	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
tCO2v	Tonelada de dióxido de carbono não vazadas em 20 anos
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
UV	Radiação Ultravioleta
VAU	Valor de aquisição unitário
VC	Preço dos créditos de carbono no mercado
VRF	Variable Refrigerant Flow

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	AQUECIMENTO GLOBAL E SEUS IMPACTOS	22
2.1.1	Sistema de climatização	32
2.1.1.1	R-410A	33
2.1.1.2	R-32	35
2.1.1.3	Comparativo dos fluidos R-410A e R-32	36
2.2	GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO	40
2.3	EMPREENDIMENTOS HOTELEIROS DE MÉDIO PORTE	48
3	METODOLOGIA	53
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	53
3.2	COLETA DE DADOS	54
3.3	OBJETO DE ESTUDO DE CASO	57
3.4	LEVANTAMENTO DOS DADOS DO EMPREENDIMENTO	58
3.5	PADRONIZAÇÃO DOS DADOS DO EMPREENDIMENTO	59
3.6	VOLUME DE GÁS E POTENCIAL DE CO ₂ DO EMPREENDIMENTO	60
3.7	POTENCIAL DE CO ₂ DO FLUIDO DE ESTUDO	62
3.8	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	64
3.8.1	Custos da implementação	64
3.8.2	Receitas provenientes da geração de créditos de carbono	65
3.8.3	Análise de retorno sobre o investimento (ROI)	67
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	71
4.1	ANÁLISE DAS PERCEPÇÕES EM EMPREENDIMENTOS HOTELEIROS DE MÉDIO PORTE	71
4.2	ANÁLISE DO EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE MÉDIO PORTE	74
4.3	ANÁLISE DOS EQUIPAMENTOS E COMPONENTES DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE MÉDIO PORTE	76
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	82
4.5	VOLUME DE GÁS E POTENCIAL DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) DO EMPREENDIMENTO	89

4.6	PREÇOS DE CO2 PRATICADOS NO MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL)	99
4.7	ANÁLISE DAS RECEITAS E CUSTOS PARA VIABILIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO PARA O EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE MÉDIO PORTE	101
4.8	RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO (ROI)	106
4.9	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	107
4.9.1	Variação do valor do crédito de carbono	107
4.9.2	Variação da taxa de vazamento	108
4.9.3	Variação do custo do fluido em decorrência da transição de tecnologia	109
4.9.4	Variação da diluição do PDD em mais de um empreendimento	111
5	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS	116

1 INTRODUÇÃO

A globalização e o surgimento de novas tecnologias trouxeram consigo inúmeras vantagens e oportunidades para o desenvolvimento socioeconômico em todo o mundo, como o aumento da produtividade, a redução de custos operacionais, a melhoria da imagem pública e a criação de novas fontes de receita. Entretanto, esse avanço acarretou em inúmeros desafios ambientais, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa ou o uso contínuo de fluidos refrigerantes de alto impacto como o R410A, sendo tais impactos significativos no padrão de consumo, nas mudanças climáticas e na qualidade do ar que os seres humanos respiram.

Desta forma, com o aumento da atividade industrial e com o crescimento desenfreado das sociedades urbanas, a curva de acúmulo de gases de efeito estufa cresceu exponencialmente. O aumento de temperatura está relacionado, de acordo com o Relatório de Síntese do IPCC (2019) *Intergovernmental Panel on Climate Change*, “atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e pelas mudanças no uso da terra, resultando em níveis sem precedentes de gases de efeito estufa na atmosfera”.

Entretanto, Newell (2013) afirma que “Esse fenômeno resulta não apenas da queima de combustíveis fósseis, mas também das práticas insustentáveis de produção e consumo que caracterizam a economia globalizada”.

A mudança climática, não só é proveniente do consumo de combustíveis fósseis, como também das práticas de utilização e descarte dos materiais usados no dia a dia das pessoas e da indústria, intensificando o efeito estufa, que contribui para o aquecimento global e coloca em risco a estabilidade de ecossistemas globais.

Diante deste cenário preocupante, surge a necessidade de encontrar um equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico e a preservação ambiental. Nesse contexto, de acordo com Arora (2012), os sistemas de refrigeração são críticos não apenas para o conforto humano, mas também para a preservação de alimentos, medicamentos e outros bens essenciais. No entanto, o impacto ambiental desses sistemas deve ser cuidadosamente gerido para minimizar as contribuições ao aquecimento global. Sendo o setor de refrigeração e climatização, uma variável indispensável para intervenção, visando mitigar os impactos ambientais de sua ampla utilização residencial/comercial.

Um sistema de refrigeração e climatização pode ser descrito como o conjunto de componentes que operam segundo um ciclo, que são projetados para regular a temperatura, umidade e qualidade do ar em ambientes internos, garantindo conforto térmico e condições ideais para a ocupação humana, armazenamento de alimentos ou operação de equipamentos.

O ciclo de refrigeração transfere energia de um ambiente quente para outro frio, ou vice e versa, onde segundo Geniêr, Costa e Junior (2013) "como o saldo de

variação de energia é positivo, significa que a energia adentra no sistema, portanto, em um ciclo de refrigeração se faz necessária uma fonte de energia externa", ou seja, esses sistemas funcionam por meio de ciclos de compressão e expansão de fluidos refrigerantes, que absorvem calor de um ambiente e o liberam em outro onde o fluido refrigerante é a substância que circula dentro do sistema de refrigeração, responsável por absorver e liberar calor durante os ciclos de compressão e expansão.

Ao longo da história, o setor de refrigeração e climatização vem se desenvolvendo e se adaptando às necessidades globais, considerando o surgimento de equipamentos e fluidos sintéticos cada vez mais eficientes, como o R-32, e fluidos com menor impacto na camada de ozônio, como o R-410A. Porém, o amplo e indiscriminado uso desses fluidos refrigerantes, apesar de elevadas propriedades térmicas, tem aumentado cada vez mais as mudanças climáticas, em razão dos seu alto Global Warming Potential (GWP), aspecto significativo para o aumento das temperaturas da atmosfera e esgotamento da camada de ozônio, onde os Hidrofluorcarbonetos (HFCs) foram desenvolvidos como substitutos para os Clorofluorcarbonetos (CFCs) e os hidroclorofluorcarbonos Hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) com o objetivo de reduzir o impacto sobre a camada de ozônio. No entanto, esses compostos possuem altos GWPs, o que significa que eles podem aquecer a Terra muito mais do que o dióxido de carbono em uma base de massa igual.

Para solucionar esse problema, a indústria de refrigeração tem buscado desenvolver novas tecnologias e alternativas sustentáveis e eficientes em termos de troca de energia, sendo essa alternativa representada pelo fluido R-32, que tem ganhado destaque nos últimos anos como uma opção com maior índice de auto sustentabilidade, potencial de aquecimento significativamente menor que os antigos fluidos R-22 e R-410A.

Além da substituição de fluidos refrigerantes, o desenvolvimento tecnológico no setor de refrigeração traz sistemas cada vez mais eficientes, com compressores de velocidade variável e sistemas de recuperação de calor, contribuindo significativamente para o consumo de energia elétrica onde, conseqüentemente, reduz a emissão de carbono, principalmente em regiões onde a energia elétrica é provida através de sistemas que usam material fóssil para as usinas termoelétricas.

A implementação dessas tecnologias sustentáveis enfrenta desafios significativos, onde os principais obstáculos para a adoção de tecnologias de eficiência energética na indústria incluem altos custos iniciais e uma falta de conscientização e compreensão das opções disponíveis. Onde UNIDO (2011) retrata que, superar essas barreiras exige esforços para aumentar a capacidade e promover a cultura de eficiência energética em todos os níveis organizacionais. Além disso, a Organização das Nações Unidas (ONU) enfatiza que a conscientização e a educação são fundamentais para promover a responsabilidade ambiental, influenciando positivamente atitudes e

comportamentos, criando uma sociedade mais sustentável. Essa mudança de padrão, aliada à implementação de políticas públicas eficazes, é ponto chave para enfrentar os desafios ambientais atuais.

A fim de acelerar o processo de transição de tecnologia diante do rápido nível de mudanças climáticas, normas e leis vêm surgindo em todo o mundo, visando regulamentar o uso de novos fluidos mais sustentáveis em máquinas e equipamentos. Essas regulamentações, que incluem legislações internacionais como o Protocolo de Kyoto, Acordo de Paris e o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), bem como leis como a nº 12.187/2009, a Resolução nº 460/2023 ou o Projeto de Lei (PL)412/2022, visam não só reduzir as emissões de gases que aceleram as mudanças climáticas e promovem o efeito estufa, mas também incentivar a adoção de práticas mais sustentáveis, como o uso de fluidos refrigerantes de baixo GWP, e a implementação de equipamentos com menor consumo de energia.

Nesse contexto, a geração de créditos de carbono surge como uma estratégia promissora para incentivar a transição para práticas mais sustentáveis na refrigeração comercial e residencial. Segundo Brohé *et al.* (2012), a adoção de tecnologias de baixo GWP e a implementação de equipamentos energeticamente eficientes têm o potencial não apenas de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa de alto impacto, mas também de proporcionar benefícios tangíveis, como economia de custos e uma imagem corporativa melhorada, que pode ser complementada por Caboclo (2024) onde afirma que "melhorias na eficiência energética nos setores de construção, indústria e transporte não apenas têm o potencial de diminuir significativamente as emissões globais, mas também de melhorar a economia, reduzir os custos de energia para consumidores e empresas, e aumentar a segurança energética", assim como a entrada ao mercado de créditos de carbono. A geração de crédito de carbono através de práticas sustentáveis é apenas uma das inúmeras oportunidades disponíveis para aqueles que estão dispostos a adotar e incentivar o desenvolvimento sustentável.

O presente trabalho de conclusão de curso, tem como objetivo analisar a viabilidade e os benefícios da geração de créditos de carbono decorrente utilização de fluidos refrigerantes sustentáveis em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Por meio de uma análise detalhada das tecnologias disponíveis, dos desafios enfrentados e dos impactos financeiros e ambientais da implementação dessas práticas, busca-se fornecer informações relevantes para os tomadores de decisão e profissionais envolvidos na gestão e implementação de sistemas de refrigeração.

A partir disso, a seguinte questão é levantada: qual é a viabilidade prática da substituição de fluidos refrigerantes por alternativas sustentáveis, tanto em termos de geração de créditos de carbono, quanto de benefícios econômicos e ambientais para empreendimentos hoteleiros de médio porte? Além disso, de que maneira esses avanços podem servir como modelo para integrar a gestão ambiental às práticas

empresariais e incentivar o uso de soluções sustentáveis no setor?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é analisar a viabilidade econômica e ambiental da substituição de fluidos refrigerantes com alto potencial de aquecimento global por opções mais sustentáveis, visando a geração de créditos de carbono em empreendimentos hoteleiros de médio porte.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Objetivo 1: Identificar os fluidos refrigerantes mais utilizados nos sistemas de climatização de empreendimentos hoteleiros de médio porte e seus impactos ambientais;
- b) Objetivo 2: Avaliar os impactos ambientais da substituição dos fluidos R-410A por R-32 nesses sistemas, com base em seu potencial de aquecimento global;
- c) Objetivo 3: Quantificar o potencial de geração de créditos de carbono com a substituição dos fluidos refrigerantes;
- d) Objetivo 4: Analisar o retorno sobre o investimento (ROI) e os custos associados à implementação de fluidos refrigerantes sustentáveis, considerando a receita proveniente da venda de créditos de carbono; e
- e) Objetivo 5: Realizar uma análise de sensibilidade para identificar os riscos e variáveis que afetam a lucratividade do projeto, como a flutuação no valor dos créditos de carbono e a taxa de vazamento dos fluidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A expansão contínua do setor de construção civil no Brasil tem gerado um impacto ambiental significativo, principalmente devido ao aumento do número de equipamentos de climatização instalados em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Esses equipamentos utilizam fluidos refrigerantes que, em sua maioria, possuem alto potencial de aquecimento global. A emissão desses gases contribui significativamente para o agravamento das mudanças climáticas, considerado como um dos maiores desafios ambientais da atualidade.

No contexto brasileiro, a adoção de créditos de carbono pode ser uma ferramenta eficaz para viabilizar a transição dos fluidos refrigerantes tradicionais para alternativas mais sustentáveis e com menor GWP.

Este estudo se faz importante pois aborda a viabilidade econômica da geração de créditos de carbono a partir da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte. A análise percorre diversos campos como os impactos ambientais causados pelo fluido mais utilizado (R410-A) em relação ao número de equipamentos por alternativas mais sustentáveis que podem reduzir significativamente essas emissões, contribuindo para a redução das mudanças climáticas, as dificuldades e restrições encontradas nesse processo, incluindo aspectos técnicos, econômicos e regulatórios e políticas públicas necessárias para apoiar a transição dos fluidos refrigerantes.

A transição para fluidos refrigerantes com menor impacto ambiental é uma tendência necessária para a sustentabilidade do setor, logo, o trabalho explora como os créditos de carbono podem ser um incentivo financeiro para essa mudança, tornando tecnologias sustentáveis mais acessíveis e economicamente viáveis. Logo, o presente estudo analisa a viabilidade econômica da transição, aspecto indispensável para entender se os preços praticados no mercado de créditos de carbono são suficientes para compensar os custos adicionais de adoção de novos fluidos refrigerantes.

Esta análise fornece uma base para decisões informadas de empreendedores e investidores no setor de construção, preenchendo uma lacuna na literatura existente sobre a aplicação de créditos de carbono no contexto específico dos fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte, oferecendo novas perspectivas e dados empíricos que podem servir de referência para futuras pesquisas e projetos.

Em suma, a pesquisa proposta contribui tanto para a sustentabilidade ambiental, quanto para o avanço do conhecimento científico no campo da construção civil, mecânica e das mudanças climáticas. Ao explorar a geração de créditos de carbono como um mecanismo para promover a substituição de fluidos refrigerantes, o estudo contribuirá para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e para a transição para um futuro mais sustentável.

Como profissional na área de refrigeração e climatização, o autor deste estudo reconhece a necessidade urgente de adotar práticas que contribuam para a mitigação do aquecimento global, especialmente considerando o impacto significativo que os equipamentos do setor exercem sobre o meio ambiente. A substituição de fluidos refrigerantes de alto potencial de aquecimento global por alternativas mais sustentáveis não apenas atende às exigências regulatórias e ambientais, mas também se apresenta como uma oportunidade de negócio lucrativa por meio da geração de créditos de carbono. Essa abordagem sustentável e economicamente vantajosa, oferece o incentivo necessário para que empresas adotem práticas mais ecológicas, facilitando

uma transição alinhada com os objetivos globais de redução de emissões e, ao mesmo tempo, promovendo um crescimento econômico sustentável. O autor acredita que o desenvolvimento de políticas e incentivos financeiros, como os créditos de carbono, são fundamentais para fomentar essa mudança no setor, impulsionando não apenas a inovação tecnológica, mas também o comprometimento das empresas com um futuro mais verde.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo visa focar em aspectos essenciais para a análise da viabilidade da geração de créditos de carbono por meio da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Logo, a delimitação a seguir se faz necessária para definir o envelope de análise e controle, podendo estabelecer relações precisas sobre as atuais práticas de mercado, tecnologias e parâmetros de cálculo.

Primeiramente, não será realizada uma avaliação detalhada dos mecanismos de precificação de créditos de carbono. Embora o preço dos créditos seja importante para determinar a viabilidade financeira, o estudo se concentra nos aspectos técnicos e ambientais, e não na análise profunda das flutuações de mercado ou dos diferentes sistemas de comércio de emissões, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou o mercado voluntário.

Cabe salientar que o estudo não inclui a criação e o desenvolvimento de um Project Design Document (PDD), sendo em uma primeira etapa descartado o seu custo de implementação em vistas da proposta do presente estudo para o aumento da geração da receita do mesmo e, em uma segunda etapa feita a sua inclusão para a análise de sensibilidade, com a criação de um PDD apenas com a geração de receita através de fluidos refrigerantes. Embora este seja um documento fundamental para a validação de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, o foco está na análise técnica, de viabilidade econômica e impacto ambiental, isso porque a produção de um PDD, possui um nível de detalhes elevado para ser discutido neste trabalho.

Outra exclusão relevante é a avaliação da entalpia e da eficiência energética dos sistemas de climatização que, embora a substituição de fluidos refrigerantes possa melhorar a eficiência energética, o presente estudo não aprofundará a análise termodinâmica dos sistemas. Em contrapartida, o Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS) será apresentado para comparar as eficiências de equipamentos presente no mercado.

A avaliação da tendência futura de uso de novos fluidos refrigerantes também não será tratada no estudo, descartando a execução de previsões sobre o futuro do mercado de fluidos refrigerantes ou os avanços tecnológicos na área, limitando-se à

análise dos impactos da substituição no cenário atual.

A pesquisa não avaliará experimentalmente a taxa de vazamento dos fluidos refrigerantes, apesar de ser um fator relevante para a eficiência dos sistemas e para as emissões de gases de efeito estufa, essa análise específica não será contabilizada, já que o foco está no cálculo direto das emissões evitadas pela simples substituição dos fluidos, para tal variável, será utilizado um valor padrão para vazamentos em sistemas de pequeno porte do tipo split Hi-Wall especificado pela American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Outro ponto não incluído será a avaliação dos riscos financeiros pertinentes ao investimento na viabilização dos créditos de carbono, limitando os riscos a uma análise de sensibilidade que possa influenciar o retorno sobre o investimento, com a variação do preço do crédito de carbono, da taxa de vazamento, do custo de aquisição de fluido refrigerante e da diluição do custo do PDD em parâmetros especificados na seção de sensibilidade.

Por fim, não será considerado o diâmetro da tubulação dos equipamentos para o cálculo de volume de massa de fluido refrigerante. O estudo assume o comprimento de tubulação como um parâmetro para definição e cálculos de volume de fluido, conforme orientado pelo manual dos fabricantes.

Essas delimitações permitem que o estudo foque exclusivamente na análise da viabilidade econômica e ambiental da substituição de fluidos refrigerantes, sem expandir para questões de caráter técnico específico ou detalhamentos excessivos de mercado e regulamentação. Dessa forma, o trabalho se mantém concentrado nos aspectos mais diretamente relacionados à geração de créditos de carbono.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A estrutura deste estudo foi elaborada em 5 capítulos a fim de evidenciar uma análise abrangente sobre a viabilidade econômica e ambiental da geração de créditos de carbono por meio da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte.

O capítulo 1 introduz o tema, realizando uma contextualização sobre o aumento das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em virtude do uso de fluidos refrigerantes com alto potencial de aquecimento global. A relevância do tema destaca-se no contexto das mudanças climáticas e da necessidade de iniciativas para a mitigação desses impactos para o setor hoteleiro. Serão apresentados os objetivos gerais e específicos da pesquisa, com ênfase na análise da viabilidade econômica e ambiental da substituição dos fluidos refrigerantes, além das delimitações e um resumo da estrutura do artigo.

O capítulo 2, aborda o referencial teórico, desenvolvido com o intuito de fornecer a base conceitual para a pesquisa, discutindo o conceito de aquecimento global e as

emissões de gases de efeito estufa, com foco nos fluidos refrigerantes e seu destaque no agravamento desse fenômeno. Serão abordados os principais fluidos refrigerantes para a aplicação residencial e hoteleira, como o R-410A e o R-32, detalhando suas características e impactos ambientais, especialmente no que se refere ao potencial de aquecimento global. A seção ainda abordará o conceito de geração de créditos de carbono, suas regulamentações e importância no contexto de projetos sustentáveis, explorado o uso de sistemas de climatização em empreendimentos hoteleiros e seu impacto ambiental, dado o uso intensivo de fluidos refrigerantes.

O capítulo 3 compreende a metodologia, que descreverá os métodos utilizados na pesquisa, apresentando sua classificação, destacando sua natureza exploratória e quantitativa, bem como o enfoque adotado para a coleta e análise dos dados. Os dados, por sua vez, serão provenientes de um sistema de climatização de empreendimento hoteleiro, fornecido por uma empresa parceira, onde serão considerados os fluidos refrigerantes utilizados e o potencial de emissão de CO₂. No capítulo, serão detalhadas as fórmulas e processos empregados para o cálculo do volume de gás e do potencial de CO₂ evitado com a substituição dos fluidos, além da metodologia para a análise de viabilidade econômica, que incluirá os custos de implementação e a receita estimada com a venda dos créditos de carbono. Por conseguinte, se demonstrará as delimitações do estudo, destacando os aspectos que não serão abordados, como a precificação detalhada dos créditos de carbono e o desenvolvimento de um Project Design Document.

O capítulo 4 apresentará os resultados e discussões das principais descobertas da pesquisa. Será feita uma análise dos impactos ambientais da substituição dos fluidos refrigerantes, comparando o R-410A com o difluorometano (R-32) em termos de emissões de Dióxido de carbono (CO₂), seguida de uma estimativa dos créditos de carbono gerados com a troca dos fluidos, quantificando as toneladas de CO₂ evitadas e convertendo-as em créditos de carbono. A análise econômica focará nos custos de implementação e no retorno financeiro obtido pela venda desses créditos, detalhando os custos e os benefícios para os empreendimentos hoteleiros de médio porte.

O capítulo 5, sendo a conclusão, relatadas as principais descobertas do estudo, ressaltando a viabilidade econômica e ambiental da substituição de fluidos refrigerantes. Serão destacadas as contribuições da pesquisa tanto para a indústria de climatização quanto para o campo da geração de créditos de carbono. Fechando o capítulo, serão oferecidas recomendações para futuros estudos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo permite ao leitor compreender o contexto deste trabalho de conclusão de curso e esclarecer as questões centrais que compõem o objeto de estudo. Para atingir esse objetivo, foi avaliado o contexto geral, incluindo a geração de crédito de carbono, as características dos fluidos refrigerantes e o nicho de mercado ao qual será aplicado o estudo. Este conjunto de informações ajudará a fundamentar a análise e as conclusões apresentadas ao longo do trabalho, fornecendo uma compreensão abrangente dos temas centrais e de como eles se relacionam uns com os outros.

2.1 AQUECIMENTO GLOBAL E SEUS IMPACTOS

A compreensão sobre a aceleração do aquecimento global é complexa, mas de acordo com Change (2018), a definição pode ser traduzida como "um aumento nas temperaturas médias globais da superfície do ar e da superfície do mar, calculadas em uma média de 30 anos [...] em relação ao período de 1850–1900", sendo necessário examinar os mais diversos os processos que contribuem para esse fenômeno e suas interações com o meio ambiente. Um ponto de partida é o entendimento da destruição da camada de ozônio e o conseqüente aumento gradual das temperaturas globais.

A camada de ozônio é uma região da atmosfera terrestre localizada na estratosfera, entre aproximadamente 15 e 35 quilômetros acima da superfície, que contém uma alta concentração de Ozônio (O₃). Levine (1991) retrata que essa camada atua na proteção da vida na Terra, pois absorve a maior parte da Radiação Ultravioleta (UV) nociva emitida pelo sol. Sem essa proteção natural, a UV poderia causar sérios danos aos seres vivos, incluindo câncer de pele em humanos, danos aos olhos e enfraquecimento do sistema imunológico, além de ecossistemas marinhos e terrestres.

No entanto, Satyanarayana (2011) ressalta que "as emissões de CFCs, halons, tetracloroeto de carbono, metilclorofórmio, brometo de metilo e outras substâncias produzidas pelo homem são responsáveis pela destruição da camada de ozônio". Os CFCs, frequentemente utilizados em produtos de refrigeração, aerossóis e sistemas de ar condicionado, são particularmente prejudiciais, pois liberam cloro quando atingem altitudes elevadas, que então reage com as moléculas de ozônio, quebrando-as.

A CETESB (2004) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo explica que um simples átomo de cloro pode destruir cerca de um milhão de moléculas de ozônio, levando ainda em consideração o fato de que os CFCs permanecem na troposfera por aproximadamente 100 anos.

A destruição da camada de ozônio é resultado de um aumento de raios ultravioleta nocivos que penetram na atmosfera terrestre, agravando os efeitos do aquecimento global e contribuindo para mudanças climáticas significativas, conforme relatado por Ogundele, Omotayo e Taiwo (2010) "Após a quebra das moléculas de ozônio, é criado

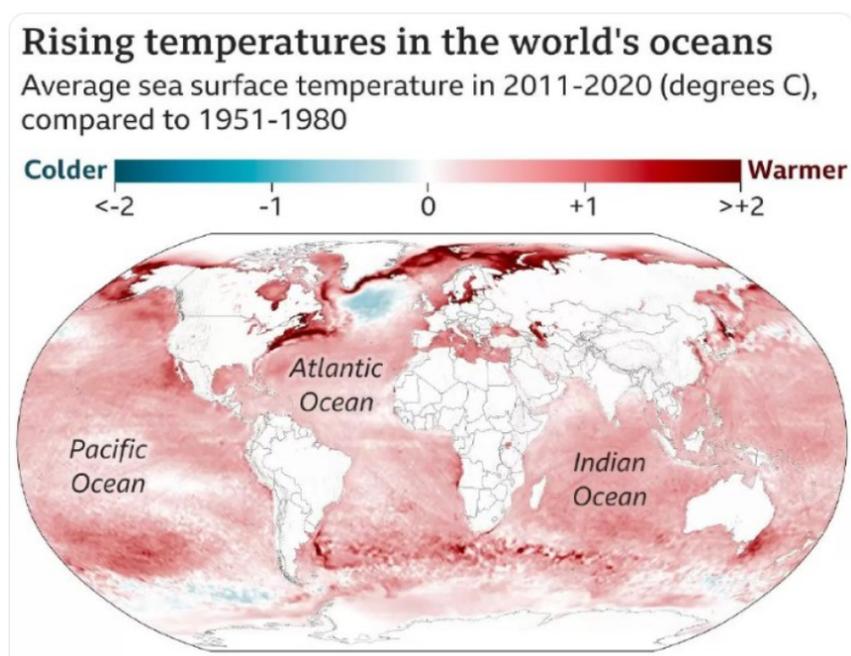
um espaço dentro da camada de ozônio onde os raios UV do sol penetram no planeta Terra. Esse espaço é geralmente chamado de “O BURACO DE OZÔNIO”. Os fatos iniciais sobre o aquecimento global apontam para o fato de que o calor proveniente dos raios ultravioletas do sol devido a esse buraco de ozônio é um dos principais contribuintes para os regimes de alta temperatura no planeta Terra. Sendo um processo acelerado pela presença de gases de efeito estufa, como CO₂, Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O), que retêm o calor na atmosfera, aumentando as temperaturas médias globais ao longo do tempo.

O aumento das temperaturas tem vários efeitos sobre vários aspectos da vida humana e do meio ambiente, afetando ecossistemas, recursos hídricos, padrões climáticos e a biodiversidade. Zhao *et al.* (2017) destaca que um aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, furacões e inundações têm consequências diretas na sociedade, desde perdas econômicas até ameaças à segurança alimentar e à saúde pública.

Além disso, o aumento das temperaturas pode desencadear reações climáticas, como o derretimento do gelo polar e a liberação de grandes reservatórios de gases de efeito estufa, como metano, armazenados no permafrost (regiões congeladas a muitos anos na região do Ártico). Esses acontecimentos podem desencadear um ciclo de retroalimentação positiva, exacerbando ainda mais o aquecimento global através da elevação de cada fração de grau Celsius em quaisquer regiões do globo.

A reportagem de BBC (2023) junto com a oceanógrafa Karina do grupo de pesquisa francês *Mercator Ocean International* destaca que “a temperatura média da superfície dos mares do mundo aumentou cerca de 0,9°C em relação com a era da pré-industrialização, onde 0,6°C aumentaram apenas nos últimos 40 anos”. A figura 1 ilustra as regiões mais afetadas dos oceanos em todo o globo.

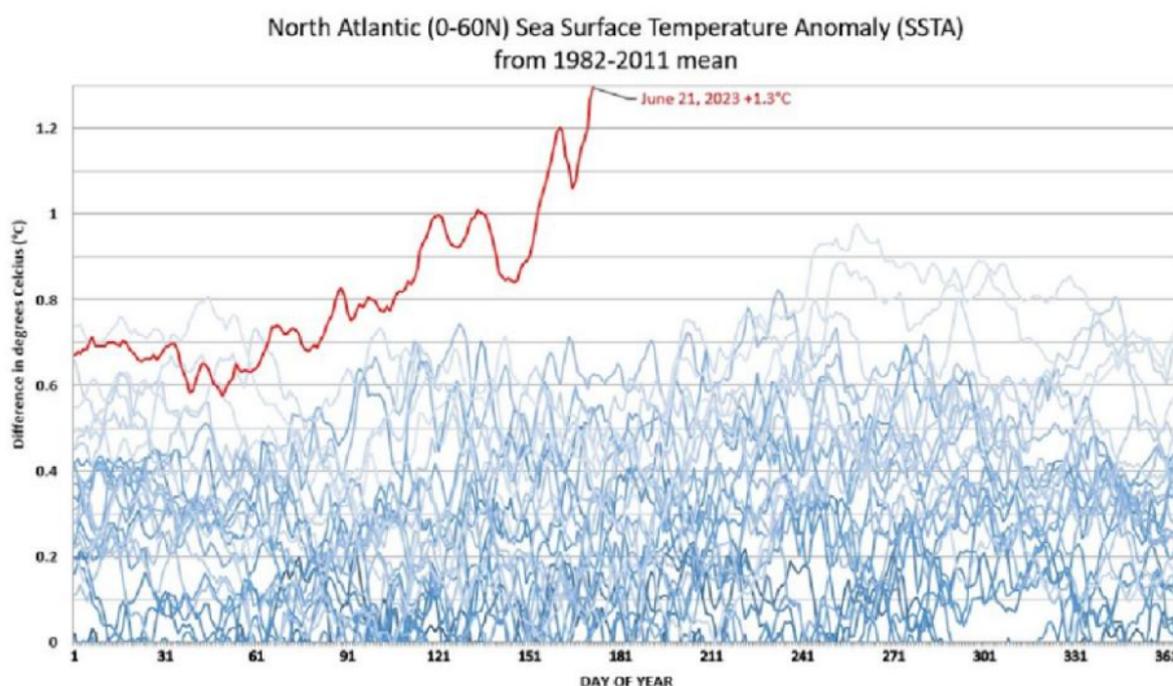
Figura 1 – Temperaturas crescentes nos oceanos



Fonte: (BBC, 2023)

Esse aumento da temperatura dos oceanos ocasiona a perda de espécies marinhas, incluindo recifes de corais que são reguladores na absorção de partículas de CO₂ no mar, atenuação de eventos extremos como furacões e ciclones que tem sua origem com a interação do ar atmosférico com a temperatura das águas, além da elevação do nível dos oceanos com a expansão do volume específico em relação à temperatura. A figura 2 ilustra o acompanhamento da anomalia das temperaturas do atlântico norte no ano de 2023 juntamente com outros valores médios entre 1981 e 2011, destacando a importância de investigação e ações para controlar o impacto ambiental.

Figura 2 – Temperaturas crescentes no Atlântico Norte



Fonte: (Bordera, 2023)

Já a temperatura no ar da terra subiu 1,5°C comparativamente à era pré-industrial, um reflexo direto das características de calor e específico de cada material, mas um estudo de Rom e Pinkerton (2020) aponta que as consequências do aumento de temperatura vão além, podendo mudar os padrões de precipitação da natureza, ocorrendo eventos extremos de seca ou chuvas em regiões distintas, perda de biodiversidade, redução da capacidade agrícola, alterações de características das águas de rios e oceanos, além de forçar a mudança de algumas populações por conta da temperatura ou de eventos climáticos de alta intensidade.

A figura 3 apresentado pela IPCC (2019) ilustra a variação da temperatura média global observada na superfície, com base em dados históricos e projeções futuras. A linha laranja sólida representa o aumento da temperatura média global desde 1960 até 2017, em comparação com a média do período de 1850-1900, período pré-industrial. A área sombreada em laranja ao redor da linha indica a variação provável da temperatura devido ao aquecimento antrópico estimado até o momento.

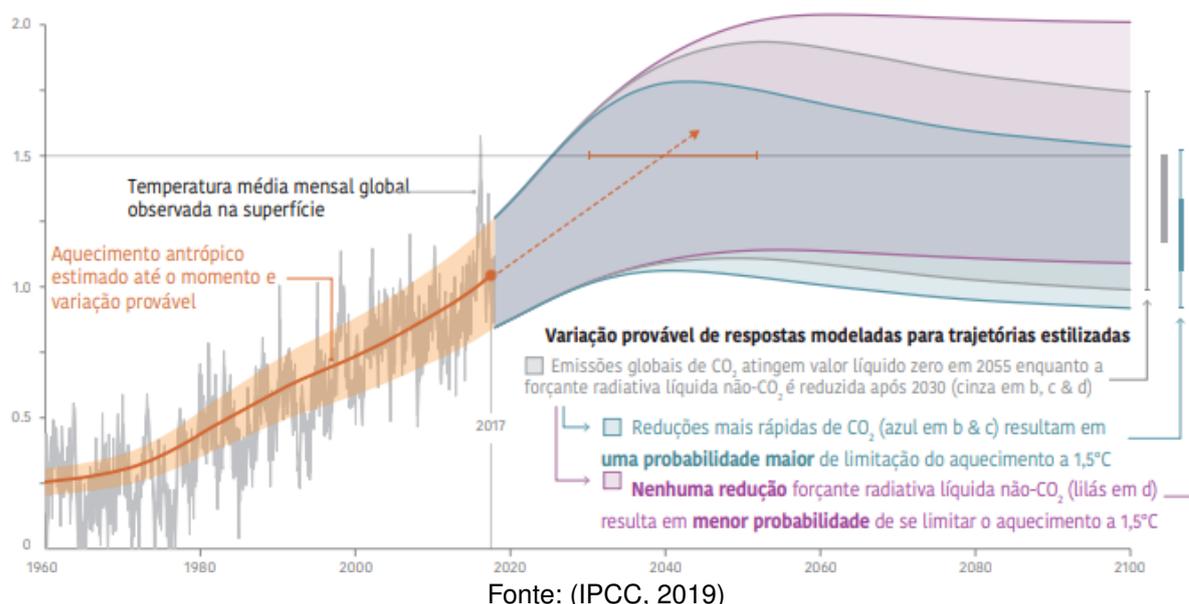
A partir de 2017, a figura 3 apresenta diferentes cenários de projeção de temperatura para os próximos 80 anos, até 2100, baseados em modelos de resposta às trajetórias de emissões de CO₂ e outras forças radiativas:

- a) Cenário de Emissões Zero de CO₂ em 2055 (Cinza Claro): As emissões globais de CO₂ atingirão valor líquido zero em 2055, enquanto a forçante radiativa líquida não-CO₂ é reduzida após 2030. Este é representado pela

área sombreada em cinza claro.

- b) Cenário de Reduções Rápidas de CO₂ (Azul): As reduções mais rápidas de CO₂, representadas pelas áreas sombreadas em azul (cenários b e c), mostram uma probabilidade maior de limitação do aquecimento a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.
- c) Cenário de Nenhuma Redução de Forçante Radiativa Não-CO₂ (Lilás): O cenário lilás (d) representa a situação em que não há redução significativa da forçante radiativa líquida não-CO₂. Este cenário resulta em uma menor probabilidade de limitar o aquecimento a 1,5°C.

Figura 3 – Evolução temporal da temperatura à era pré-industrial



A figura 3 destaca o papel das políticas de mitigação, como a Emenda de Kigali e o Protocolo de Montreal, visando reduzir as emissões de CO₂ a zero após 2030. Mas mesmo com essas reduções, a figura 3 evidencia que os efeitos das emissões passadas de gases poluentes continuarão a impactar o clima global pelas próximas 3 décadas.

Montreal (1987) diz que o Protocolo de Montreal, assinado em 1987, é um tratado internacional projetado para proteger a camada de ozônio reduzindo a produção e o consumo de substâncias que a destroem, incluindo os CFCs. Esses compostos químicos, anteriormente utilizados em larga escala em refrigeradores, sistemas de ar-condicionado e aerossóis, foram identificados como um dos principais responsáveis pela destruição da camada de ozônio na estratosfera.

Através de um esforço conjunto, o Protocolo de Montreal conseguiu uma cooperação global, resultando na eliminação quase total do uso de CFCs e outras substâncias nocivas à camada de ozônio. Esse esforço não apenas ajudou na recuperação da

camada de ozônio, mas também contribuiu para a redução de alguns gases de efeito estufa, já que muitos dos compostos que destroem o ozônio também são potentes aquecedores atmosféricos.

Entretanto, como parte do processo de eliminação dos CFCs, muitos países começaram a usar os HFCs como substitutos, pois estes não afetam a camada de ozônio. No entanto, descobriu-se que os HFCs têm um elevado potencial de aquecimento global GWP, contribuindo significativamente para o aquecimento global, onde de acordo com Santos (2020) "os benefícios climáticos do Protocolo de Montreal poderiam ser reduzidos ou totalmente perdidos no futuro, se as emissões de substitutos às Ozone Depletion Potential (ODP)s com altos potenciais de aquecimento global GWP, como alguns HFCs, continuassem a aumentar". Foi nesse contexto que surgiu a necessidade de uma nova regulamentação internacional, levando à criação da Emenda de Kigali.

Adotada em 2016, a Emenda de Kigali é uma extensão do Protocolo de Montreal e foi especificamente projetada para abordar a questão dos HFCs. Segundo Montreal (2017), o principal objetivo da emenda é reduzir gradualmente o uso de HFCs, com o compromisso de diminuir sua produção e consumo em até 85% até 2047. Essa transição busca limitar o aumento da temperatura global em até 0,4 °C até o final do século, mitigando uma das causas do aquecimento global.

De acordo com Martins *et al.* (2023), "as emissões de HFCs estão crescendo a uma média de 8% ao ano e a projeção indica que corresponderão de 7 a 19% das emissões totais de CO₂ em 2050". Em razão disso, diversas iniciativas internacionais, como a Emenda de Kigali, foram criadas para reduzir o impacto ambiental dessas substâncias, prevendo uma redução gradual dos HFCs, com metas específicas que variam entre países, como as restrições mais rígidas já implementadas na Europa.

A Emenda de Kigali estabelece diferentes cronogramas de redução para países desenvolvidos e em desenvolvimento, reconhecendo as diferentes capacidades econômicas e tecnológicas de cada nação. Em Montreal (2017), é descrito que os países desenvolvidos começaram a reduzir seus HFCs em 2019, enquanto os países em desenvolvimento têm cronogramas mais flexíveis, com reduções iniciando em 2024. O cronograma do acordo de Kigali e suas particularidades é destacado através da tabela 2.

Tabela 2 – Cronograma de redução da produção e consumo dos HFCs aprovado pela Emenda de Kigali

		A5 Grupo 1	A5 Grupo 2	A2
	Ano	2020-2022	2024-2026	2011-2013
Linha de Base	Componente HFC	Média do consumo HFC	Média do consumo HFC	Média do consumo HFC
	Componente HCFC	65% Linha de base	65% Linha de base	15% Linha de base*
Congelamento		2024	2028	-
1º degrau		2029 - 10%	2032 - 10%	2019 - 10%
2º degrau		2035 - 30%	2037 - 20%	2024 - 40%
3º degrau		2040 - 50%	2042 - 30%	2029 - 70%
4º degrau				2034 - 80%
Platô		2045- 80%	2047- 85%	2036 - 85%

Fonte: (Montreal, 2017)

Assim, a Emenda de Kigali não apenas complementa os esforços do Protocolo de Montreal para proteger a camada de ozônio, mas também alinha as metas de mitigação do aquecimento global, incentivando a inovação e a adoção de alternativas de baixo GWP, como o R-32. Essas novas tecnologias não apenas reduzem o impacto ambiental, mas também criam oportunidades econômicas, como a geração de créditos de carbono.

A influência dos fluidos refrigerantes adotados pela indústria da refrigeração nesse contexto é significativa, onde Birmingham (2016) afirma que “é extremamente poluente – responsável por cerca de 10% das das emissões globais de CO₂. Isso é três vezes a quantidade produzida pela aviação e pela navegação combinadas”, o autor ainda discute sobre a busca e utilização dessas tecnologias, que com o avanço constante do aumento de temperatura, cada vez mais esses sistemas estarão presentes no mercado. Esses fluidos são essenciais para sistemas de climatização e ar condicionado, desempenhando um papel relevante em muitas indústrias e na vida cotidiana. No entanto, muitos desses fluidos contêm substâncias que têm um impacto negativo no meio ambiente, tanto na destruição da camada de ozônio quanto no aquecimento global.

Inicialmente, compostos como os CFCs foram amplamente utilizados devido a sua eficiência e estabilidade química. No entanto, descobriu-se que os CFCs são altamente prejudiciais à camada de ozônio, uma vez que liberam átomos de cloro na estratosfera que catalisam a destruição das moléculas de ozônio. Essa descoberta levou à implementação do Protocolo de Montreal em 1987, um acordo internacional

destinado a eliminar gradualmente o uso de substâncias destruidoras da camada de ozônio.

Neale *et al.* (2021) desenvolve uma interpretação do desenvolvimento dos fluidos desde suas primeiras composições, onde a transição dos refrigerantes ao longo do tempo é uma resposta direta aos impactos ambientais causados pelos CFCs. Esses compostos, uma vez considerados eficazes na refrigeração, foram posteriormente identificados como causadores significativos da degradação da camada de ozônio, desencadeando assim a necessidade de buscar alternativas mais seguras e sustentáveis.

Os HCFCs surgiram como uma solução intermediária, oferecendo uma redução no potencial de destruição da camada de ozônio em comparação com os CFCs. Embora ainda contenham cloro e apresentem um impacto residual na camada de ozônio, os HCFCs foram considerados uma opção temporária para minimizar os danos ambientais imediatos.

No entanto, os HCFCs também têm desvantagens ambientais, pois ainda contribuem para o aquecimento global como gases de efeito estufa, apesar de ter um potencial de impacto relativamente menor que os outros tipos de fluidos. Diante disso, os HCFCs surgiram como uma alternativa mais sustentável, pois não contêm cloro e, portanto, não afetam a camada de ozônio. Apesar disso, os HCFCs ainda são potentes gases de efeito estufa, onde de acordo com um estudo publicado por IPCC (2018) em sua oitava edição, esses fluidos apesar de decomporem as moléculas de atmosfera em uma proporção muito menor, seus potenciais de aquecimento global ainda são milhares de vezes maiores do que o dióxido de carbono, alguns podendo ser até 13.850 vezes mais potentes, o que ressalta a necessidade contínua de avançar para refrigerantes mais amigáveis ao meio-ambiente.

Doug Parr, cientista-chefe do clima da organização *Greenpeace* afirma em sua entrevista para a Isabelle Gerretsen BBC (2020) que os HCFCs são gases altamente poluentes e complicados de se controlar, podendo permanecer na atmosfera por até 29 anos em alguns casos, desencadeando processos de reação, degradação e aumento de temperatura da atmosfera, ainda complementa “Uma vez produzidos, é difícil lidar com eles. Você está construindo um banco problemático de produtos químicos”.

Produtos químicos com composições de CFCs, HFCs e HCFCs são amplamente utilizados na indústria como um todo, sendo um grande representante dos impactos diretos no aquecimento global. Clare Perry, da Environmental Investigation Agency (EIA) expõe em um estudo da Water (2019) que cerca de 11% de todas as emissões que impactam diretamente ou indiretamente o aquecimento global vem dos fluidos refrigerantes com composições químicas de CFCs, HFCs e HCFCs.

A Emenda de Kigali, uma extensão do Protocolo de Montreal, buscou tratar sobre a produção e consumo dos hidrofluorcarbonetos HCFCs, gases com elevado po-

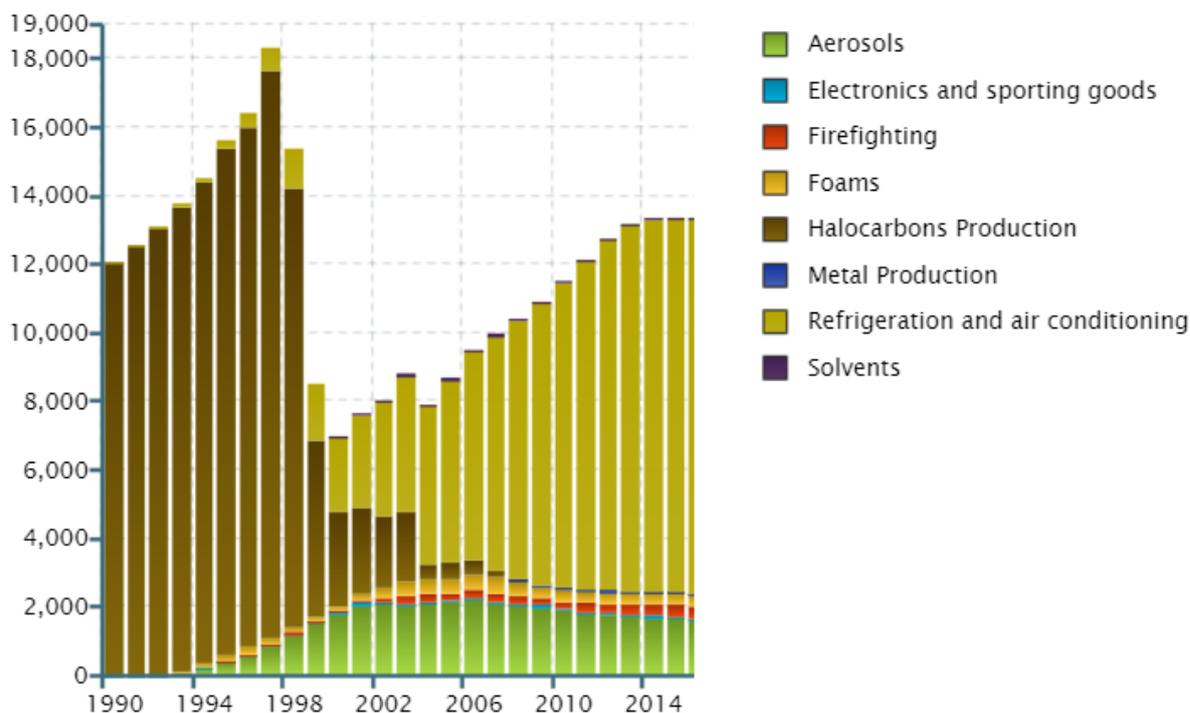
tencial de aquecimento global GWP, usados na indústria como um todo, mas principalmente como refrigerantes em sistemas de ar condicionado e refrigeração. A proposta reduz gradualmente a produção e o consumo dos mesmos entre 80% e 85% até o ano de 2047 em comparação aos níveis atuais, dependendo do nível de desenvolvimento de cada país, entendendo a dificuldade da transição em cada tipo de economia. Ao todo, 140 países incluindo o Brasil ratificaram a Emenda de Kigali de acordo com o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima do Governo do Brasil. Além disso, a emenda e reunião englobavam os seguintes objetivos:

- a) Redução do Aquecimento Global: Ao diminuir significativamente o uso de HFCs, espera-se evitar um aumento de até 0,4 °C na temperatura global até o final do século, contribuindo substancialmente para os esforços globais de combate às mudanças climáticas.
- b) Desenvolvimento de Tecnologias Alternativas: Promover o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de refrigeração e ar condicionado que utilizem refrigerantes com baixo GWP, ajudando a mitigar os impactos ambientais sem comprometer a eficiência.
- c) Benefícios Econômicos e Ambientais: A transição para refrigerantes com baixo GWP também pode estimular a inovação e a criação de empregos em setores de tecnologia verde, além de proporcionar benefícios econômicos ao reduzir os custos de longo prazo associados aos impactos das mudanças climáticas.

Ou seja, representando um avanço no posicionamento e desenvolvimento frente ao Protocolo de Montreal, visando não só resolver problemas ambientais atuais, mas adiantando-se a problemas futuros, elaborando planos e propostas mais sustentáveis através de discussões e regulamentações de produtos que afetem o clima mundial.

Apesar da afirmação de Clare Perry, da EIA onde 11% de todas as emissões de gases poluentes serem provenientes de fluidos refrigerantes, uma pesquisa sobre as informações de poluição de gases HFCs do *National Atmospheric Emissions Inventory* NAEI (2021) comprova que o uso de Refrigeração e Ar Condicionado (RAC) é a maior fonte e contribuiu com quase a totalidade (99,8/100)% do total de emissões de HFCs em 2020, onde uma publicação do *Project Drawdown* sobre Gerenciamento de Refrigerante, afirma que “90% das emissões de refrigerante ocorrem no final da vida útil, reforçando a necessidade de cuidados especiais na regulamentação e descartes dos materiais e equipamentos de refrigeração”. A figura 4 do National Atmospheric Emissions Inventory (NAEI) ilustra a evolução do uso e liberação dos gases (em toneladas de CO₂) pela refrigeração de modo geral em comparação aos outros setores.

Figura 4 – Evolução temporal de liberação de CO2



Fonte: (NAEI, 2021)

Estima-se que milhões de equipamentos de refrigeração e climatização estejam em operação em todo o mundo, desde sistemas domésticos de ar condicionado até unidades industriais de grande escala, bem como complementa o estudo publicado por Dreyfus *et al.* (2020), onde se traz a seguinte afirmação “Globalmente, estima-se que existam 3,6 bilhões de aparelhos de refrigeração em uso atualmente, com projeção de aumento para 9,5 bilhões até 2050”, à medida que as temperaturas do Globo vão aumentando ao longo do tempo, bem como a partir do enriquecimento das populações.

Entretanto a manutenção inadequada, o descarte impróprio e os vazamentos desses equipamentos representam desafios significativos na gestão dos fluidos refrigerantes. Os vazamentos de gases refrigerantes, mesmo em pequena escala, podem contribuir significativamente para o aquecimento global, pois esses gases têm potenciais de aquecimento global muito altos em comparação com o dióxido de carbono.

De acordo com o *United States Environmental Protection Agency US EPA* (2021) e com o estudo da NAEI (2021), as maiores fontes de emissões são de fluidos refrigerantes utilizados em equipamentos de refrigeração e ar condicionado domésticos, mas não se limitam a isso, estão presentes na linha industrial, automotiva, entre outras fontes que utilizam esse tipo de gás, principalmente provenientes de vazamentos destes sistemas.

Além disso, a gestão adequada do descarte de equipamentos de refrigeração e climatização são cuidados necessários para evitar a liberação inadvertida de gases re-

frigerantes na atmosfera. Muitos desses equipamentos contêm substâncias perigosas que requerem processos de reciclagem especializados para evitar danos ambientais. No entanto, a falta de infraestrutura e regulamentação adequadas em muitas regiões do mundo dificulta a eliminação correta desses equipamentos, levando a práticas inadequadas de descarte e potencial poluição.

Em suma, a aceleração do aquecimento global é um fenômeno complexo impulsionado por uma série de fatores interligados, como a destruição da camada de ozônio, o aumento das concentrações de gases de efeito estufa e a influência dos fluidos refrigerantes. Para mitigar os impactos do aquecimento global, é necessário adotar medidas eficazes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promover tecnologias de refrigeração mais sustentáveis e implementar práticas de gestão de resíduos adequadas.

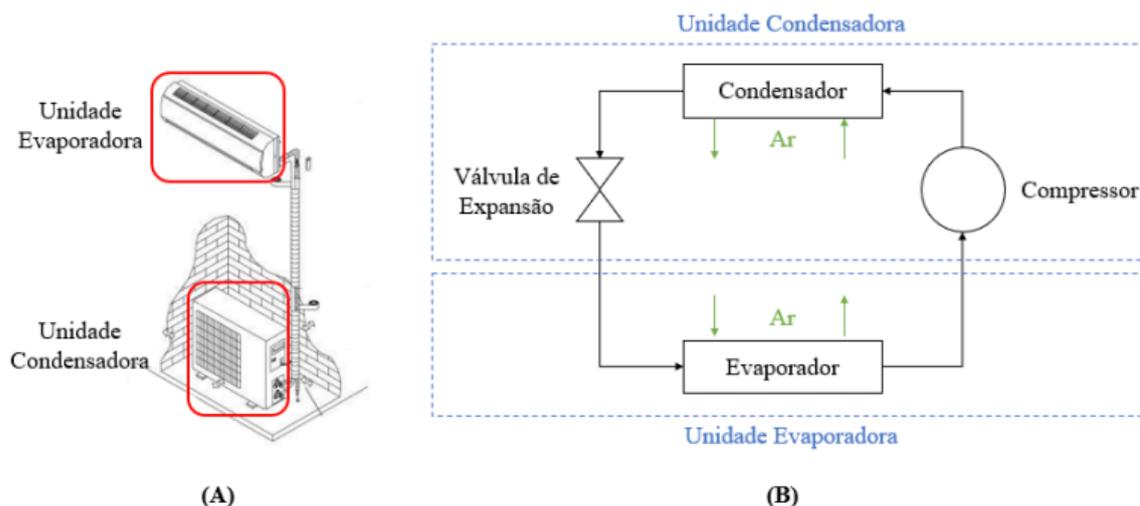
A complementariedade entre essas medidas evidencia o compromisso global para enfrentar o aquecimento global, destacando a necessidade de políticas que não apenas limitem as emissões de carbono, mas também promovam o uso de tecnologias de baixo impacto ambiental. Assim, ao unir os objetivos do Protocolo de Kyoto e da Emenda de Kigali, a comunidade internacional avança na construção de um futuro mais sustentável e, com as crescentes mudanças climáticas e a destruição da camada de ozônio, discutida amplamente no presente subcapítulo, a indústria de refrigeração e ar-condicionado tem sido obrigada a evoluir e adotar fluidos refrigerantes mais sustentáveis.

O próximo subcapítulo aborda em detalhes técnicos o que é um sistema de climatização, os fluidos refrigerantes R-410A e R-32, destacando suas características e a importância de sua transição para atender aos requisitos da Emenda de Kigali.

2.1.1 Sistema de climatização

Um sistema de climatização é um conjunto mecânico que transfere calor de um ambiente mais frio para outro mais quente, com o objetivo de resfriar ou manter a temperatura em um nível desejado. Esse sistema geralmente opera com base em ciclos de compressão e expansão de fluidos refrigerantes, que absorvem o calor de um ambiente (o espaço a ser resfriado) e o liberam em outro (geralmente o ambiente externo), bem como ilustra a figura 5, onde detalha-se o ciclo de um sistema de refrigeração ou climatização, a partir de um ar condicionado Split Hi-Wall.

Figura 5 – Unidade de ar condicionado tipo Split



Fonte: (Martins *et al.*, 2023)

O ciclo de climatização ou refrigeração, representado pela figura 5, é separado em quatro principais componentes, e seu funcionamento pode ser explicado de acordo com Arora (2012) como:

- Compressor: Eleva a pressão do fluido refrigerante, transformando-o em um gás quente de alta pressão.
- Condensador: Resfria o gás quente, dissipando o calor absorvido para o ambiente externo.
- Válvula de Expansão: Reduz a pressão do fluido refrigerante, transformando-o em uma mistura de líquido e vapor.
- Evaporador ou Trocador: Absorve o calor do ambiente interno, evaporando o fluido refrigerante e resfriando o ar interno.

Fluido refrigerante é a substância que circula dentro do sistema de climatização, responsável por absorver e liberar calor durante os ciclos de compressão e expansão, onde no contexto atual da climatização residencial, dois fluidos refrigerantes se destacam: o R-410A e o R-32, os quais são detalhados a seguir.

2.1.1.1 R-410A

O R410A, é uma mistura azeotrópica composta por 50% de R-32 e 50% de pentafluoroetano (R-125), que tem sido amplamente adotado na indústria de ar condicionado em substituição ao freon (R-22) a partir do Protocolo de Montreal, devido ao seu menor potencial de destruição da camada de ozônio ODP de 0, o que indica que não contribui para a destruição da camada de ozônio. Entretanto, possui um GWP

(Potencial de Aquecimento Global) de 2088, tornando-se um contribuinte significativo para o efeito estufa. A identificação do fluido não pode ser realizada visualmente, em função de ser um fluido refrigerante com alta volatilidade e, à pressão e temperatura ambiente, se apresenta no estado gasoso, sendo representado pelo seu cilindro de armazenamento na figura 6.

Figura 6 – Cilindro R410A



Fonte: (Daikin, 2024)

De acordo com Daikin (2024) é possível destacar que R410A opera em pressões mais altas em comparação com o R-22 (antigo fluido refrigerante, descontinuado), com a pressão de operação sendo cerca de 50% maior, o que por consequência exige mais dos componentes do sistema, esse aspecto exigiu que os equipamentos fossem capazes de suportar a necessidade de operação, se tornando cada vez mais robustos para o uso seguro e eficiente deste refrigerante.

Além disso, a substituição do R-22 pelo R-410A também forçou a mudança para o uso de óleos polioléster (POE) em vez dos óleos minerais tradicionalmente utilizados com o R-22. Conforme apontado por Carvalho (2017), os óleos polioléster (POE) são conhecidos por serem mais higroscópicos do que outros tipos de óleo, o que significa que eles absorvem umidade mais facilmente. Esta propriedade pode levar a problemas de contaminação nos sistemas de refrigeração, pois a umidade no óleo pode reagir com os refrigerantes, formando ácidos que podem causar corrosão interna e falhas nos componentes do sistema. Esta característica dos óleos POE se faz presente para manter a eficiência e longevidade dos sistemas de refrigeração, restringindo ainda mais a mudança de um sistema já existente de R-22 para R-410A, uma vez que além das características de operação com pressões mais elevadas, há diferença nas propriedades do óleo que lubrifica o sistema mecânico deste conjunto.

Apesar das vantagens em relação à proteção da camada de ozônio, o alto GWP do R-410A tem levado à busca de alternativas com menor impacto climático. Como enfatizado por Camargo em TRANE (2024), "Investir em pesquisa e desenvolvimento

de alternativas de baixo GWP, bem como em programas de capacitação e conscientização, são medidas essenciais para alcançar uma transição bem-sucedida”.

Já em termos de segurança, com base em TRANE (2015) o R410A é classificado como A1, indicando que não é inflamável, fato que aumentou o seu valor percebido frente aos consumidores e técnicos instaladores, uma vez que os cuidados de operação e manutenção são reduzidos, aliado a sua capacidade de resfriamento adequada para sistemas de alta eficiência, e o seu Coeficiente de Performance (COP) geralmente bom, permitindo um balanço eficaz entre eficiência energética e capacidade de resfriamento.

2.1.1.2 R-32

O R-32 (difluorometano) é considerado um dos principais candidatos para substituir o R-410A devido ao seu menor impacto ambiental. Tomczyk *et al.* (2017), descreve que o R-32 possui um Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) de 0, similar ao R-410A, mas apresenta um Potencial de Aquecimento Global (GWP) de apenas 675, que é significativamente menor do que o GWP do R410A, tornando o R-32 uma opção mais ecológica. Assim como para o R-32, a identificação do fluido R-410A não pode ser realizada visualmente, em função de ser um fluido refrigerante com alta volatilidade e, à pressão e temperatura ambiente, se apresenta no estado gasoso, sendo representado pelo seu cilindro de armazenamento na figura 7.

Figura 7 – Cilindro R32 (HFC32)



Fonte: (Daikin, 2024)

Além disso, o R-32, é um fluido refrigerante de um único componente, composto exclusivamente de Difluorometano (CH_2F_2). Conforme destacado por Wang e Wang (2000), é possível observar que a simplicidade de um único componente no R-32, facilita a manutenção e reciclagem dos sistemas de refrigeração e ar-condicionado.

No entanto, segundo o estudo de Calm e Hourahan (2001), o R-32, é classificado como A2L, indicando baixa inflamabilidade. Embora o R-32, seja mais inflamável que o R-410A, o risco é considerado gerenciável com os cuidados apropriados no design e instalação dos sistemas.

Outra vantagem significativa, conforme o estudo de Stoecker (1989) a cerca de desempenho de sistemas térmicos com base nas propriedades e características de cada sistema, para o R-32, é sua capacidade de resfriamento volumétrica, que é cerca de 20% maior do que a do R-410A. Isso pode resultar em sistemas mais compactos e eficientes. A capacidade de resfriamento volumétrica mais alta do R-32, permite o desenvolvimento de sistemas de ar-condicionado mais compactos e energeticamente eficientes.

O Coeficiente de Performance (COP) do R-32 tende a ser ligeiramente superior ao do R-410A, contribuindo para uma maior eficiência energética dos sistemas de ar-condicionado que utilizam este refrigerante. No estudo de Calm e Hourahan (2001) é ressaltado que sistemas de ar-condicionado que adotam R-32 demonstram um COP superior, promovendo maior eficiência energética.

Além disso, as pressões de operação do R-32 são similares às do R-410A, permitindo uma transição mais fácil para os sistemas que foram projetados para o R-410A, com modificações mínimas. No livro de Cengel, Boles e Kanoğlu (2011) é possível observar a semelhança nas pressões de operação entre os fluidos refrigerantes R-32 e o R-410A, que acaba por facilitar a adaptação de sistemas existentes, reduzindo custos e complexidade.

Por fim, o R-32 também utiliza óleos polioléster (POE), semelhantes aos usados com o R-410A, assim como destacado por Calm e Hourahan (2001) e novamente em ASHRAE e Engineers (2010) o uso de óleos (POE) com o R-32, assim como com o R-410A, garante compatibilidade e desempenho adequado dos sistemas.

2.1.1.3 Comparativo dos fluidos R-410A e R-32

Embora muitos artigos afirmem que os sistemas de R-410A e R-32 são compatíveis, existem estudos que sugerem que há diferenças significativas na composição dos óleos utilizados nos dois sistemas, principalmente em relação aos aditivos, além das diferenças nas pressões e temperaturas de trabalho de cada fluido.

Por exemplo, um estudo detalhado sobre a substituição do R-410A pelo R-32, conduzido por Ramirez (2021), aponta que a composição dos óleos utilizados em cada sistema pode variar, especialmente devido à diferença nos aditivos químicos, que diferencia no funcionamento dos sistemas, com os aditivos desempenhando um papel vital na lubrificação e na prevenção do desgaste das partes móveis do compressor. O estudo também ressalta que “O R32, quando entra em processo de compressão, atinge temperaturas muito elevadas, fazendo com que esse aquecimento destrua as

propriedades do óleo lubrificante do sistema, elevando dessa forma ao risco de dano ao sistema e conseqüentemente ao equipamento”, ou seja, a pressão de operação do R-32 é significativamente maior do que a do R-410A, o que implica na necessidade de componentes que suportem estas condições mais rigorosas, de acordo com a fala.

Adicionalmente, outro estudo experimental realizado por Silva *et al.* (2019) avalia o desempenho de sistemas operando com R-32 em comparação com R410A. O estudo destaca que “o R-32 atinge temperaturas de descarga muito elevadas, fazendo com que as propriedades do óleo lubrificante do sistema sejam deterioradas caso essa temperatura supere 120 °C”, ao finalizar os testes o autor afirma observar que “uma mudança na cor do óleo lubrificante juntamente com a formação de sulfetos devido à interação química entre o óleo POE e os componentes internos do compressor”, essa sendo uma consequência da característica de operação do R-32, onde as pressões de trabalho tendem a ser mais elevadas, aumentando a temperatura de descarga, que pode afetar a eficiência do sistema e a durabilidade dos componentes. Esses fatores destacam a necessidade de uma pré-avaliação ao considerar a compatibilidade dos materiais e a necessidade de possíveis modificações nos sistemas projetados originalmente para operar com R-410A.

Portanto, a partir dos estudos de Ramirez (2021) e Silva *et al.* (2019), é notório reconhecer que há uma transição crescente para o R-32 devido ao seu menor GWP, sendo preciso reconhecer e abordar as diferenças técnicas e operacionais entre os dois fluidos refrigerantes para garantir a eficiência e a segurança dos sistemas de ar-condicionado e refrigeração. Essas diferenças não podem ser subestimadas, especialmente quando se trata de adaptação de sistemas existentes ou no design de novos sistemas que visam maximizar a eficiência energética e minimizar o impacto ambiental.

Ambos os refrigerantes, R-32 e R-410A, têm suas vantagens e desvantagens. O R-32, com seu menor GWP, representa uma alternativa mais sustentável e eficiente em termos de impacto ambiental, sendo uma resposta significativa às exigências da Emenda de Kigali, que visa a redução do uso de HFCs com alto GWP. Contudo, a sua inflamabilidade exige cuidados adicionais no design e na instalação dos sistemas. Por outro lado, o R-410A, amplamente utilizado, embora seguro e eficiente, contribui de forma mais significativa para o aquecimento global devido ao seu alto GWP.

Os dados comparativos entre as características básicas de operação entre os dois fluidos pode ser observada na tabela 3, a fim de demonstrar com maior clareza a tipificação dos sistemas.

Tabela 3 – Características de Operação de Fluidos Refrigerantes

	Composição	Potencial de destruição da camada de ozônio (ODP)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Inflamabilidade	Capacidade de Resfriamento	Teórico COP	P cond (MPa)	
	R22	Puro	0,05	1810	Não	100	100	1,7
HFC	R410A (R32+R125)	Tipo azeotrópico	0	2090	Não	141	91	2,7
	R32 	Puro	0	675	☼ Ligeiramente inflamável	160	96	2,8
Sem HFC	Propano (R290)	Puro	0	<3	Altamente inflamável	83	97	1,5
	CO2 (R744)	Puro	0	1	Não	256	41	10,0
	R1234yf	Puro	0	4	☼ Ligeiramente inflamável	56	92	1,2

Fonte: (Daikin, 2024)

A transição imediata do R-410A para o R-32 se faz necessária para mitigar os impactos ambientais dos sistemas de refrigeração e ar-condicionado. A redução no tempo de permanência e no GWP dos refrigerantes utilizados pode resultar em uma diminuição significativa das emissões de gases de efeito estufa, onde, o tempo de permanência se refere ao período durante o qual um gás permanece na atmosfera antes de ser removido por processos naturais. Esse aspecto é uma das variáveis para avaliar o impacto ambiental de diferentes refrigerantes.

De acordo com TRANE (2015), o tempo de permanência do R-410A na atmosfera é de aproximadamente 28 anos, onde este tempo prolongado de permanência contribui significativamente para o efeito estufa, exacerbando o aquecimento global, no mesmo estudo da Trane é apresentado que o R-32 é um dos componentes do R-410A, entretanto o R-32 possui um tempo de permanência mais curto na atmosfera, em torno de 5 anos, o que torna o uma opção mais ambientalmente amigável.

Os dados comparativos entre os tempos de permanência e GWP dos fluidos R-410A e R-32 apresentados por TRANE (2015) podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 – Dados de Fluidos Refrigerantes

	atmospheric life		environmental		safety			COP (efficiency)		
	years	days	ODP	GWP	toxicity	flammable	burn velocity (BV) (cm/s)	minimum ignition energy (MIE) (mJ)	max theory 2-stage	max theory 1-stage
R-11	45	16,425	1	4750	A	1	0	-	9.467	9.101
R-12	100	36,500	0.82	10,900	A	1	0	-	9.102	8.584
R-22	11.9	4,344	0.034	1760	A	1	0	-	8.965	8.483
R-123	1.3	475	0.012	79	B	1	0	-	9.401	8.949
R-134a	13.4	4,891	0	1300	A	1	0	-	9.055	8.472
R-410A	28.2	10,293	0	1924	A	1	0	-		7.988
R-245fa	7.7	2,811	0	858	A	1	0	-	9.305	8.778
R-32	5.2	1,898	0	677	A	2L	6.7	15		8.215
R-1233zd(E)	0.0712	26	0.0002	1*	A	1	0	-	9.345	8.854
R-1234yf	0.031	11	0	<1*	A	2L	1.5	5000	8.868	8.168
R-1234ze(E)	0.038	14	0	<1*	A	2L	0**	-	9.067	8.452
R-513A	5.9	2,158	0	572	A	1	0	-	8.934	8.280
CO ₂	50	18,250	0	1	A	1	0	-		3.533
ammonia	0.01	4	0	0	B	2L	7.2	100		8.774

* Hodnebrog, O. et. al. "Global Warming Potential and Radiative Efficiencies of Halocarbons and Related Compounds: A Comprehensive Review," *Reviews of Geophysics* (June 2013)

** at room temperature

Fonte: (TRANE, 2015)

A transição para o R-32, conforme sugerido em Nowak (2018), reflete a tendência da indústria de buscar soluções que equilibram eficiência energética com menor impacto ambiental, bem como oferece vantagens ambientais e operacionais que o tornam uma escolha preferida para sistemas de ar-condicionado modernos.

A discussão sobre os fluidos refrigerantes, como o R-410A e o R-32, revela a complexidade do tema e a importância de selecionar alternativas que, além de serem eficazes no controle térmico, minimizam os impactos ambientais. Enquanto o R-32 surge como uma opção mais sustentável em relação ao R-410A, com um menor Potencial de Aquecimento Global (GWP), a necessidade de transição para refrigerantes menos danosos é fundamental para atender às exigências globais na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Contudo, a substituição dos fluidos refrigerantes não apenas atende a essas necessidades ambientais, mas também abre caminho para a adoção de práticas que podem ser recompensadas financeiramente.

É neste cenário que entra a geração de créditos de carbono, um mecanismo que incentiva a adoção de tecnologias sustentáveis, como a utilização de fluidos refrigerantes de baixo GWP. A transição para alternativas mais ecológicas, como o R-32, não só reduz o impacto ambiental, mas também se alinha com as oportunidades oferecidas pelo mercado de créditos de carbono, promovendo um ciclo de sustentabilidade econômica e ambiental.

No próximo subcapítulo é explorado como a substituição de fluidos refrigerantes pode contribuir para a geração de créditos de carbono, com vistas a analisar a viabilidade e os benefícios desta prática em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Sendo esta análise, base para entender como a adoção de tecnologias de baixo

impacto pode não apenas cumprir regulamentações ambientais, mas também gerar valor econômico significativo aos empreendimentos hoteleiros de médio porte.

2.2 GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Os créditos de carbono emergiram como uma ferramenta no combate às mudanças climáticas, de acordo com o artigo de Nazneen e Sushma (2021), "O Protocolo de Kyoto, de 1998, foi adotado pelas partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) com o objetivo de alcançar limitações quantificadas de emissões por meio de políticas e medidas específicas de minimização, como a implementação conjunta, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)) e o comércio internacional de emissões para aumentar a eficácia do custo da mitigação da mudança climática", permitindo que países/empresas desenvolvidas financiem projetos de redução de emissões em países/empresas em desenvolvimento.

Além disso, o artigo de Gómez e Solorzano (2023) destaca que os créditos de carbono se tornaram uma ferramenta vital no combate às mudanças climáticas, incentivando reduções de emissões de gases de efeito estufa ao fornecer uma recompensa financeira para projetos que reduzem emissões em países em desenvolvimento.

Os créditos de carbono são utilizados por diversas razões:

- a) Redução das Emissões Globais: Eles permitem a implementação de projetos que reduzem ou eliminam emissões de GEE, ajudando a mitigar o aquecimento global.
- b) Flexibilidade Econômica: Oferecem uma forma econômica de cumprir metas de redução de emissões, proporcionando uma maneira eficiente de abordar as obrigações ambientais.
- c) Incentivos Econômicos: Proporcionam incentivos financeiros para empresas e indivíduos investirem em tecnologias limpas e práticas sustentáveis, facilitando a transição para uma economia de baixo carbono.

Um crédito de carbono representa a redução de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) na atmosfera, onde de acordo com Credcarbo (2024), a conversão pode ser dada de duas formas, sendo elas:

- a) $\text{Créditos de Carbono} = \text{Quantidade de CO}_2 \text{ absorvida (toneladas)} / \text{Fator de Conversão} = 30 \text{ toneladas} / 1 \text{ tonelada por crédito} = 30 \text{ créditos de carbono}$
- b) $\text{Valor do Carbono} = \text{Quantidade de CO}_2 \text{ emitida (toneladas)} \times \text{Taxa de Carbono} (\$ \text{ por tonelada}) = 1.000 \text{ toneladas} \times \$76,46/\text{tonelada} = \76.460

O item "a", representa os créditos de carbono gerados a partir da absorção de CO₂ da atmosfera, no exemplo em questão foram absorvidas 30 toneladas de

CO₂ da atmosfera, onde essa quantidade representa o equivalente a 30 créditos de carbono. O item "b" representa os créditos de carbono gerados a partir de processos ou tecnologias que deixam de emitir uma quantidade definida de CO₂ na atmosfera, no exemplo em questão, 1.000 (mil) toneladas de CO₂ deixaram de ser emitidas, com o valor de \$76,46 para cada tonelada, foi possível obter uma receita de \$76.460, a partir da redução do impacto ambiental do processo proposto.

Esses créditos são gerados através de projetos que diminuem ou evitam a emissão de GEE. Conforme o estudo de Demiralay, Gencer e Bayraci (2022) "As autoridades iniciaram uma série de políticas para prevenir as emissões de carbono para mitigar os danos do aquecimento global", onde cada crédito equivale a uma tonelada de dióxido de carbono evitada ou removida da atmosfera.

Os créditos de carbono podem ser comprados e vendidos em mercados voluntários ou regulados, proporcionando um mecanismo flexível para a gestão das emissões. O estudo de Demiralay, Gencer e Bayraci (2022) ainda aponta que "A precificação do carbono que pode ser aplicada como impostos de carbono ou sistemas de comércio de emissões é uma das soluções mais eficientes para facilitar a transição para indústrias de baixo carbono, fornecendo um incentivo econômico" ou seja, o mercado de créditos de carbono oferece uma plataforma para a negociação de emissões, permitindo uma abordagem flexível e econômica para a gestão das metas de redução de gases de efeito estufa.

Em decorrência do fato, os créditos de carbono incentivam a adoção de práticas sustentáveis e investimentos em tecnologias limpas. Segundo Anukwonke e Abazu (2022), a comercialização de créditos de carbono não apenas ajuda na redução de emissões, mas também promove o desenvolvimento de negócios verdes ao incentivar o investimento em tecnologias sustentáveis.

Gupta (2016) descreve que "Essa troca por meio do comércio de carbono é muito mais adequada e tem servido como ferramenta orientada para o mercado, ajudando as empresas a reduzir os níveis de acúmulo de carbono na atmosfera". Smith (2020), complementa que "Da mesma forma, também foram identificados os esforços de alguns indivíduos e organizações para melhorar sua pegada de carbono por meio de investimentos verdes".

Os meios para gerar créditos de carbono podem se dar das mais diversas formas, sendo elas:

- a) Projetos de Energias Renováveis: Inclui energia eólica, solar, e hidroelétrica, que substituem fontes de energia fóssil.
- b) Eficiência Energética: Implementação de tecnologias que reduzem o consumo de energia em processos industriais, residenciais e comerciais.
- c) Reflorestamento e Aflorestamento: Plantação de árvores que absorvem CO₂ da atmosfera.

- d) Gestão de Resíduos: Projetos que capturam metano em aterros sanitários.
- e) Substituição de Fluidos Refrigerantes: Troca de refrigerantes de alto GWP por alternativas mais ecológicas, como a substituição do R410A pelo R32.

A substituição de fluidos refrigerantes de alto GWP por alternativas mais ecológicas, como o R32, não só reduz o impacto ambiental, mas também cria oportunidades para a geração de créditos de carbono, o que pode resultar em incentivos financeiros ou imagem corporativa, incentivando práticas sustentáveis na indústria de refrigeração e da construção civil.

Logo, projetos que envolvem a captura e destruição de HFCs também são elegíveis para geração de créditos. De acordo com IPCC (2018), a captura e destruição de hidrofluorcarbonetos (HFCs) representam uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de GEE, gerando créditos de carbono, denominadas como "taxa de câmbio" que podem ser comercializados em mercados regulados e voluntários.

A conversão de sistemas de refrigeração para usar refrigerantes com menor impacto ambiental reduz as emissões de GEE, que podem ser quantificadas e convertidas em créditos de carbono. Conforme descrito por Orford, Raubenheimer e Kantor (2004), a adoção de refrigerantes com baixo potencial de aquecimento global (GWP) e a atualização de sistemas de refrigeração são mecanismos para a redução de emissões de gases de efeito estufa, permitindo a criação de créditos de carbono que podem ser comercializados.

Além disso, projetos que promovem a troca de refrigerantes de alto GWP por alternativas mais sustentáveis são reconhecidos como estratégias eficazes para mitigação das mudanças climáticas. Segundo Anukwonke e Abazu (2022), as iniciativas que substituem refrigerantes tradicionais por opções ecológicas não só diminuem a pegada de carbono das empresas, mas também geram créditos de carbono, sendo esse número a depender das tecnologias adotadas e do tamanho do empreendimento, incentivando assim, práticas empresariais sustentáveis.

Ainda segundo Anukwonke e Abazu (2022), os créditos de carbono podem gerar vantagens competitivas para aqueles que poluem ou que deixam de poluir, para os que poluem são:

- a) Cumprimento de Regulamentações: Ajuda a cumprir regulamentos ambientais e evitar penalidades.
- b) Responsabilidade Social Corporativa: Melhora a imagem corporativa e demonstra compromisso com a sustentabilidade.
- c) Vantagens econômicas: Possibilidade de ganhos financeiros através da venda de créditos excedentes ou ao reduzir os custos de cumprimento regulatório.

E para aqueles que deixam de poluir, são:

- a) Incentivos Financeiros: Recebem compensações financeiras por projetos sustentáveis que geram créditos de carbono.
- b) Mercado de Créditos: Podem vender os créditos gerados para empresas que precisam compensar suas emissões, criando uma nova fonte de receita.

Cada país tem autonomia para regular os meios de geração e as leis aplicáveis a cada tipo de empresa, mas de maneira geral elas são orientadas por dois acordos principais. O primeiro é o Acordo de Paris, que estabeleceu metas globais para limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, incentivando ainda mais a redução das emissões de GEE. Conforme Bodansky, Brunnée e Rajamani (2017) aborda amplamente no seu livro o Acordo de Paris e o protocolo de Kyoto, onde os mesmos se apresentam como marcos na governança climática global, com objetivo de manter o aumento da temperatura abaixo de 2°C, e buscar esforços para limitá-lo a 1.5°C.

O segundo é o Protocolo de Kyoto de 1997, que foi a primeira grande tentativa internacional de regular as emissões de GEE, introduzindo mecanismos de mercado para facilitar a redução de emissões. Conforme descrito por Brohé *et al.* (2012), o Protocolo de Kyoto estabeleceu mecanismos de flexibilização, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), permitindo que países desenvolvidos cumprissem suas metas de redução de emissões investindo em projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento, gerando créditos de carbono que poderiam ser utilizados para atingir suas próprias metas.

Além desses dois grandes acordos, existem o Protocolo de Montreal 1987 e o Acordo de Kigali 2016, que foram mencionados anteriormente na seção sobre o aquecimento global e seus impactos. O Protocolo de Montreal focou inicialmente na eliminação de substâncias que destroem a camada de ozônio, mas também teve um impacto significativo na redução de GEE. O Acordo de Kigali, uma emenda ao Protocolo de Montreal, estabeleceu a redução progressiva da produção e consumo de hidrofluorcarbonetos (HFCs), que são potentes GEE. Conforme narrado por Barrett (2003), "Alguns tratados, como o Protocolo de Montreal sobre substâncias que destroem a camada de ozônio, são bem-sucedidos. A maioria, entretanto, não consegue alterar consideravelmente o comportamento do estado", ou seja, o Protocolo de Montreal e o Acordo de Kigali exemplificam como acordos ambientais podem evoluir para incluir metas mais amplas de mitigação climática, de maneira eficaz e com ampla participação e discussão das partes interessadas.

No Brasil, as medidas que orientam a geração e comercialização de créditos de carbono são respaldadas por legislações específicas, como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)), instituída pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Essas iniciativas têm como objetivo estabelecer metas voluntárias para a redução das emissões de gases de efeito estufa

(GEE) e promover o desenvolvimento de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), bem como outras ações para a mitigação das mudanças climáticas, sendo essas medidas fundamentais não apenas para o cenário nacional, mas também para o compromisso global na redução das emissões, conforme preconizado pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) é um marco legal no combate às mudanças climáticas no Brasil. A PNMC estabelece metas voluntárias para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de acordo com Ministério do Meio Ambiente do Brasil, a MMA (2009) “oficializa o compromisso voluntário do Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de redução de emissões de gases de efeito estufa entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020”, promovendo o desenvolvimento de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e outras iniciativas para a redução de GEE, e regula a geração e comercialização de créditos de carbono no país.

O avanço na regulamentação do mercado de créditos de carbono é um passo inicial na luta contra as mudanças climáticas. A Resolução nº 460, de 28 de julho de 2023, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes básicas para esse mercado no Brasil, definindo conceitos-chave e criando uma estrutura inicial para a comercialização de créditos de carbono, reconhecendo a necessidade de incentivar a redução das emissões de gases de efeito estufa.

O Projeto de Lei (PL) nº 412, de 2022, em tramitação no Congresso Nacional, complementa essa regulamentação ao detalhar e aprofundar as regras estabelecidas pela Resolução. Com isso, busca-se garantir maior clareza e segurança jurídica para os participantes do mercado de créditos de carbono, incentivando investimentos em projetos de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

A combinação dessas iniciativas legislativas mostra um compromisso crescente do Brasil em enfrentar os desafios ambientais e promover práticas sustentáveis. Ao regulamentar o mercado de créditos de carbono de forma abrangente e detalhada, o país demonstra sua disposição em contribuir globalmente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição para uma economia de baixo carbono.

O estudo de FDC (2023) afirma que “a conexão entre as duas iniciativas é que ambas visam criar um mercado regulado e transparente de créditos de carbono no Brasil”, trazendo alguns desafios que a regulamentação de créditos de carbono pode enfrentar no país, sendo de acordo com FDC (2023):

- a) Risco de *greenwashing*: Os créditos de carbono podem ser utilizados para fins de *greenwashing*, ou seja, para dar uma falsa imagem de sustentabilidade.
- b) Risco de apropriação indevida: Os créditos de carbono podem ser gerados por atividades que não são realmente sustentáveis, ou que não beneficiam

as comunidades locais.

- c) Risco de concentração: O mercado de créditos de carbono pode se concentrar em algumas empresas ou regiões, o que pode limitar seus benefícios para a sociedade.

De acordo com um estudo de Santos, Angelo e Cordeiro (2021) e International Energy Agency (2020), no cenário global, diversos países e regiões têm implementado mecanismos de precificação de carbono para atingir suas metas de redução de emissões. Os dois principais mecanismos de precificação de carbono são o imposto sobre o carbono e os Sistemas de comércio de emissões (ETS). Em um imposto sobre o carbono, um preço fixo é aplicado às emissões de GEE, enquanto um ETS estabelece um limite para as emissões e permite que os emissores comprem e vendam permissões de emissão no mercado. Ou seja, os sistemas de comércio de emissões têm a vantagem de proporcionar flexibilidade econômica e ambiental, permitindo que as reduções de emissões ocorram onde for mais eficiente economicamente.

O Brasil tem se destacado no comércio internacional pela sua vasta capacidade de captação de carbono, principalmente através de suas florestas tropicais. No entanto, a implementação de um sistema de precificação de carbono no país enfrenta desafios específicos. A estrutura regulatória no Brasil ainda está em desenvolvimento, com iniciativas locais e estaduais emergindo como líderes na implementação de mecanismos de precificação de carbono, conforme indicado no relatório do ICC (2022), "É essencial que o Brasil, em sua função regulatória, apoiado por ministérios e setores, conforme definido pelo decreto 11.075, desenvolva e publique um planejamento específico para cumprir sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) e seus compromissos com o desmatamento ilegal à zero e a redução de metano".

O estudo detalhado de Santos, Angelo e Cordeiro (2021) sugere que a adoção de um mercado de carbono robusto no Brasil poderia não só ajudar a cumprir as metas nacionais de redução de emissões, mas também posicionar o país como um líder global na luta contra as mudanças climáticas.

O Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS) é frequentemente citado como o exemplo mais bem-sucedido de um ETS. Desde sua implementação em 2005, o EU ETS tem contribuído para uma redução significativa das emissões de GEE entre os países membros da UE. Segundo a European Commission Action (2013), "cerca de 45% das emissões totais de gases de efeito estufa da UE são reguladas pelo EU ETS".

Em estudos como Carvalho, Magalhaes e Domingues (2022) e Proano (2017) a precificação do carbono é uma estratégia para frear as mudanças climáticas, onde Brasil possui um grande potencial para implementar mecanismos eficazes de precificação de carbono, desafios regulatórios e estruturais precisam ser superados. A colaboração entre setores público e privado, juntamente com uma abordagem holísticas que consi-

dere as particularidades econômicas e ambientais do país, sendo ponto chave para o sucesso desta política.

No entanto, à medida que a regulamentação e a implementação de projetos de mitigação avançam, é preciso considerar não apenas a legislação, mas também os impactos ambientais específicos de certas substâncias, como os fluidos refrigerantes. Aqui, entra em cena a discussão sobre a vida útil desses fluidos na atmosfera e seu potencial de contribuição para o aquecimento global.

Estudos como o de Bruce Glazier em FDC (2023) ressaltam a importância de um mercado regulado e transparente de créditos de carbono, mas também destacam os desafios enfrentados, incluindo o risco de *greenwashing*, apropriação indevida e concentração do mercado. Nesse contexto, a transição para fluidos refrigerantes com menor impacto ambiental, como o R-32 em comparação com o R-410A, torna-se um aspecto a ser considerado, principalmente levando em consideração o tempo de permanência desses fluidos na atmosfera, conforme apresentado nas seções anteriores.

O R-410A tem um tempo de permanência na atmosfera significativamente maior em comparação com o R-32, conforme destacado na tabela 3. Isso significa que, ao longo do tempo, o R-410A contribui mais para o aquecimento global. A transição imediata para refrigerantes com menor tempo de permanência, como o R-32, é necessário para reduzir o impacto ambiental e ajudar a cumprir as metas climáticas globais.

A transição para o uso de fluidos refrigerantes com menor impacto ambiental, como o R-32, contribui não apenas para a proteção do meio ambiente, mas também para a geração de créditos de carbono comercializáveis. Esses créditos oferecem às empresas maior flexibilidade para cumprir metas de redução de emissões, ao mesmo tempo em que incentivam práticas sustentáveis. Nesse contexto, empresas que obtêm altos lucros com atividades de alta emissão de CO₂ devem destinar parte de seus recursos para apoiar organizações que adotam práticas ambientalmente responsáveis. Assim, a geração de créditos de carbono a partir do uso de fluidos refrigerantes é um exemplo de como a inovação tecnológica e a regulação ambiental podem se complementar, promovendo o desenvolvimento econômico sustentável e o combate às mudanças climáticas.

A geração de créditos de carbono, viabilizada pela adoção de fluidos refrigerantes mais sustentáveis, representa uma estratégia tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para a criação de novas oportunidades econômicas. Aplicar essas práticas em setores específicos, como os empreendimentos hoteleiros de médio porte, revela o potencial de integrar sustentabilidade e competitividade, ao transformar desafios ambientais em vantagens de mercado.

De acordo Teixeira (2016) o Análise de retorno sobre o investimento (ROI) pode ser usado como um indicador para a análise de viabilidade econômica de projeto em iniciativas voltadas à sustentabilidade, como a geração de créditos de carbono, sendo

utilizado para medir a eficiência do investimento, relacionando os ganhos obtidos ao capital investido. A fórmula 20, apresentada na seção 3.8.3 "Análise de retorno sobre o investimento (ROI)" evidencia o método para obtenção desse indicador proposto por Teixeira (2016).

Na geração de créditos de carbono, o ROI permite avaliar o retorno financeiro de ações que buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como a substituição de tecnologias menos eficientes por soluções de menor impacto ambiental, como a transição para fluidos refrigerantes de baixo Potencial de Aquecimento Global GWP e a implementação de práticas sustentáveis propostas pelo presente estudo.

Ainda de acordo com Teixeira (2016), fazendo uma adaptação do conceito a proposta do estudo em questão, a utilização do ROI em projetos de créditos de carbono pode oferecer benefícios ambientais e econômicos, que facilita a atração de investidores e a tomada de decisão estratégica, através da análise da receita potencial gerada pela comercialização de créditos de carbono no mercado regulado ou voluntário.

Segundo Binotti (2017), o ROI não apenas quantifica o retorno, mas também permite identificar gargalos e áreas de melhoria nos processos relacionados à sustentabilidade, que no contexto da geração de créditos de carbono, tal parâmetro auxilia na avaliação de fatores como o custo de implementação, a manutenção de novas tecnologias e o impacto financeiro das emissões evitadas.

Além disso, o estudo de Rigoni, Vasconcelos e Silva Junior (2018) destaca a relevância do ROI na formulação de políticas de preço na maximização de lucros no setor hoteleiro, que adaptado para a geração de créditos de carbono através de fluidos refrigerantes, reflete na importância de alinhar metas ambientais a objetivos econômicos, a nível empresarial e governamental. Logo, na geração créditos de carbono, o ROI atua como um junção entre a responsabilidade ambiental e a lucratividade empresarial, mostrando-se um indicador estratégico para organizações que visam obter lucros nas suas operações, mas são comprometidas com práticas de desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, o ROI justifica a adoção de práticas inovadoras no setor de sustentabilidade, potencializando não apenas a redução de impacto ambiental, mas também a viabilidade econômica dos projetos de transição tecnológica através de fluidos refrigerantes como o R-32.

No próximo subtópico, é explorado como esses empreendimentos podem incorporar práticas ecológicas, como a substituição de refrigerantes, para não só reduzir seu impacto ambiental, mas também atrair uma carteira de clientes cada vez mais consciente e disposta a investir em iniciativas verdes.

2.3 EMPREENDIMENTOS HOTELEIROS DE MÉDIO PORTE

Os empreendimentos hoteleiros de médio desempenham um papel significativo no desenvolvimento urbano e no fortalecimento do setor turístico das cidades, contribuindo para a diversificação da economia local e para estimular as regiões onde estão instalados. Esses empreendimentos são, muitas vezes, um ponto de equilíbrio entre grandes redes hoteleiras e pequenas pousadas, oferecendo serviços de qualidade em locais que, de outra forma, poderiam não atrair investimentos significativos.

Segundo Leite Júnior (2013), a sustentabilidade no ambiente urbano requer um planejamento que considere a minimização dos impactos ambientais enquanto promove a qualidade de vida dos cidadãos, colocando como desafio para esses hotéis, a conciliação do desenvolvimento econômico com a necessidade de práticas ambientalmente sustentáveis, uma tarefa que exige planejamento estratégico e uma visão de longo prazo.

Esses hotéis de médio porte enfrentam a complexidade de operar de maneira eficiente em um mercado cada vez mais exigente e competitivo, onde a sustentabilidade deixou de ser uma opção para se tornar uma exigência. Não se trata apenas de reduzir custos operacionais por meio de eficiência energética e uso racional de recursos, mas de adotar uma postura ativa na mitigação dos impactos ambientais, essas podendo ser adotadas através da incorporação de práticas sustentáveis desde o projeto até a operação diária. Dessa forma, esses empreendimentos não só reduzem suas pegadas de carbono, como também atraem um público cada vez mais consciente e disposto a valorizar iniciativas ecológicas.

Essa necessidade de transformação é especialmente relevante no setor da construção civil, onde os desafios de sustentabilidade são profundos e complexos. Historicamente, a construção civil, especialmente no contexto hoteleiro, tem sido responsável por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de recursos naturais.

No entanto, com a crescente demanda por construções sustentáveis, há uma urgência em adotar soluções inovadoras que minimizem esses impactos. O movimento em direção à sustentabilidade na construção civil, amplamente discutido por Ribeiro, Cruz e Carvalho Monteiro (2016), enfatiza a importância de práticas como a redução do desperdício, a conservação e reabilitação de edificações antigas, e a reciclagem e reutilização de materiais. Nesse cenário, empreendimentos hoteleiros de médio porte que adotam a construção verde não apenas se destacam por sua responsabilidade social, mas também por sua capacidade de oferecer um ambiente saudável e confortável para os hóspedes, sem comprometer o meio ambiente.

A questão da sustentabilidade em hotéis não envolve só a redução de impactos negativos, trata-se de uma abordagem ampla no gerenciamento ambiental, de acordo com Genta (2006) "para melhor administrarem tanto o uso dos recursos naturais que

estão sob ameaça crescente de escassez, quanto a emissão de gases gerados em suas instalações". Dentre as diversas formas de implementar sistemas autossustentáveis, as mais conhecidas envolvem a utilização de energia renovável, através de painéis solares ou aquecimento por biomassa, tecnologias de isolamento térmico eficientes, para a redução do consumo de energia. Mas outras técnicas também podem ser incorporadas, como a reutilização de águas cinzas, a instalação de sistemas de captação de água da chuva são estratégias eficazes para otimizar o uso da água, um recurso cada vez mais escasso.

Genta (2006) complementa que a adoção de tecnologias inovadoras, como sistemas de automação que regulam o consumo energético com base no uso do ambiente, através do cartão magnético que libera ou tranca a porta do quarto na saída do hóspede do ambiente, sendo esse um dos exemplos de como esses empreendimentos podem integrar sustentabilidade e eficiência operacional. Essas tecnologias não apenas contribuem para a redução do consumo de recursos, mas também melhoram a experiência do hóspede, que pode se beneficiar de um ambiente mais confortável e personalizado. Dessa forma, o conceito de hotelaria sustentável se amplia para incluir tanto a redução de impactos ambientais quanto a promoção do bem-estar dos hóspedes.

Para que uma hotelaria ou uma construção possa ser considerada sustentável, segundo Amazonas *et al.* (2014), "elas devem incorporar uma série de elementos que tragam benefícios econômicos, sociais, e ambientais, portanto, necessitam ter eficiência energética, gestão eficaz dos recursos naturais, e possuem elementos que repercutam em melhoria na qualidade de vida".

Além das questões técnicas e operacionais, os empreendimentos hoteleiros de médio porte devem também considerar o impacto social de suas operações, promovendo a geração de empregos locais, valorização cultural, capacitação profissional, engajamento com a comunidade e garantindo saúde e segurança, de modo a integrar práticas sustentáveis que beneficiem tanto o meio ambiente quanto a sociedade.

O estudo de Calestini (2012) argumenta que esses empreendimentos que fomentam o Mercado de Desenvolvimento Limpo (MDL) não apenas atendem à demanda habitacional, mas também estimulam a economia local por meio da geração de empregos diretos e indiretos, conforme dito na frase "geram a possibilidade de trazer uma grande quantidade de benefícios de ordem local e regional. Isso inclui benefícios ambientais, sociais e econômicos como água e ar mais limpos, geração de emprego, redução da pobreza, diminuição do desmatamento e da perda de biodiversidade, aporte de capital estrangeiro, e o acesso a tecnologias verdes". Ou seja, isso inclui desde a contratação de mão de obra local, contribuindo para o desenvolvimento econômico da região, até o respeito aos direitos trabalhistas e a promoção de condições de trabalho justas e seguras. Assim, esses hotéis podem se tornar agentes de transformação so-

cial, promovendo o desenvolvimento sustentável em todas as suas dimensões, além de fortalecer o desenvolvimento habitacional e econômico local das cidades.

Os benefícios da adoção de práticas sustentáveis em empreendimentos hoteleiros vão além da redução de custos operacionais e da melhoria da imagem pública. A geração de créditos de carbono, por exemplo, é uma oportunidade que pode ser explorada de forma estratégica. Esses créditos, resultantes da redução de emissões de gases de efeito estufa, podem ser comercializados em mercados internacionais, gerando uma nova fonte de receita para o empreendimento. A geração de créditos de carbono por sua vez é uma estratégia eficiente para promover práticas de construção sustentáveis.

Segundo Leite Júnior (2013), "incorporadores têm uma relação indireta com os custos, que são a falta de incentivos públicos para construir de forma sustentável e o fato de que, de acordo com suas percepções, o comprador não paga valor adicional pelo imóvel sustentável", sendo os créditos de carbono um mecanismo de incentivo econômico para a adoção de tecnologias verdes, possibilitando que as empresas invistam em práticas sustentáveis para obter vantagens econômicas em seus negócios, ao mesmo tempo que contribuem com o desenvolvimento sustentável. Além disso, a obtenção de certificações ambientais, como a Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), Alta Qualidade Ambiental (AQUA) ou a International Organization for Standardization (ISO) 14001, pode aumentar o valor de mercado da construção, tornando-o mais atrativo para investidores e clientes que valorizam a responsabilidade ambiental.

Outro aspecto relevante é a capacidade desses hotéis de obterem o chamado "selo verde", como o da Verra ilustrado pela figura 8 que certifica o compromisso do empreendimento com práticas sustentáveis. Esse selo não só eleva o status do hotel no mercado, mas também pode justificar a aplicação de preços mais elevados para seus serviços, dada a crescente demanda por hospedagem sustentável, assim como comprova Cunha Junior *et al.* (2012) em "muitas empresas têm buscado esse "selo verde", visando valorizar seus processos e produtos. O apelo socioambiental se torna, assim, um diferencial competitivo, capaz de atrair um público disposto a pagar mais por uma experiência de hospedagem que esteja alinhada com seus valores ecológicos e sociais.

Figura 8 – Selo de certificação da Verra



Fonte: (Verra, 2024)

Projetos de construção sustentável desempenham um papel duplo ao reduzir as emissões no setor da construção e incentivar práticas sustentáveis em outros setores como o da engenharia de refrigeração e climatização, em um período em que a busca por soluções sustentáveis e inovadoras torna-se cada vez mais urgente, e a geração de créditos de carbono surge como uma ferramenta promissora para impulsionar a construção verde e contribuir para o combate às mudanças climáticas.

No estudo de Corrêa (2009) complementa que “O primeiro passo para a sustentabilidade na construção é o compromisso das empresas da cadeia produtiva a criarem as bases para o desenvolvimento de projetos efetivamente sustentáveis”. Para que os empreendimentos de médio porte sejam bem-sucedidos, eles devem oferecer acessibilidade e atender às diversas necessidades da população. Dentre elas a acessibilidade física através da instalação de rampas, elevadores e banheiros adaptados para pessoas com deficiência, além da diversidade de unidades através da disponibilização de diferentes tamanhos e tipos de unidades para atender consumidores de vários gostos e rendas.

Além de uma infraestrutura comunitária, representada pelas áreas comuns, como parques, playgrounds e centros comunitários, que promovam a interação social e o bem-estar dos ocupantes. A ideia de tratar o bem-estar social é princípio fundamental da construção civil, retratada por Kibert (1994) e reiterada por Corrêa (2009), que o processo da construção em si proporciona entre outras coisas, uma melhoria na qualidade de vida dos habitantes, assim como gera um bem-estar social aparente, contribuindo para a ligação da sociedade com a natureza e com os ecossistemas presentes no local daquela construção. Essa ligação do homem com a natureza proporcionada pela aplicação dessas práticas derivadas dos princípios corresponde ao início de práticas do atual conceito de construção sustentável.

Os empreendimentos de médio porte geralmente incluem edifícios, que variam de 4 a 12 andares. Esses projetos podem ser construídos utilizando diversas técnicas, incluindo:

- a) Construção Convencional: Utilizando materiais como concreto, aço e alvenaria. É a técnica mais comum, conhecida pela sua durabilidade e resistência.
- b) Construção Pré-fabricada: Empregando módulos ou painéis pré-fabricados que são montados no local. Esta técnica reduz o tempo de construção e gera menos resíduos.
- c) Construção Sustentável: Incorporando práticas e materiais ecológicos, como sistemas de energia renovável, isolamento eficiente e gestão sustentável de recursos hídricos e de resíduos.

A escolha de materiais e técnicas de construção sustentáveis contribuem para reduzir o impacto ambiental dos empreendimentos. Logo, a crescente conscientização sobre a proteção ambiental e práticas de baixo carbono tem incentivado a incorporação

de materiais sustentáveis e o uso de recursos recicláveis em diversas áreas, inclusive na educação. De acordo com Sun, Ding *et al.* (2022), na construção civil, por exemplo, há uma tendência crescente dos consumidores em optar por edifícios que promovam a eficiência energética e técnicas de construção sustentáveis, como os edifícios verdes e pré-fabricados. Por mais, materiais reciclados como madeira de reflorestamento, tintas e revestimentos ecológicos, sistemas de captação de água da chuva, energia solar e fluidos refrigerantes ecologicamente corretos são apenas alguns exemplos de soluções que são cada vez mais implementadas para minimizar a geração de carbono das construções.

A transição para práticas sustentáveis na hotelaria de médio porte também reflete uma mudança de padrão, onde Genta (2006) afirma que "o novo paradigma do turismo sustentável considera a autenticidade cultural, a inclusão social, a conservação do meio ambiente e a qualidade dos serviços como peças fundamentais para a viabilidade econômica do turismo a longo prazo, num processo de desenvolvimento integrado", complementado por Schenini, Lemos e SILVA (2005), trazendo que o desenvolvimento sustentável "tem levado as empresas a tomar medidas, provocando mudanças de valores, de paradigmas e em sua operacionalização. Elas vêm se adequando as exigências da preservação pela utilização de técnicas que visam a utilização racional de recursos e que evitam a poluição". Ao optar por soluções que minimizem o impacto ambiental como a utilização de fluidos sustentáveis, os hotéis se posicionam como líderes em um movimento mais amplo de transformação do setor. Essa postura proativa não só contribui para a preservação do meio ambiente, mas também fortalece a resiliência do empreendimento frente às mudanças climáticas e às exigências de um mercado em constante evolução.

Portanto, é importante considerar que a sustentabilidade em empreendimentos hoteleiros de médio porte não deve ser vista apenas como uma estratégia de marketing ou uma resposta às demandas regulatórias. Ela deve ser incorporada à cultura organizacional, permeando todas as decisões estratégicas e operacionais do hotel. Somente assim esses empreendimentos poderão garantir sua longevidade e sucesso em um mundo onde a sustentabilidade é cada vez mais uma condição indispensável para a sobrevivência e a prosperidade.

O próximo tópico descreve a metodologia da pesquisa, para posteriormente, apresentar os resultados e discussões da pesquisa.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve a metodologia adotada para avaliar a viabilidade econômica e ambiental da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Sendo abordadas as etapas da pesquisa, incluindo a classificação da abordagem exploratória e quantitativa, a coleta e padronização de equipamentos do empreendimento estudado, o cálculo do volume de gás e do potencial de CO₂ associado aos fluidos R-410A e R-32, além da análise de viabilidade econômica, considerando custos, receitas de créditos de carbono e retorno sobre o investimento (ROI), para por fim, conduzir uma análise de sensibilidade avaliando o efeito das variáveis da pesquisa, tais como o valor dos créditos de carbono, taxa de vazamento dos fluidos, valor dos fluidos refrigerantes, seguida por uma análise de diluição do custo do projeto em um ou mais empreendimentos hoteleiros.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho de conclusão de curso está inserido na área de Engenharia da Sustentabilidade, com foco na subárea de Produção mais Limpa e Ecoeficiência, conforme as diretrizes da Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO).

A Engenharia da Sustentabilidade busca desenvolver soluções tecnológicas que promova a sustentabilidade ambiental, econômica e social. Nesse contexto, a Produção mais Limpa (P+L) através de fluidos refrigerantes mais sustentáveis e ecológicos, apresenta uma estratégia de prevenção ambiental aplicada aos processos produtivos e de consumo, como produtos e serviços, visando aumentar a eficiência e reduzir os riscos ao ser humano e ao meio ambiente. A Ecoeficiência, por sua vez, busca combinar eficiência econômica e ecológica, criando mais valor com menos impacto ambiental para a indústria, usuário e sociedade.

Este trabalho de conclusão de curso está classificado como um estudo de caso pois aborda detalhadamente a implementação e os impactos da utilização de fluidos refrigerantes sustentáveis (R-32) e não sustentáveis (R-410A) em empreendimentos hoteleiros de médio porte, através de uma análise das características e opções de tecnologia para objeto de estudo. Onde, por consequência a viabilidade de implantação da tecnologia e resultados dessa prática e estratégia mercadológica poderão proporcionar uma compreensão parcial sobre o mercado de geração de créditos de carbono através de fluidos refrigerantes.

A pesquisa em apreço é caracterizada por uma abordagem quantitativa que permite a análise de dados numéricos para avaliar o impacto ambiental da substituição de fluidos refrigerantes tradicionais por opções mais sustentáveis, bem como os impactos econômicos para as empresas que desejam adotar tais tecnologias. Foram coletados dados referentes à aceitação de mercado para novas tecnologias, eficiência

energética, custos de aquisição e reduções de emissões de carbono dos sistemas de climatização utilizados nos empreendimentos estudados. Tais dados serão analisados através de técnicas quantitativas para validar as opções propostas.

O caráter descritivo deste estudo reside na intenção de detalhar e descrever as práticas adotadas na substituição de fluidos refrigerantes, os benefícios alcançados em termos de geração de crédito de carbono e os desafios enfrentados durante a implementação. A descrição minuciosa das etapas, processos e resultados obtidos fornecem uma visão abrangente e detalhada do estudo de caso, contribuindo para a compreensão da aplicabilidade e eficácia das práticas sustentáveis analisadas.

3.2 COLETA DE DADOS

A análise de viabilidade de geração de créditos de carbono através dos fluidos refrigerantes utilizados nos empreendimentos hoteleiros de médio porte seguiu uma sequência metodológica para o levantamento de dados que foram tratados e analisados para responder os objetivos do presente estudo.

A coleta de dados, realizada com 15 (quinze) técnicos de instalação da região de Florianópolis-SC, teve como objetivo identificar os fluidos refrigerantes, máquinas e práticas mais utilizadas em instalações hoteleiras de médio porte, sendo conduzida através de formulários online, especificamente pelo Google Forms. O processo adotado, visou garantir o sigilo de cada uma das partes, reduzir a invasão e a pressão do entrevistador sobre os participantes e assegurar uma amostragem mínima e confiável, trazendo uma porção representativa para as partes interessadas (investidor, construtor, projetista, instaladores e usuário final), que utilizarão este estudo para orientar suas decisões sobre tecnologias de fluidos refrigerantes.

Foi desenvolvido um questionário, composto por 10 (dez) perguntas específicas que abordam diversos aspectos do uso de fluidos refrigerantes, tipos de máquinas e práticas de instalação e manutenção. O questionário é estruturado para capturar tanto dados quantitativos quanto qualitativos, através de campos que o entrevistado pode relatar suas experiências, permitindo uma análise detalhada das respostas e perspectivas diversas.

As perguntas foram formuladas para investigar quais fluidos refrigerantes são mais frequentemente utilizados, os tipos de máquinas e sistemas de refrigeração mais comuns, as ocorrências de vazamentos e falhas, bem como as práticas de manutenção e o descarte de fluidos adotados pelos profissionais do setor. O questionário inclui perguntas fechadas, de múltipla escolha, e abertas, para permitir os entrevistados pudessem fornecer detalhes adicionais conforme necessário. As perguntas foram elaboradas a partir da revisão de literatura e da experiência do pesquisador na área.

As perguntas incluídas no formulário de técnicos e instaladores são:

1	Qual tipo de sistema de refrigeração você mais instala em casa e apartamentos?
a) b) c) d) e)	Split System Hi-Wall Multi Split System VRF (Variable Refrigerant Flow) Chiller Outro
2	Qual fluidos refrigerantes é mais utiliza durante a instalação e manutenção de sistemas de climatização?
a) b) c) d) e)	R-22 R-410A R-32 R-134a Outro (por favor, especifique)
3	De acordo com a sua experiência,para o equipamento do tipo Split Hi-Wall, em quanto tempo ele apresenta problemas ou chega ao fim da sua vida útil?
a) b) c) d) e)	Até 5 anos Entre 5 e 10 anos Entre 10 e 15 anos Entre 15 e 20 anos Acima de 20 anos
4	Quando esse problema se apresenta, qual os dois principais problemas encontrados?
a) b) c) d)	Vazamento de gás refrigerante Defeito em componentes mecânicos Placa ou circuito eletrônico com problemas Furto da tubulação de cobre
5	Quando o produto apresenta defeito em relação aos componentes mecânicos, ocorre vazamento de gás do sistema?
a) b) c) d) e)	Sempre Muitas vezes Às vezes Raramente Nunca
6	Na manutenção ou descarte de um equipamento de ar condicionado do tipo Split Hi-Wall, você costuma recolher o fluido refrigerante?
a) b) c) d)	Sempre Muitas vezes Às vezes Raramente

e)	Nunca
7	Você acredita que outros profissionais de refrigeração costumam recolher o fluido refrigerante dos equipamentos de ar condicionado do tipo Split Hi-Wall?
a)	Sempre
b)	Muitas vezes
c)	Às vezes
d)	Raramente
e)	Nunca
8	Você acredita que os fluidos refrigerantes liberados no ar, causam impacto ambiental?
a)	Sim
b)	Não
c)	Não sei
9	Você sabe o que significa a sigla ODP e GWP presente nos equipamentos de refrigeração e garrafas de fluido refrigerante? (Não pesquise o que significa a sigla, isso é apenas um estudo)
a)	Sim
b)	Não
10	Caso você realize o recolhimento de fluido refrigerante nas suas manutenções e descarte de equipamentos de ar condicionado do tipo Split Hi-Wall, descreva como são feitas.
a)	Resposta aberta

O questionário foi encaminhado através de um formulário online usando a plataforma de pesquisa *Google Forms*, sendo essa a plataforma escolhida devido à sua facilidade de uso e ferramentas integradas para análise de dados. O formulário foi configurado para garantir a anonimidade dos respondentes, incentivando respostas honestas e precisas.

A distribuição do formulário aconteceu através de uma lista de contatos de profissionais do setor de climatização, focada em técnicos e instaladores. Esta lista foi obtida através de redes de contatos. Uma mensagem personalizada foi enviada a cada contato, explicando o propósito da pesquisa, a importância da sua participação e instruções claras sobre como acessar e completar o questionário.

A coleta de dados ocorreu em um período de duas semanas, correspondendo à última semana do mês de Agosto de 2024 e a primeira de Setembro de 2024, permitindo que os profissionais respondessem ao questionário, ficando sempre disponível para responder a quaisquer dúvidas ou preocupações dos participantes.

Após a coleta de dados, os dados foram tratados diretamente pela própria plataforma *Google Forms*, para a análise posterior, sendo a mesma constituída basicamente pelo cálculo do percentual de respostas para cada alternativa das perguntas fechadas

e na transcrição das respostas abertas em formato de texto. Não houve necessidade de exportação para softwares adicionais, como o Excel, uma vez que a plataforma fornece os dados organizados e prontos para serem interpretados, onde nas respostas abertas, realizou-se uma categorização para identificar temas comuns e obter informações qualitativas sobre as práticas e preferências dos profissionais.

Os resultados dessa fase de coleta de dados forneceram uma visão detalhada dos fluidos refrigerantes, máquinas e práticas mais utilizadas em projetos hoteleiros de médio porte. Esses dados são essenciais para as etapas subsequentes da pesquisa, de modo que orientaram a busca por um projeto modelo, bem como na escolha das máquinas que passaram a ser utilizadas nas etapas de cálculo de volume mássico de fluido, bem como é abordado na etapas seguintes deste documento.

3.3 OBJETO DE ESTUDO DE CASO

O presente estudo foi realizado em um empreendimento hoteleiro de médio porte localizado na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. Sendo o projeto executivo (liberado para obra), arquitetônico e mecânico do empreendimento hoteleiro de médio porte fornecido por uma empresa de engenharia da região. Entretanto, se faz necessário resguardar as características chave que possam identificar o empreendimento, assim como a empresa que contratou e forneceu o projeto.

A empresa de engenharia responsável pelo projeto é especializada em serviços de consultoria em projetos, destacando-se por sua expertise em diversas áreas do mercado da construção civil. Atua em uma variedade de setores, abrangendo desde projetos residenciais, industriais e iniciativas no setor público, incluindo arquitetura, infraestrutura, energia, tecnologia da informação, saúde, refrigeração, climatização, hidrossanitário, elétrica e meio ambiente. Sua atuação diversificada permite uma abordagem multidisciplinar na resolução de desafios complexos e no desenvolvimento de soluções inovadoras para seus clientes, alinhados à tecnologia BIM para oferecer integração entre todas as etapas de projetos e objetivando fornecer soluções eficientes para os seus clientes.

O empreendimento hoteleiro de médio porte selecionado, é composto por 94 (noventa e quatro) unidades habitacionais, com áreas construídas variando entre 30 a 100 metros quadrados, composto ainda por ambientes de convivência comum, como área fitness, salão de festas, hall de entrada e zeladoria, construído entre os anos de 2024 e 2025.

Os moradores/locadores desses empreendimentos hoteleiros de médio pertencem a uma faixa socioeconômica média-alta, o que influencia diretamente às escolhas em termos de eficiência energética e custo dos sistemas de climatização, dotada a região metropolitana de um desenvolvimento econômico moderado, com um mercado imobiliário em expansão e crescente, que demanda por soluções sustentáveis e tecno-

lógicas.

Os sistemas de climatização utilizados nos empreendimentos hoteleiros de médio porte incluem principalmente Split Systems, onde os fluidos refrigerantes mais comuns são o R-410A e R-32, com esforços contínuos para substituir os refrigerantes de maior GWP por alternativas mais sustentáveis.

3.4 LEVANTAMENTO DOS DADOS DO EMPREENDIMENTO

A partir do fornecimento do projeto dentro do *Software* comercial Revit Technology Corporation (REVIT), no qual fez-se a extração dos dados para o Excel, analisando as pranchas e listas de componentes do sistema de climatização projetado para o empreendimento hoteleiro padrão, utilizado nesse presente estudo. O processo de medição da linha de cobre da instalação de climatização é inteiramente manual, iniciando a partir da identificação das unidades habitacionais e suas características, seleção individual de cada componente do sistema, sendo ele um equipamento mecânico, tubulação, acessório de conexão e até mesmo uma caixa de passagem de tubulações, compreendendo a realização posterior das contas para a totalização, no que os processos em sua sequência foram:

- a) Identificação dos andares e das unidades habitacionais
- b) Identificação da natureza do ambiente
- c) Área do ambiente [m²]
- d) Capacidade térmica especificada pelo projeto [BTU/h]
- e) Equipamento e sua capacidade térmica especificada [BTU/h]
- f) Número de equipamentos no ambiente (NE)
- g) Andares que o equipamento se repete (RA)
- h) Comprimento linear de tubulação frigorígena (CL)
- i) Número de curvas que existe na tubulação frigorígena (NC)

A escolha destes parâmetros se deu em função da análise necessária para documentar e levantar as necessidades de climatização do ambiente, ou seja, a identificação dos andares e das unidades habitacionais se faz necessária para determinar quais ambientes necessitam de climatização, a natureza do ambiente influencia os cálculos em função da carga liberada pelas pessoas e pelos equipamentos deste, além da necessidade e volume de renovação de ar que tal atividade requer, a área e disposição influencia na carga térmica em função da exposição do ambiente à transferência de calor por exposição ao sol ou a outros ambientes não climatizados.

A capacidade térmica do projeto, por sua vez, irá determinar quantos e quais equipamentos serão especificados para o ambiente, podendo esse equipamento ser

multiplicado na contabilidade geral do volume de fluido refrigerante, em função dos andares tipo.

O comprimento de tubulação de cobre e o número de curvas do sistema de climatização serão utilizados nos cálculos de volume de massa, conforme detalhado nas seções seguintes de cálculo, sendo o parâmetro ideal para análise conforme as fabricantes de ar-condicionado.

Os diâmetros de tubulação não serão utilizados para base de cálculo, além do comprimento da linha equivalente ser definido como o valor médio entre a tubulação de líquido e a tubulação de sucção da linha frigorígena para a determinação do volume de massa presente no sistema de acordo com a capacidade de climatização do equipamento.

3.5 PADRONIZAÇÃO DOS DADOS DO EMPREENDIMENTO

Para a análise das quantidades de CO₂ geradas pelos sistemas de climatização do empreendimento, foi necessário padronizar os dados (capacidade, carga padrão, carga adicional, IDRS, custo de aquisição) referentes aos equipamentos de ar-condicionado Hi-wall instalados. Esse processo de padronização é fundamental para garantir a confiabilidade dos cálculos e a precisão dos resultados. O primeiro passo, envolveu um levantamento detalhado das principais marcas de ar-condicionado Hi-wall disponíveis no mercado brasileiro, onde foram analisados diversos modelos com capacidades de climatização diversos, que pudessem atender ao requisito mínimo de climatização e comprimento máximo de tubulação, conforme orientado no projeto detalhado de mecânica do empreendimento.

Dentre os equipamentos que foram levantados os dados para padronização estão os de capacidade de climatização de, 12.000 BTU/h, 18.000 BTU/h e 24.000 BTU/h. Para cada modelo, foram coletados dados técnicos importantes, como:

- a) Comprimento padrão de linha frigorígena (CPL) [m]
- b) Carga padrão de fluido refrigerante (CPF) [Kg]
- c) Carga adicional de fluido (CAF) [Kg/m]
- d) Tipo de fluido refrigerante
- e) IDRS
- f) Valor de aquisição unitário (VAU) [R\$/un]

Para uma amostra com mínimas influências sobre variação de mercado, adotou-se para a análise equipamentos de alta tecnologia e valor agregado, sendo essa faixa de produtos com valor mais elevado, menos suscetível à variações econômicas em função de promoções ou poder aquisitivo de seus usuários. Essa etapa foi destacada por um processo de pesquisas de mercado via internet, em sites de referência na comer-

cialização de equipamentos voltados a refrigeração e climatização para identificação dos modelos e valores praticados pelo mercado.

Complementarmente, a etapa contou com a busca direta em site dos fabricantes dos modelos selecionados, extraindo os dados de catálogos técnicos, catálogos de engenharia, manuais de instalação ou operação e plataformas de avaliação e certificação de produtos como o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). O processo de padronização contou com o levantamento de 3 (três) modelos diferentes de equipamento para cada capacidade de climatização e cada tipo de fluido refrigerante utilizado, totalizando o levantamento de 18 (dezoito) equipamentos, sendo todos cotados na primeira semana do mês de Outubro de 2024.

Com dados levantados, aplicou-se a média nos valores dos dados técnicos computados, onde essa média padronizada permitiu a criação de um modelo representativo do mercado, que foi utilizado para calcular a emissão potencial de CO₂ de cada faixa de capacidade de climatização dos equipamentos, levando em consideração a quantidade de fluido refrigerante utilizado.

3.6 VOLUME DE GÁS E POTENCIAL DE CO₂ DO EMPREENDIMENTO

O cálculo do volume de gás necessário para o empreendimento foi realizado com base no levantamento detalhado do comprimento total das linhas de tubulação previstas na instalação. Este levantamento incluiu a medição precisa de cada segmento de tubulação, as características específicas de cada equipamento de climatização envolvido no projeto, bem como a quantidade de equipamentos previstos.

Cada equipamento, conforme fornecido pela fábrica, possui uma carga padrão de gás, sendo essa estabelecida para um comprimento máximo de tubulação. No entanto, a quantidade de gás necessária aumenta proporcionalmente ao comprimento de tubulação instalado além daquele admitido pela carga padrão. Portanto, para determinar o volume total de gás necessário, foi essencial definir a distância padrão de tubulação.

O catálogo de engenharia dos equipamentos de climatização informa o método de cálculo do dimensionamento de carga adicional a ser inserida no sistema, sendo no presente estudo, a mesma definida pelo comprimento de linha adicional ao padrão de carga e, com essa preposição definida, os cálculos realizados serão apresentados na sequência, sendo as fórmulas apresentadas, adaptações de documentos técnicos, manuais de engenharia e livros de autores como Daikin (2024), TRANE (2024), Arora (2012) e Cengel, Boles e Kanoğlu (2011).

Comprimento linear das curvas (CLC) é determinado pelo número de curvas e multiplicado pelo valor padrão de curva em 0,05m para simplificação dos cálculo, sendo sua fórmula dada pela equação 1:

$$CLC [m] = NC \times 0,05m \quad (1)$$

Comprimento externo à linha de espera (CEL) é determinado e função da necessidade de encaminhamento da linha entre a caixa de passagem interna e a evaporadora, bem como pela conexão entre a caixa de passagem externa e a condensadora, sendo essa necessitada de um sifão em função dos comprimentos excessivos, a fórmula será dada pela equação 2:

$$CEL [m] = 2m \quad (2)$$

Comprimento total de tubulação (CTT) é definido como a soma dos comprimentos lineares de tubulação, de curvas e externos a linha de espera, sendo sua fórmula dada pela equação 3:

$$CTT [m] = CL + CLC + CEL \quad (3)$$

Comprimento excedido de tubulação (CET) é definido pela diferença entre o comprimento total de tubulação e o comprimento padrão de linha admitido pelo equipamento em função da carga padrão de fluido refrigerante, sendo sua fórmula dada pela equação 4:

$$CET [m] = CTT - CPL \quad (4)$$

Carga adicionada de fluido refrigerante unitária (CAU) é dada em função da carga adicional de fluido refrigerante para cada metro do comprimento excedido de tubulação se, e somente se, o valor de (CET) for positivo, onde sua fórmula pode ser definida pela equação 5:

$$CAU [Kg] = CAF \times CET \quad (5)$$

Carga adicionada total de fluido refrigerante do ambiente (CATA) é dada pela carga adicionada de fluido refrigerante unitária em função do número de equipamentos no ambiente, e em quantos andares esse ambiente se repete no empreendimento, definindo-se pela equação 6:

$$CATA [Kg] = CAU \times NE \times RA \quad (6)$$

Carga total adicionada no empreendimento (CTAE) é o somatório de todas as cargas totais adicionadas de fluido refrigerante por ambientes do empreendimento, sendo a fórmula dada pela equação 7:

$$CTAE [Kg] = \sum_{i=1}^n CATA \quad (7)$$

Carga padrão total do ambiente (CPTA) é dada pela carga padrão de fluido refrigerante unitária em função do número de equipamentos no ambiente, e em quantos andares esse ambiente se repete no empreendimento, definindo-se pela equação 8:

$$CPTA [Kg] = CPF \times NE \times RA \quad (8)$$

Carga padrão total do empreendimento (CPTE) é o somatório de todas as cargas padrões de fluido refrigerante advindas de fábrica por ambientes do empreendimento, sendo a fórmula dada pela equação 9:

$$CPTE [Kg] = \sum_{i=1}^n CPTA \quad (9)$$

Carga total de fluido do empreendimento (CTFE) é a soma entre a carga padrão total do empreendimento e a carga total adicionada no empreendimento, representando toda a carga de fluido refrigerante da instalação do sistema de climatização previsto para o mesmo, dado pela equação 10;

$$CTFE [Kg] = CPTE + CTAE \quad (10)$$

Custo de aquisição por ambiente (CAA) é dada pelo custo de aquisição dos equipamentos de cada ambiente unitário em função do número de equipamentos no ambiente, e em quantos andares esse ambiente se repete no empreendimento, definindo-se pela equação 11:

$$CAA [R\$] = VAU \times NE \times RA \quad (11)$$

Custo de aquisição total do empreendimento (CATE) é o somatório de todos os custos de aquisição de equipamento por ambientes do empreendimento, sendo a fórmula dada pela equação 12:

$$CATE [R\$] = \sum_{i=1}^n CAA \quad (12)$$

3.7 POTENCIAL DE CO₂ DO FLUIDO DE ESTUDO

O potencial de CO₂ gerado por cada kg de fluido refrigerante utilizado no empreendimento é calculado em várias etapas, onde a primeira é a seleção dos fluidos refrigerantes que é objeto do estudo. Para este trabalho, o foco se deu principalmente no R-410A e no R-32, conforme mencionado nos objetivos específicos.

A partir de informações técnicas detalhadas sobre os fluidos refrigerantes, como massa instalada no sistema de climatização previsto (kg) e potencial de aquecimento global (GWP) advindos de fichas técnicas de fabricantes como Gree, Daikin, Samsung,

Fujitsu, TCL e LG. O cálculo de potencial de aquecimento global (GWP) em virtude da adoção de um fluido mais sustentável pode ser obtido, sendo esse cálculo um reflexo da capacidade de um fluido refrigerante reter calor na atmosfera, quando comparado ao dióxido de carbono (CO₂).

Tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂E) representa a quantidade equivalente de CO₂ emitido pela instalação através dos seus fluidos refrigerantes, sendo uma conversão direta do GWP, sendo a fórmula dada pela equação 13:

$$tCO_{2E} [t] = \frac{CTFE \times GWP}{1000} \quad (13)$$

Com os potenciais de CO₂ gerados por cada kg de fluido refrigerante calculados, é possível comparar os resultados entre os fluidos, permitindo avaliar qual fluido tem um menor impacto ambiental em termos de emissões equivalentes de CO₂, por consequência também é possível obter a diferença de emissão em função da escolha do fluido R-32 para a substituição do R-410A.

Tonelada de dióxido de carbono não emitidas pela instalação (tCO₂D) representa a quantidade de toneladas de CO₂ que deixaram de ser emitidas pela instalação de climatização em função da substituição do fluido R-410A pelo R-32, sendo a fórmula dada pela equação 14:

$$tCO_{2D} [t] = tCO_{2E,R410A} - tCO_{2E,R32} \quad (14)$$

Tonelada de dióxido de carbono não vazadas em 20 anos (tCO₂v) é dada em função dos vazamentos de fluido refrigerante ao longo do tempo, decorrente de falhas em seu sistema de tubulação, quebras mecânicas, manutenções ou substituição do equipamento por tempo de uso, onde ela é calculada em cima da diferença de toneladas de CO₂ emitidas por cada tipo de tecnologia de fluido refrigerante, sendo definida pela fórmula dada pela equação 15:

$$tCO_{2v} [t] = (tCO_{2D} \times COv \times 20) + (CO_r \times tCO_{2v} \times 2) \quad (15)$$

Onde:

Correção por vazamento (CO_v) representa a taxa de vazamento anual de fluido refrigerante de um sistema de climatização do tipo split Hi-wall pela Makhnatch e Khodabandeh (2014), ou seja, 20 representa os anos em que ocorrerão os vazamentos de fluido refrigerante.

Correção por reciclagem (CO_r) representa a taxa de reaproveitamento de fluido refrigerante reciclado na operação de troca de equipamento a cada 10 anos, de acordo com AIRAH (2012) está em 70%, logo o que é liberado no meio ambiente é 30%, ou seja, 2 representa o número de conjuntos novos de sistema de climatização utilizados no período de 20 anos.

3.8 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para avaliar a viabilidade econômica da geração de créditos de carbono, foram considerados os seguintes fatores descritos nas subseções a seguir:

3.8.1 Custos da implementação

- a) Custos de aquisição dos equipamentos (CAE) com fluidos refrigerantes de baixo GWP, sendo diretamente definido como a diferença entre o custo de instalação total dos equipamentos de tecnologia R-410A e o custo de instalação total dos equipamentos dotados de tecnologia R-32, com o valor de aquisição disposto através do levantamento de equipamentos, conforme detalhado em seções anteriores. Esse custo ainda leva em conta a necessidade de troca do equipamento a cada 10 (dez) anos, ou seja, 2 (duas) trocas no período de análise de 20 anos do presente estudo, dado pela dada pela equação 16:

$$CAE [R\$] = (CATE_{R32} - CATE_{R410A}) \times 2 \quad (16)$$

- b) Custos de instalação dos equipamentos (CIE) em função da carga adicional do fluido refrigerante no sistema de climatização do empreendimento de estudo, um custo sendo diretamente definido como a diferença do custo de aquisição das diferentes tecnologias de fluidos, com valores médios de mercado sendo obtidos através de consultas na internet em grandes fornecedores, ele também leva em conta a necessidade de troca do equipamento a cada 10 anos, ou seja, 2 trocas no período de análise de 20 anos conforme descrito nas seções anteriores, dada pela equação 17:

$$CIE [R\$] = (CACAI_{R32} - CACAI_{R410A}) \times 2 \quad (17)$$

Onde o Custo de aquisição de carga adicional da instalação ($CACAI$), é o custo atrelado à carga de fluido refrigerante necessária em função do comprimento de tubulação excedidos além do padrão de carga estabelecido de fábrica, dado em função do Custo da quilograma do fluido refrigerante à preço de mercado ($CACA$), dada pela equação 18:

$$CACAI [R\$] = CACA \times CTAE \quad (18)$$

O $CACA$, foi obtido através de uma pesquisa na internet com grandes fornecedores de insumos para a refrigeração e climatização, sendo um valor

médio para os fluidos de estudo para a primeira semana do mês de outubro de 2024.

- c) Custos de manutenção dos equipamentos (CME) em função dos vazamentos de fluido refrigerante ao longo do tempo, decorrente de falhas em seu sistema de tubulação, quebras mecânicas, manutenções ou substituição do equipamento por tempo de uso, sendo uma diferença direta entre a aquisição das diferentes tecnologias de fluido refrigerantes do presente estudo, dada pela equação 19:

$$CME [R\$] = (CTFE \times tCO_{2,v} \times (20-2) \times CACA_{R32}) - (CTFE \times tCO_{2,v} \times (20-2) \times CACA_{R410A}) \quad (19)$$

É de suma importância destacar que os custos atrelados à mão de obra para instalação e manutenção não se fazem necessários para os cálculos de custos, tendo em vista que ambas serão necessárias independentemente do tipo de tecnologia de fluido refrigerante adotado para o empreendimento, logo a computação das mesmas será nula.

Outro ponto é o projeto de geração de crédito de carbono, discutido com maior nível de detalhes na seção de resultados do presente estudo, popularmente conhecido como PDD ou Documento de Concepção do Projeto. Conforme destacado nas delimitações, o PDD em si não é um custo direto nesse presente estudo, tendo em vista que o objetivo do mesmo é maximizar a receita de projetos já existentes, que se utilizam da eficiência energética ou até mesmo redução do impacto da cadeia produtiva dos materiais utilizados dentro da construção civil, para então gerar créditos de carbono e tornar a construção ecologicamente sustentável.

3.8.2 Receitas provenientes da geração de créditos de carbono

O levantamento do número de créditos de carbono gerado pela instalação do sistema de climatização no empreendimento foi conduzido em duas etapas distintas. A primeira etapa envolveu a avaliação dos equipamentos de climatização e suas respectivas cargas padrão de gás, conforme especificações de fábrica. Nesta fase, foram consideradas as quantidades de gás refrigerante contidas originalmente em cada equipamento, fornecidas pelo fabricante.

A segunda etapa do levantamento focou na quantidade adicional de gás necessária devido à extensão da tubulação de cobre instalada além dos componentes padrão de fábrica. Para cada metro adicional de tubulação, foi determinada a quantidade correspondente de gás refrigerante que precisaria ser adicionada ao sistema, com base nas especificações técnicas e padrões de instalação, conforme descrito

nas seções anteriores e detalhadas ainda mais nas seções de execução do presente estudo.

Uma vez determinadas as massas totais de gás refrigerante para os dois principais fluidos utilizados no empreendimento, o R410-A e o R-32, foi realizada a conversão dessas massas para a quantidade equivalente de dióxido de carbono (CO₂). Para essa conversão foram utilizados os dados de Potencial de Aquecimento Global (GWP) específico para cada fluido refrigerante, expresso em kg de CO₂ equivalente por kg de refrigerante, retirados de Daikin (2024) e TRANE (2024).

Para o R410-A, foi utilizado o valor de GWP correspondente, e de forma similar, foi aplicada a conversão para o R-32, considerando o respectivo GWP. Com esses dados, é possível calcular o impacto ambiental da instalação de climatização em termos de emissões de CO₂ equivalentes, e, conseqüentemente, determinar o número de créditos de carbono gerados pela instalação, considerando a mitigação de emissões proporcionada pelo sistema.

- a) Preço dos créditos de carbono no mercado (VC) [R\$/t]
- b) Receita da geração de créditos de carbono (RC) em função das toneladas de CO₂ não emitidas pela instalação (tCO_{2D}), das toneladas de CO₂ vazadas em 20 anos (tCO_{2v}) e do valor praticado pelo preço de crédito de carbono por tonelada de CO₂ que deixam de ser emitidas ou que são capturadas da atmosfera, dada pela equação 20:

$$RC = (tCO_{2D} + tCO_{2v}) \times VC \quad (20)$$

Para a execução deste estudo, foi realizado um levantamento detalhado do preço do crédito de carbono em plataformas de investimento, onde esses créditos são comercializados de forma semelhante a ações ou fatias de empresas. O processo de levantamento foi dividido em etapas específicas, conforme descrito a seguir:

- a) Identificação das Principais Plataformas de Investimento: Identificação e seleção das principais plataformas digitais de negociação de créditos de carbono, tanto no mercado regulado quanto no mercado voluntário.
- b) Coleta de Dados Históricos e Atuais de Preços: Foram coletados dados históricos e atuais sobre os preços dos créditos de carbono, sendo esses dados informações sobre a variação de preços ao longo do tempo.
- c) Análise Comparativa de Preços: Com os dados em mãos, desenvolveu-se uma análise comparativa entre as diferentes plataformas e mercados. Essa análise buscou identificar padrões de preços e entender como diferentes fatores impactam o valor do crédito de carbono.
- d) Consolidação dos Resultados e Implicações para o Estudo: Por fim, os resultados dessa pesquisa de preços foram consolidados e integrados à análise

geral do estudo, fornecendo base para o estudo de viabilidade econômica da geração de créditos de carbono em empreendimentos hoteleiros de médio porte. A partir disso, sendo possível determinar o impacto potencial da comercialização desses créditos nas receitas dos empreendimentos e na atratividade do investimento em tecnologias sustentáveis.

3.8.3 Análise de retorno sobre o investimento (ROI)

A ROI do presente estudo, visou avaliar a viabilidade econômica da geração de créditos de carbono através da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte. O ROI é calculado para determinar a relação entre o custo do investimento nas novas tecnologias sustentáveis e os benefícios financeiros gerados, incluindo a receita obtida com a comercialização dos créditos de carbono.

O primeiro passo na análise de ROI foi a identificação e quantificação de todos os custos envolvidos na substituição dos fluidos refrigerantes, sendo essa etapa já descrita na seção 1 do presente subcapítulo da metodologia, já a segunda etapa envolveu a estimativa das receitas e benefícios que foram gerados pelo investimento.

Com os custos e receitas identificados e quantificados, o ROI é calculado utilizando a equação 21:

$$ROI = \left(\frac{Receita - Custos}{Custos} \right) \times 100 \quad (21)$$

Aqui, a receita líquida do investimento é a diferença entre as receitas totais geradas pelos créditos de carbono e economias operacionais, subtraindo os custos totais do investimento, sendo assim, o resultado do ROI indica o percentual de retorno sobre o valor investido no presente empreendimento hoteleiro de médio porte.

Uma análise de sensibilidade, é feita avaliando como as flutuações no preço dos créditos de carbono, preço dos equipamentos e preço do gás refrigerante que podem impactar o ROI. A análise de sensibilidade ajuda a identificar os riscos associados ao investimento e a confiabilidade do retorno projetado em diferentes condições de mercado.

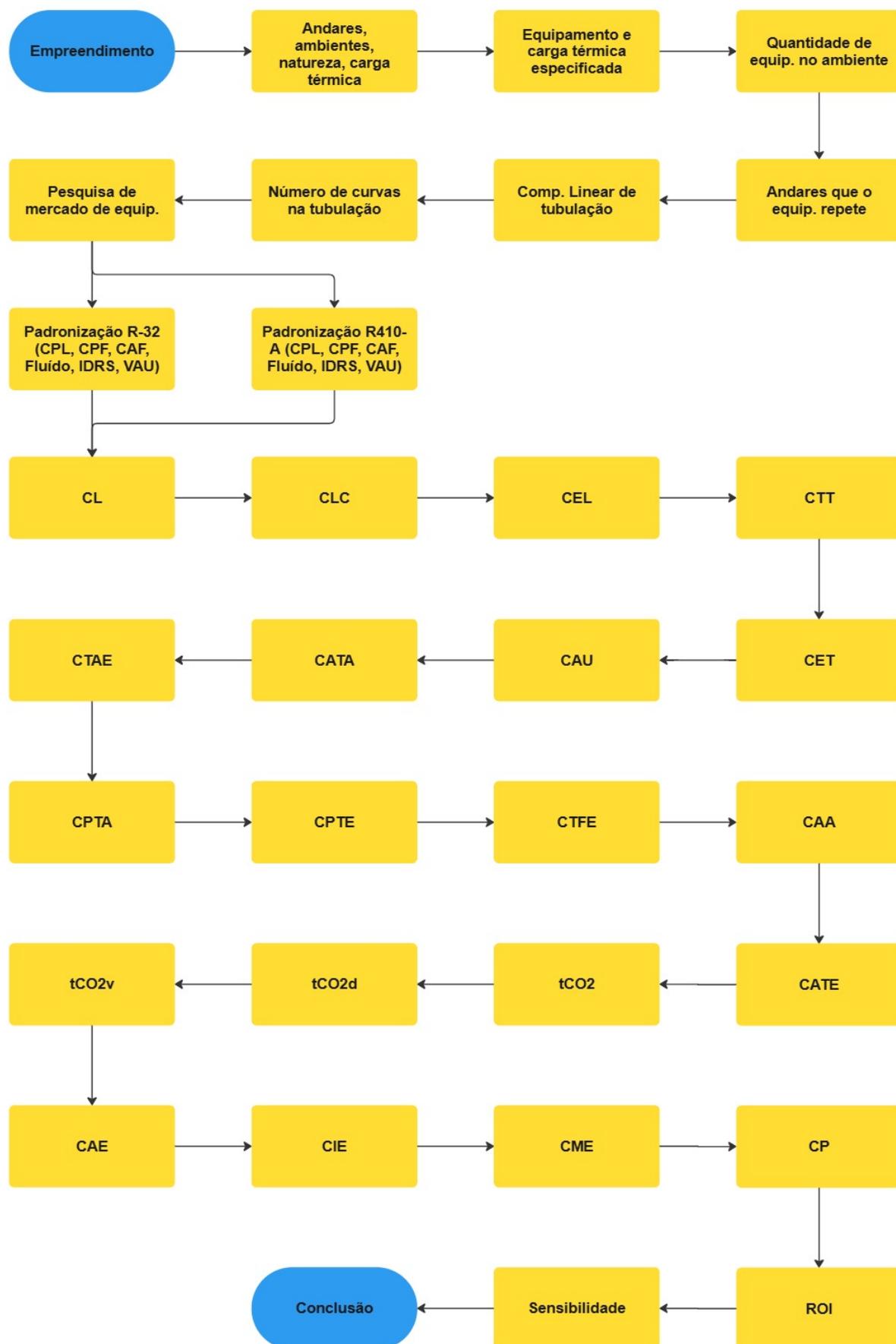
O cálculo de melhora de imagem corporativa, incentivos fiscais e redução de consumo energético não fazem parte do presente estudo, logo não entram no cálculo de viabilidade do projeto, conforme mencionado nas delimitações do mesmo.

Os resultados do cálculo do ROI, juntamente com a análise de sensibilidade, foram interpretados para fornecer uma visão clara da viabilidade econômica do projeto, sendo discutido se o retorno esperado justifica o investimento, considerando os riscos e as oportunidades identificadas. Essa análise permite aos tomadores de decisão (investidores, construtores, projetistas e fornecedores) avaliar a atratividade do investimento em tecnologias de baixo impacto ambiental e sua contribuição para a geração

de créditos de carbono.

O fluxograma da aplicação da metodologia pode ser visto na figura 13 abaixo, ele contém os principais passos para obter os mesmos resultados do presente estudo, fazendo necessário retornar à metodologia para verificar as fórmulas de cada passo, bem como as variáveis de entrada que modificarão os resultados, como valor do crédito de carbono, taxa de vazamento e recuperação de fluido refrigerante, critério de seleção de equipamento, entre outros. Com o fluxograma apresentado, a execução da análise de resultados, abordada no capítulo seguinte, pode ser melhor interpretada pelo leitor.

Figura 9 – Fluxograma geral do estudo



Onde:

- a) CL: Comprimento linear de tubulação frigorígena
- b) CLC: Comprimento linear das curvas
- c) CEL: Comprimento externo à linha de espera
- d) CTT: Comprimento total de tubulação
- e) CET: Comprimento excedido de tubulação
- f) CAU: Carga adicionada de fluido refrigerante unitária
- g) CATA: Carga adicionada total de fluido refrigerante do ambiente
- h) CTAE: Carga total adicionada no empreendimento
- i) CPTA: Carga padrão total do ambiente
- j) CPTE: Carga padrão total do empreendimento
- k) CTFE: Carga total de fluido do empreendimento
- l) CAA: Custo de aquisição por ambiente
- m) CATE: Custo de aquisição total do empreendimento
- n) tCO₂: Tonelada de dióxido de carbono
- o) tCO₂D: Tonelada de dióxido de carbono não emitidas pela instalação
- p) tCO₂v: Tonelada de dióxido de carbono não vazadas em 20 anos
- q) CAE: Custos de aquisição dos equipamentos
- r) CIE: Custos de instalação dos equipamentos
- s) CME: Custos de manutenção dos equipamentos
- t) CP: Custo Project Design Document
- u) ROI: Análise de retorno sobre o investimento

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados da análise da viabilidade econômica e ambiental da substituição de fluidos refrigerantes em empreendimentos hoteleiros de médio porte. São discutidos os impactos ambientais da troca do R-410A pelo R-32, a estimativa de créditos de carbono gerados e os benefícios financeiros decorrentes dessa transição. O capítulo também detalha os custos de implementação, os ganhos com a venda de créditos de carbono e o retorno sobre o investimento (ROI). Além disso, é realizada uma análise de sensibilidade para avaliar como variáveis como preço dos créditos de carbono, taxa de vazamento dos fluidos e custos adicionais afetam a viabilidade e a lucratividade do projeto.

Todos os cálculos realizados no presente estudo são apresentados através do apêndice a.

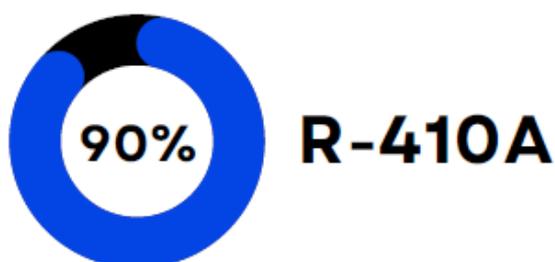
4.1 ANÁLISE DAS PERCEPÇÕES EM EMPREENDIMENTOS HOTELEIROS DE MÉDIO PORTE

O objetivo da presente seção é apresentar as percepções dos técnicos de climatização sobre o uso e a manutenção de fluidos refrigerantes em sistemas de climatização em hotéis de médio porte, baseada na aplicação de um questionário com 10 perguntas, apresentado na seção de metodologia, que cobriu temas como tipos de sistemas instalados, tipos de fluidos refrigerantes, práticas de descarte de fluidos e conhecimentos sobre impactos ambientais.

A primeira pergunta do questionário buscou entender quais tipos de sistemas de refrigeração os técnicos mais instalam no seu dia-a-dia, onde 2/3 dos entrevistados responderam que o sistema de climatização Split Hi-Wall é o mais comum, seguido por 1/3 dos entrevistados que afirmam instalar, majoritariamente, sistemas Variable Refrigerant Flow (VRF).

Em relação aos fluidos refrigerantes mais utilizados, o R-410A foi o mais citado, em cerca de 90% das aplicações, com seu destaque sendo dado pela ampla oferta desse tipo de fluido no mercado, principalmente pelo baixo custo de aquisição dos equipamentos e a tecnologia ser mais difundida. Alternativas como o R-32, R-22 e R-134A foram mencionadas com menor frequência, indicando menor familiaridade e menor uso em instalações.

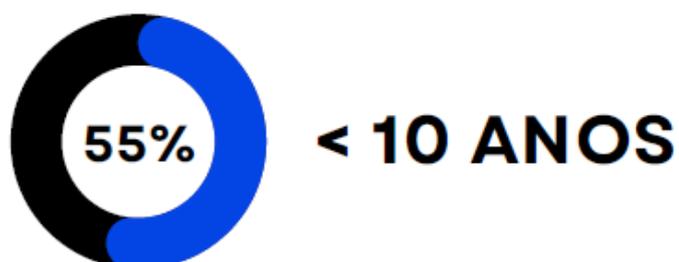
Figura 10 – Fluido mais adotado



Fonte: (Autor)

Os técnicos também foram questionados sobre a vida útil dos equipamentos do tipo Split Hi-Wall, onde 44% dos entrevistados estimou que esses sistemas duram entre 5 a 10 anos, antes de apresentarem problemas significativos, outros 11% afirmaram durar menos de 5 anos e 44% afirmaram durar entre 10 a 20 anos, sendo essa resposta exclusiva para os sistemas VRF.

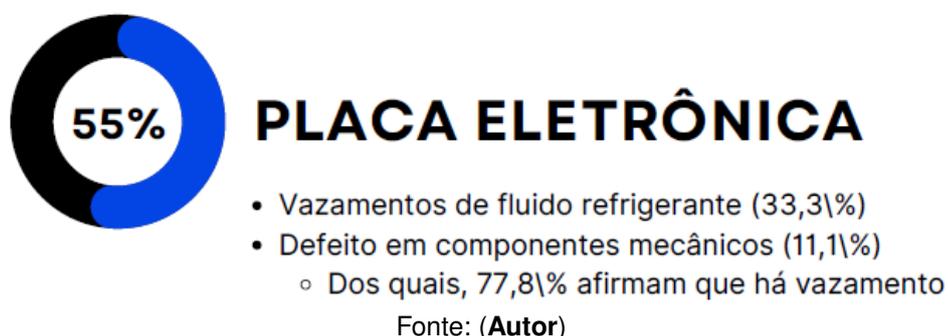
Figura 11 – Vida útil do equipamento



Fonte: (Autor)

Quando questionados sobre os principais problemas encontrados ao longo desse período, os técnicos destacaram que o defeito mais encontrado no dia-a-dia das manutenções é o defeito da placa eletrônica (55,6%), seguido por vazamentos de fluido refrigerante (33,3%) ou defeito em componentes mecânicos (11,1%). Em relação ao defeitos de componentes mecânicos, 77,8% dos entrevistados afirmam que há o vazamento de fluido refrigerante, enquanto 22,2% afirmam que raramente ou nunca há o vazamento de fluido refrigerante.

Figura 12 – Principal defeito



O questionário abordou as práticas de recolhimento e descarte dos fluidos refrigerantes durante a manutenção e o descarte de sistemas. Quando perguntados se realizam o recolhimento do fluido ao final da vida útil ou na manutenção dos equipamentos, as respostas variaram, com 55,5% afirmando que nunca ou raramente recolhem o fluido refrigerante, outros 11,1% às vezes e 33,3% afirmaram que sempre ou muitas vezes recolhem. Quando perguntados se acreditavam que outros profissionais da área também recolhem os fluidos, as respostas representaram o mesmo percentual da pergunta anterior.

Figura 13 – Recolhimento de fluido refrigerante



Fonte: (Autor)

Tentando avaliar o conhecimento dos técnicos sobre o impacto ambiental dos fluidos refrigerantes, o questionário perguntou se os mesmos acreditavam que os fluidos refrigerantes liberados no ar, causam impacto ambiental, onde 88,9% dos entrevistados reconheceu que a liberação de fluidos no ambiente causa impacto ambiental, embora apenas 44,4% soubessem o que significa ou representa as siglas ODP e GWP.

A última questão buscou entender como os profissionais realizam o recolhimento dos fluidos em suas manutenções. Apenas 3 entrevistados se propuseram a responder esse questionamento, sendo eles muito parecidos, destacando a necessidade de equipamentos específicos, como bombas de recolhimento, cilindros de gás para cada tipo de fluido refrigerante e manifold. Um dos entrevistados, o qual afirma

não recolher o fluido refrigerante nas suas manutenções, relata o alto custo para implementar essa prática no dia-a-dia, seja pelo preço de aquisição da bomba recolhadora ou dos cilindros de gás, mas principalmente pela dificuldade logística de deslocamento do veículo com tais equipamentos, que possuem volume e peso elevado, necessitando de veículos mais robustos para o transporte e resultando em custos de combustíveis mais altos para realizar os serviços, sendo essa diferença de preço um item do qual os clientes não estão dispostos a pagar.

A aplicação do questionário destaca parte da realidade do dia-a-dia enfrentada pelos técnicos de refrigeração e climatização, bem como o conhecimento e a diversidade de práticas adotadas durante as manutenções. Na seção seguinte é abordada a análise do empreendimento hoteleiro de médio porte, do qual é possível observar o reflexo das respostas obtidas no presente, através do sistema de climatização projetado para a instalação do objeto de estudo.

4.2 ANÁLISE DO EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE MÉDIO PORTE

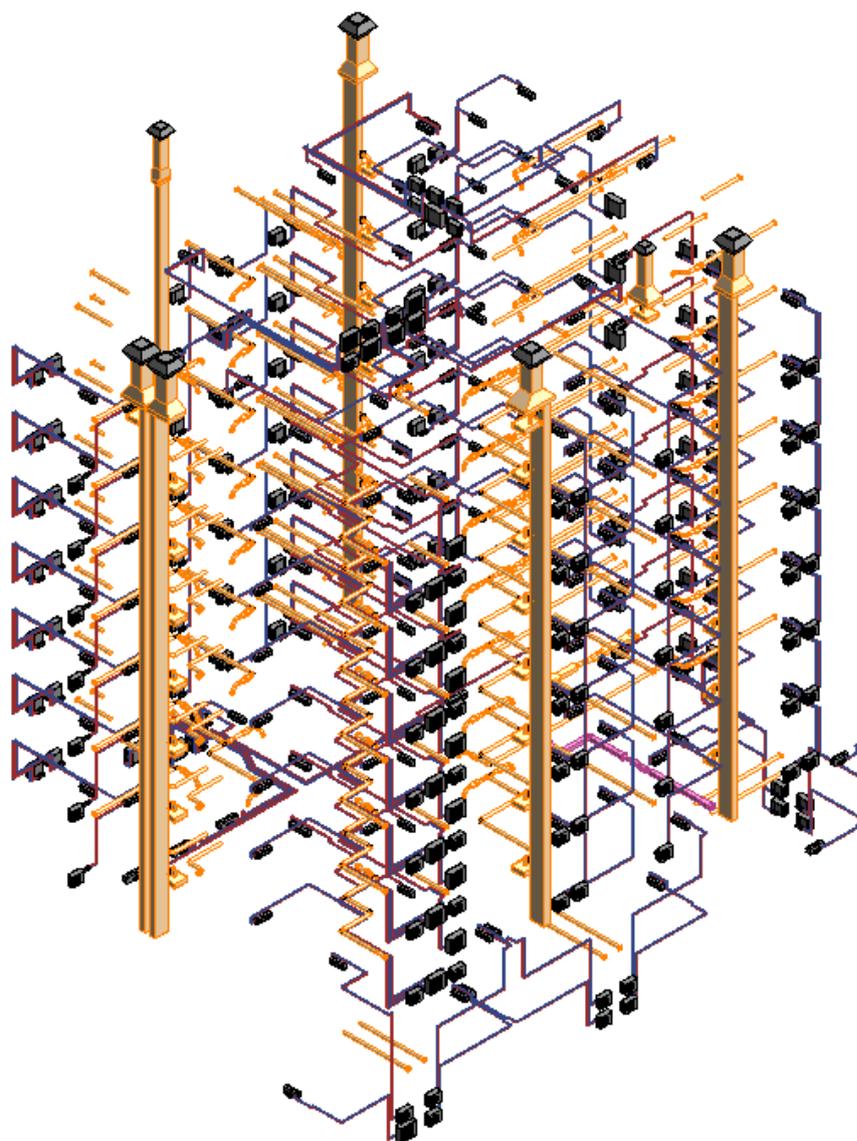
A análise do empreendimento foi realizada no mês de Agosto de 2024, sendo o mesmo localizado na região central de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. O prédio possui 94 unidades habitacionais distribuídas em 9 pavimentos. Nos andares térreos e intermediários, encontram-se estúdios, bem como apartamentos de 1 ou 2 dormitórios, oferecendo opções variadas para diferentes perfis de hóspedes. As unidades foram pensadas para maximizar o conforto e a praticidade, apresentando layouts funcionais e modernos.

A cobertura do edifício é composta por apartamentos de alto padrão, com três dormitórios amplos, cada um deles equipado com uma Jacuzzi e terraço privativo, proporcionando uma experiência de luxo e exclusividade aos seus ocupantes. Além disso, os moradores e hóspedes têm à disposição um salão de festas, ideal para eventos sociais, e uma academia completa, ambos ambientes climatizados com ar-condicionado, garantindo o máximo de conforto em todas as áreas comuns.

Em função do sigilo solicitado pela empresa de engenharia responsável pelo projeto, não é possível apresentar o projeto arquitetônico no presente trabalho, sendo apenas permitido a divulgação das detalhes do projeto de climatização (HVAC), elétrica, telefonia, hidrossanitário e prevenção contra incêndios.

A instalação de climatização (HVAC), pode ser observada na figura 14 em toda sua composição, incluindo os andares do pavimento "tipo"replicados. A replicação permite obter o volume total de instalações dessa disciplina dentro do projeto de empreendimento, viabilizando a execução do estudo com maior precisão e qualidade.

Figura 14 – Instalação de climatização (HVAC) do empreendimento



Fonte: (Autor)

A gestão do empreendimento é realizada por uma Holding, empresa especializada na administração de investimentos imobiliários. A Holding reúne um grupo diversificado de investidores interessados na aquisição de lotes ou apartamentos no edifício, com o intuito de alocá-los para fins hoteleiros. Este modelo de gestão permite que a Holding seja responsável pela administração integral dos recursos dos investidores, desde a contratação das empresas responsáveis pelo projeto arquitetônico, execução da obra, até a manutenção e gestão da locação das unidades.

A locação pode ser feita por meio de plataformas próprias da Holding ou por intermédio de serviços terceirizados, como Airbnb, Booking, Trivago, TripAdvisor, entre outros. Em troca da gestão, a Holding retém uma parte dos lucros provenientes das locações, com a porcentagem variando conforme o tamanho, a localização do imóvel

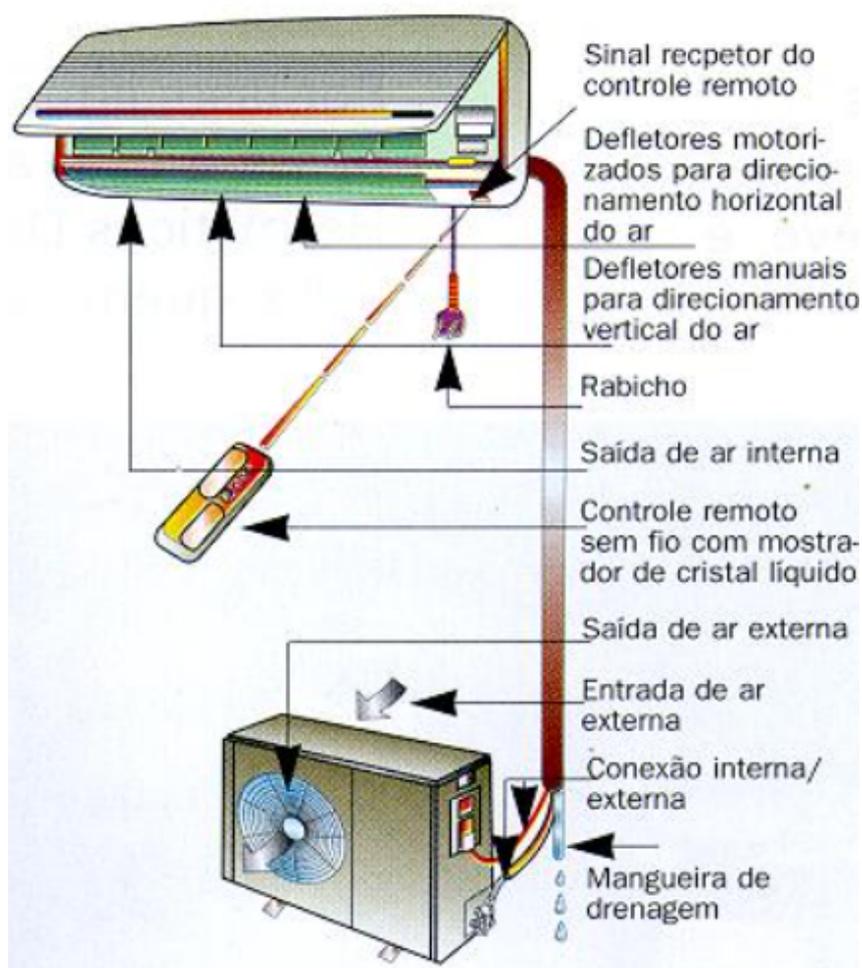
e o histórico de gestão, assim como as características específicas do empreendimento e do perfil dos usuários que frequentemente alugam as unidades.

4.3 ANÁLISE DOS EQUIPAMENTOS E COMPONENTES DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE MÉDIO PORTE

O sistema de climatização do edifício foi cuidadosamente planejado para aliar eficiência energética, conforto térmico e viabilidade econômica, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Holding gestora do empreendimento.

A solução escolhida para as unidades habitacionais foi a instalação de equipamentos de ar-condicionado do tipo split 1x1, modelo hi-wall, devido à sua capacidade de oferecer um excelente equilíbrio entre desempenho e custo-benefício, as características de um equipamento de ar condicionado do tipo Split Hi-Wall pode ser observado na figura 15. Essa escolha visa não apenas reduzir o custo global de viabilização do empreendimento, mas também diminuir o tempo de retorno sobre o investimento (payback), possibilitando a flexibilidade de converter o edifício para uso residencial ou permitir a devolução das unidades aos proprietários individuais.

Figura 15 – Esquemático do equipamento tipo Split Hi-Wall



Fonte: (Friotermica, 2015)

A tabela 6 evidencia os ambientes do presente estudo, com suas respectivas nomenclaturas, áreas que interferem no cálculo de carga térmica (fora do escopo), andares que esses ambientes se repetem, quantidade de equipamentos para esse ambiente, capacidade de climatização do equipamento dimensionado para esse ambiente.

Tabela 6 – Descrição dos ambientes do empreendimento Hoteleiro

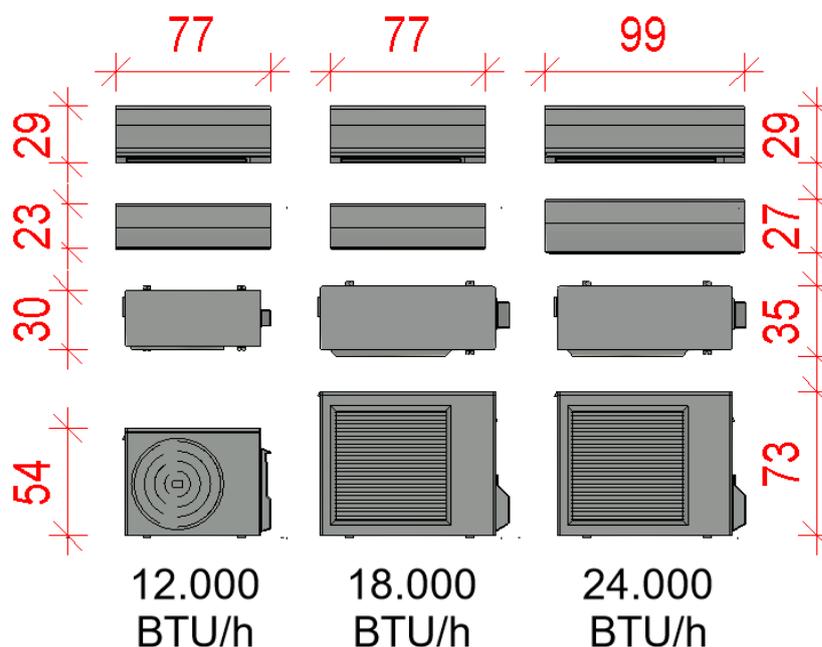
Descrição	A [m ²]	Anda-res	Qtd de Equip. [Un]	QTD Total Equip [Un]	Total [BTU/h]
APTO.802_Cozinha	34,8	1	2	2,00	18.000
APTO.802_Suíte 01	10,6	1	1	1,00	12.000
APTO.802_Suíte 02	14,5	1	1	1,00	12.000
APTO.801_Cozinha	33,4	1	2	2,00	18.000
APTO.801_Suíte 01	13,2	1	1	1,00	12.000
APTO.801_Suíte 02	18,8	1	1	1,00	12.000
APTO803_Cozinha	74,3	1	2	2,00	24.000
APTO803_Office	14,4	1	1	1,00	12.000
APTO803_Suíte 01	14,4	1	1	1,00	12.000
APTO803_Suíte 02	11,2	1	1	1,00	12.000
APTO803_Suíte 03	24,4	1	1	1,00	12.000
APTO.102/702_Cozinha	24,2	8	1	8,00	24.000
APTO.102/702_Suíte 01	11,9	8	1	8,00	12.000
APTO.102/702_Suíte 02	12,5	8	1	8,00	12.000
APTO.103/703_Cozinha	25,3	8	1	8,00	18.000
APTO.103/703_Quarto	9,1	8	1	8,00	12.000
APTO.103/703_Suíte	13,3	8	1	8,00	12.000
APTO.104/704_Estúdio	25,8	8	1	8,00	12.000
APTO.105/705_Cozinha	27,5	8	1	8,00	18.000
APTO.105/705_Quarto	9,1	8	1	8,00	12.000
APTO.105/705_Suíte	13,1	8	1	8,00	12.000
APTO.106/706_Estúdio	31,1	8	1	8,00	12.000
APTO.107/707_Cozinha	27,5	8	1	8,00	18.000
APTO.107/707_Quarto	9,1	8	1	8,00	12.000
APTO.107/707_Suíte	13,1	8	1	8,00	12.000
APTO.108/708_Estúdio	25,8	8	1	8,00	12.000
APTO.109/709_Estúdio	26,3	8	1	8,00	12.000
APTO.110/710_Estúdio	21,8	8	1	8,00	12.000
APTO.111/711_Quarto	10,8	8	1	8,00	12.000
APTO.111/711_Sala estar	22	8	1	8,00	12.000
APTO.101/701_Estúdio	20,7	8	1	8,00	18.000
APTO.01_IN	31,3	1	1	1,00	18.000
APTO.01_S	18,5	1	1	1,00	12.000
APTO.02_IN	31,9	1	1	1,00	12.000
APTO.02_S	18,6	1	1	1,00	12.000
APTO.03_IN	31,4	1	1	1,00	12.000
APTO.03_S	18,7	1	1	1,00	12.000
APTO.04_IN	31,4	1	1	1,00	12.000
APTO.04_S	18,7	1	1	1,00	12.000
APTO.05_IN	28	1	1	1,00	12.000
APTO.05_S	16,4	1	1	1,00	12.000
APTO.06_IN	28	1	1	1,00	12.000
APTO.06_S	16,4	1	1	1,00	12.000
FITNESS	48,5	1	2	2,00	24.000
GOURMET	64,5	1	3	3,00	24.000
ZELADORIA	10	1	1	1,00	12.000

Fonte: Autor.

Cada unidade habitacional está equipada com aparelhos de ar-condicionado de capacidades variadas, adequadas ao tamanho e à necessidade dos ambientes: 12.000 BTU/h, 18.000 BTU/h e 24.000 BTU/h, respectivamente representadas pela figura 16,

com as dimensões em centímetros.

Figura 16 – Comparativo de tamanho das unidades Split Hi-Wall



Fonte: (Autor)

A variação da capacidade de climatização, representada pela unidade de medida "BTU/h" permite atender de maneira eficiente as demandas térmicas específicas de cada espaço, garantindo o conforto dos moradores e hóspedes, aliada a eficiência energética, evitando equipamento sub ou super dimensionados para os ambientes. A escolha por sistemas split 1x1 também facilita a gestão e manutenção futura dos equipamentos, uma vez que cada proprietário é responsável por seu próprio ar-condicionado, proporcionando maior autonomia e simplicidade na operação.

Com base no layout do empreendimento, as instalações dos equipamentos foram projetadas considerando as distâncias mínimas e máximas necessárias para a tubulação, sendo as distâncias máximas as mais importantes no presente estudo, onde os equipamentos a serem instalados devem atender as seguintes características:

- 12.000 BTU/h até 15 metros de tubulação;
- 18.000 BTU/h até 20 metros de tubulação;
- 24.000 BTU/h até 20 metros de tubulação;

Essas distâncias foram estabelecidas para garantir que os equipamentos fossem compatíveis com os requisitos técnicos das instalações, além de garantir o desempenho dos sistemas de climatização.

Além dos sistemas de ar-condicionado individuais, todas as áreas comuns do edifício são climatizadas e contam com sistemas de renovação e exaustão de ar, utili-

zando ventiladores mecânicos que operam conforme as exigências legais e normativas, em especial a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 16401:2008.

A Norma Brasileira (NBR) 16401 possui três partes em sua composição, abordando aspectos diferentes de um projeto e instalação de climatização para ambientes habitáveis, sendo uma norma obrigatória e referência para quaisquer projetos deste tipo, seja de pequeno ou grande porte.

A primeira parte aborda os critérios técnicos para o projeto e dimensionamento dos sistemas de climatização, como a escolha de equipamentos e componentes, além das diretrizes de instalação, operação e manutenção. Ela busca garantir que os sistemas sejam eficientes, atendendo às necessidades de conforto e qualidade do ar, enquanto minimizam o consumo de energia, devido ao correto dimensionamento do sistema de climatização.

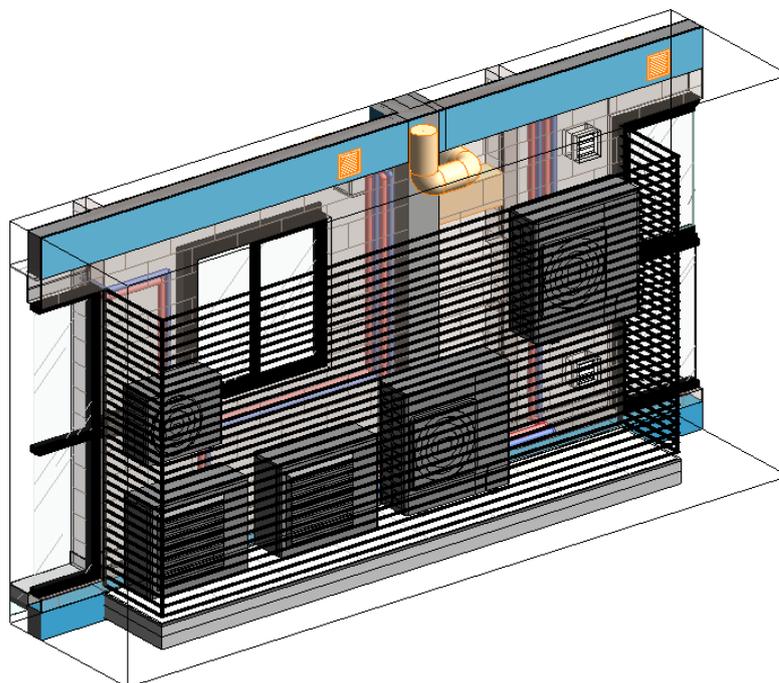
A segunda parte define os critérios para garantir o conforto térmico em ambientes climatizados, especificando as faixas de temperatura, umidade e fluxo de ar adequados para diferentes tipos de ocupação. Tendo como objetivo, proporcionar um ambiente confortável para os usuários, evitando excesso de calor ou frio e problemas com umidade.

A terceira e última parte aborda os aspectos na qualidade do ar, estabelecendo os requisitos para ventilação, filtragem de poluentes e renovação do ar em ambientes fechados. Dentre as seções, a mesma define os níveis mínimos de troca de ar e filtragem para assegurar que o ar esteja limpo e seguro para os ocupantes, prevenindo a presença de contaminantes e melhorando a saúde e o bem-estar dos usuários da instalação.

O correto dimensionamento dos sistemas de climatização, com a aplicação rigorosa da NBR16401 em sistemas projetados, são fundamentais para garantir a conforto, saúde e eficiência, maximizando tanto o desempenho térmico e elétrico, bem como a qualidade do ar interior, mantendo a circulação adequada e evitando a estagnação de odores ou o acúmulo de poluentes.

No que se refere às áreas técnicas, as condensadoras dos sistemas de ar condicionado foram posicionados estrategicamente nas fachadas de cada apartamento, utilizando fechamentos em venezianas de alumínio ventilado, ilustrado pela figura 17.

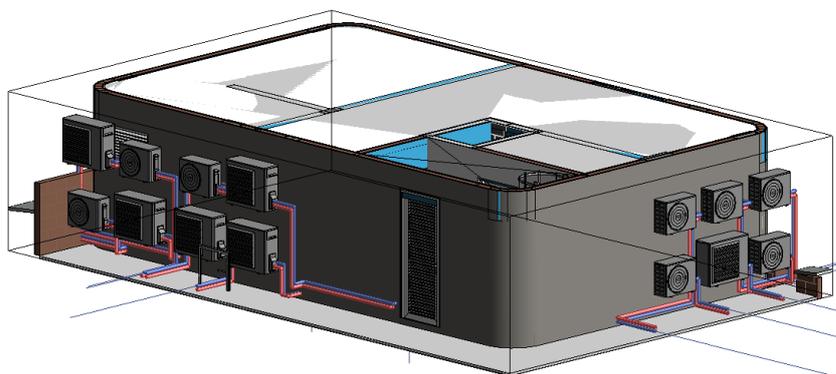
Figura 17 – Fechamento em veneziana para condensadoras



Fonte: (Autor)

Essa escolha visa maximizar a ventilação natural dos equipamentos, ao mesmo tempo em que preserva a estética da fachada. Contudo, as unidades da cobertura, que representam os apartamentos de padrão mais elevado, possuem uma configuração especial, onde as condensadoras são alocadas no pavimento do barrilete, conforme ilustrado pela figura 18.

Figura 18 – Unidades condensadoras localizadas no barrilete



Fonte: (Autor)

Esta solução proporciona maior exclusividade e espaço para os moradores da cobertura, além de reduzir significativamente o ruído nos ambientes internos, promovendo uma experiência de maior conforto e sofisticação.

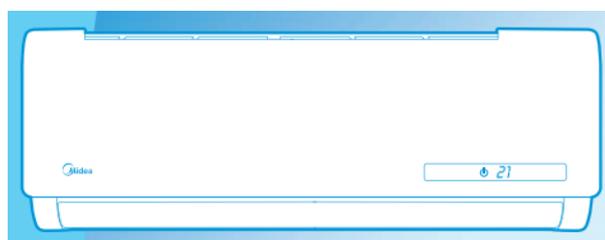
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O calor absorvido pelos espaços ao longo do dia, tanto diretamente quanto indiretamente pelo sol, precisa ser dissipado para assegurar o conforto térmico dos residentes. Ademais, foram desenvolvidos sistemas de ventilação e exaustão para garantir uma melhor qualidade do ar interno e a higiene requerida pelos ocupantes. O objetivo do sistema de ar condicionado é captar e tratar a mistura de ar externo e ar de retorno do ambiente, com o objetivo de fornecer ar puro em temperaturas pré-estabelecidas, tanto no verão quanto no inverno, para manter um clima agradável dentro do edifício. Além disso, ele realiza a renovação do ar para assegurar a qualidade do ar interno.

Portanto, o sistema de ar condicionado concebido para o projeto utiliza a tecnologia de expansão direta de gás, utilizando unidades de ar condicionado do tipo split (1x1), que são compostas por uma unidade evaporadora interna ligada a uma unidade de condensação externa. Este sistema foi selecionado devido à sua eficiência energética e versatilidade de instalação, bem como à sua habilidade de funcionar tanto em regimes de resfriamento quanto de aquecimento, assegurando o conforto térmico dos espaços em todas as épocas do ano.

A unidade evaporadora, situada dentro dos espaços climatizados, tem a função de absorver o calor do ar ambiente. É formada por um trocador de calor (serpentina de cobre com aletas de alumínio), uma válvula de expansão, um ventilador interno, filtros de ar removíveis e sensores de temperatura (termistores). O ar atravessa a serpentina, onde o refrigerante líquido se decompõe, absorvendo o calor ambiente. Por outro lado, o ventilador distribui o ar resfriado de maneira homogênea pelo ambiente. A unidade opera através de uma placa eletrônica com tecnologia Proporcional-Integral-Derivativa (P.I.D.), que possibilita a manutenção exata da temperatura desejada (set-point) e melhora o rendimento do sistema. Essa unidade pode ser observada na figura 19.

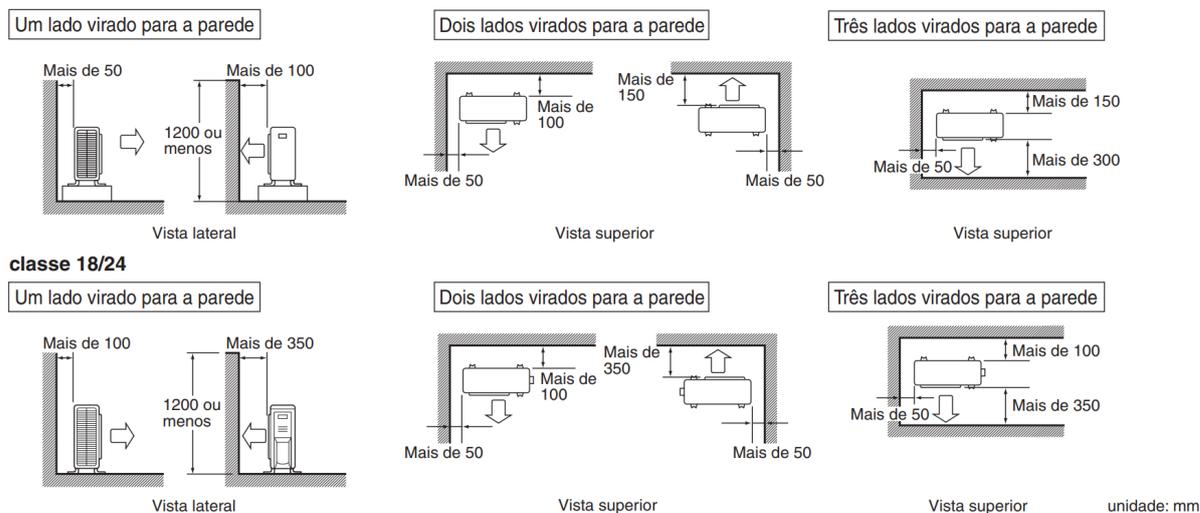
Figura 19 – Unidade Evaporadora



Fonte: (Midea, 2012)

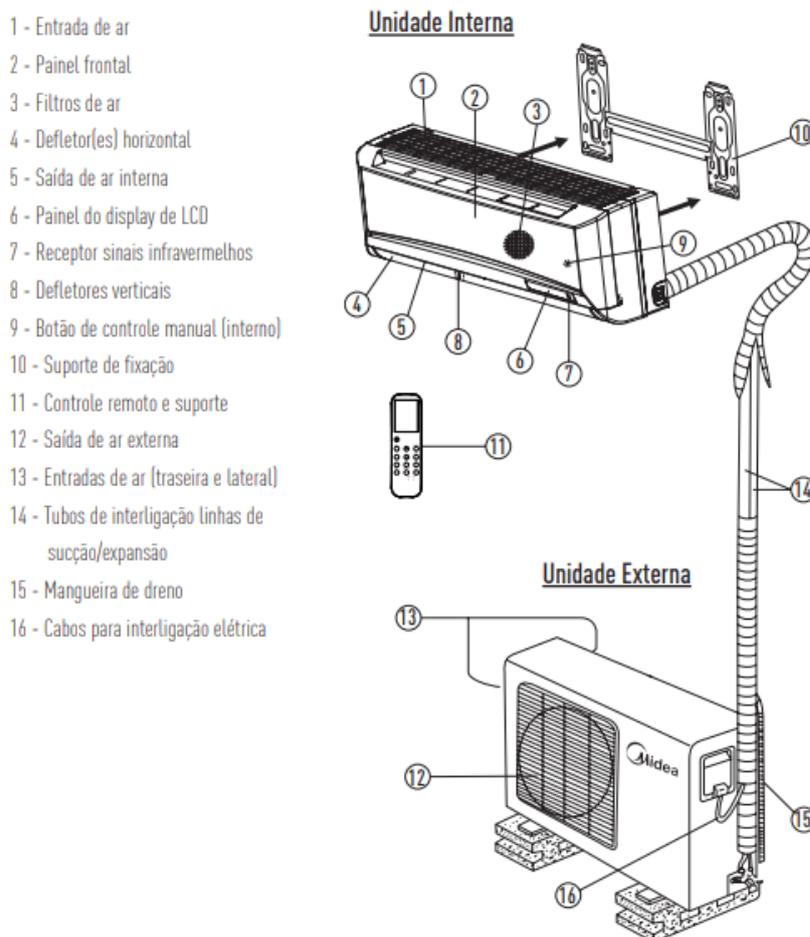
Para assegurar a dissipação eficaz do calor, a condensadora deve ser posicionada em um local arejado, com espaço adequado ao seu redor, conforme indicado no manual dos fabricantes. Alguns pormenores da instalação podem ser observados na figura 20.

Figura 20 – Cuidados de instalação da unidade condensadora



As unidades evaporadora e condensadora são conectadas por um sistema de tubulação de cobre, conforme é mostrado na figura 21. A tubulação de cobre transporta o refrigerante entre os dois componentes, sendo a mesma composta por duas linhas principais: a linha de líquido, que transporta o refrigerante líquido, e a linha de sucção, que transporta o refrigerante em estado gasoso. É essencial observar as distâncias mínimas e máximas da tubulação para garantir a eficiência do sistema. A distância máxima de tubulação varia conforme o fabricante, mas geralmente fica entre 15 a 30 metros para sistemas Hi-wall. O desnível máximo entre as unidades interna e externa também deve ser respeitado para evitar perda de eficiência no sistema, e geralmente não deve ultrapassar 8 metros para unidades tipo split. A tubulação deve ser devidamente isolada para evitar perda de energia e condensação indesejada que pode causar gotejamento.

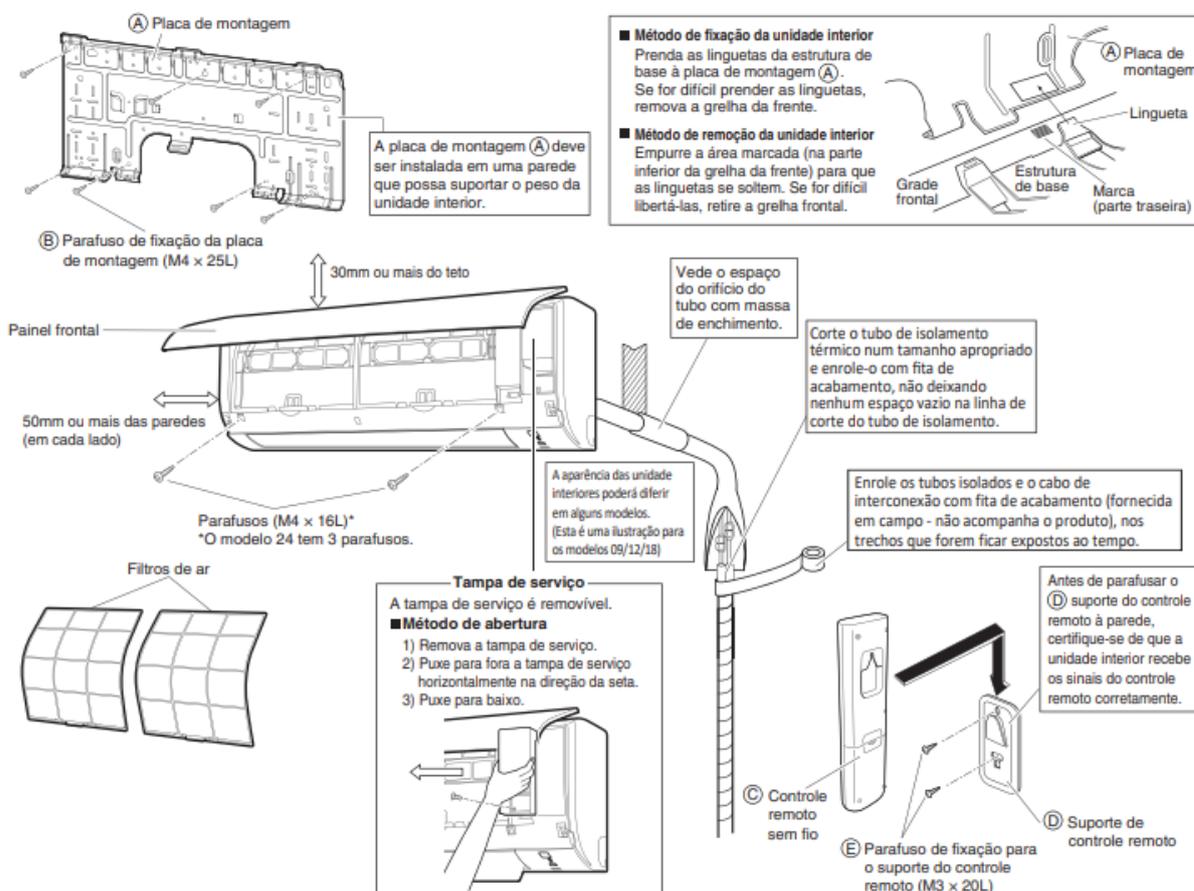
Figura 21 – Descrição conjunto Split Hi Wall



Fonte: (Midea 2012)

O posicionamento das unidades também é importante para o desempenho do sistema. A unidade evaporadora deve ser instalada em local que permita uma boa distribuição do ar no ambiente, evitando a instalação em locais com obstruções ou em posições que possam causar desconforto aos ocupantes. A unidade condensadora, por sua vez, deve ser instalada em local que garanta uma boa ventilação, longe de fontes de calor ou barreiras que possam obstruir o fluxo de ar. Além disso, a instalação do sistema deve levar em consideração a facilidade de acesso para manutenções regulares, como limpeza dos filtros, verificação da pressão do refrigerante e inspeção geral dos componentes, conforme ilustrado pela figura 22.

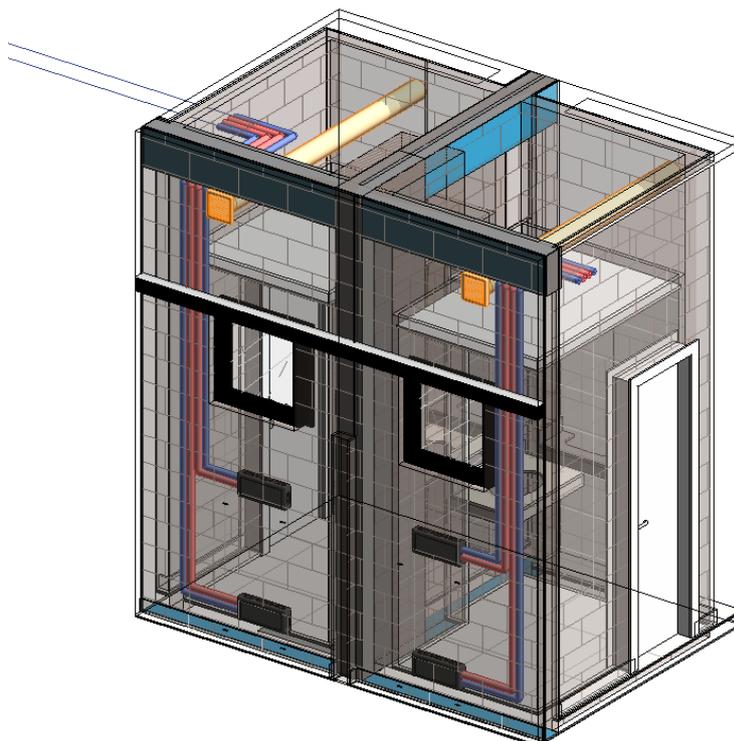
Figura 22 – Cuidados de instalação da unidade evaporadora



Fonte: (Daikin, 2012)

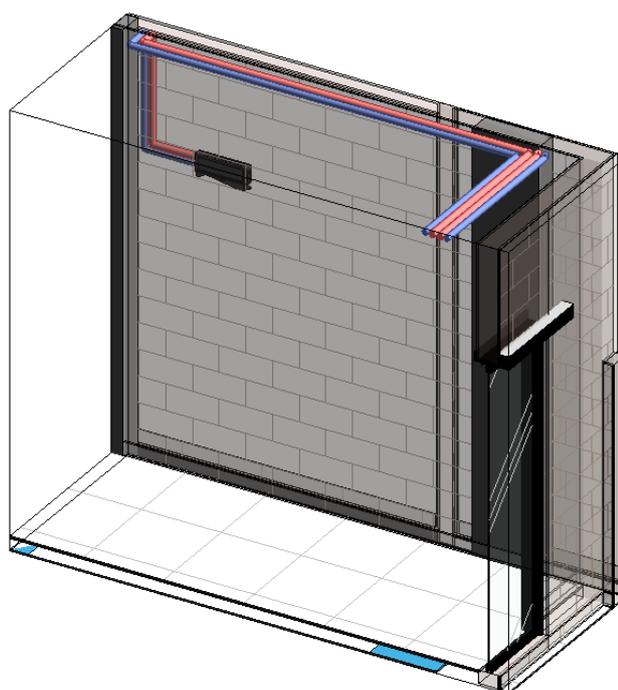
Nas instalações projetadas, foram deixadas pela construtora, linhas de cobre como espera, com caixa de passagem, sendo essa a representação física e real do comprimento de tubulação adicional a ser instalada no equipamento de climatização utilizado no empreendimento. A instalação da caixa de passagem é necessária para acessar as tubulações que geralmente estão embutidas nas paredes de alvenaria ou no forro e contrapiso do empreendimento. As tubulações de fábrica são unidas por brasagem ou por conectores chanfrados e rosqueados em cobre ou latão, conforme ilustrado nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Caixa de espera para condensadoras



Fonte: (Autor)

Figura 24 – Caixa de espera para evaporadoras



Fonte: (Autor)

Conforme detalhado na subseção 3.7 da metodologia deste documento, a padronização dos equipamentos se faz necessária para facilitação dos cálculos de volume de fluido refrigerante presente nas linhas frigorígenas dos equipamentos instalados no empreendimento hoteleiro de médio porte. Assim, realizou-se o levantamento das marcas e modelos de ar condicionado do tipo Split Hi-Wall disponíveis no mercado no mês de Agosto de 2024, para ambos os fluidos refrigerantes que fazem parte do estudo, sendo eles o R-410A e o R-32.

Ou seja, na execução do levantamento dos equipamentos, foram levadas em considerações modelos de tecnologia equiparáveis, bem como selecionou-se apenas aqueles que em catálogo ou em registros do INMETRO, apresentaram as informações necessárias para o estudo, dentre elas a capacidade de climatização, comprimento de linha igual ou superior ao dimensionado para cada comprimento de linha frigorígena, além da carga padrão de fluido refrigerante advinda de fábrica, carga adicional para cada metro de tubulação que exceder a distância padrão de fábrica, o IDRS (Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal), além de preços equiparáveis para as faixas de capacidade analisadas.

A tabela 7 a seguir apresenta os dados técnicos, de engenharia e outras informações extraídas de catálogos oficiais de cada fabricante, bem como de autoridades de certificação como o INMETRO, para a certificação de IDRS (Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal). Os dados explicitados são aqueles que contribuem para a análise de impacto ambiental dos fluidos refrigerantes presentes na instalação do empreendimento hoteleiro, sendo removidos os quais não se fazem necessários para o presente estudo.

Os dados levantados referem-se a equipamentos de 12.000/18.000/24.000BTU/h equipados com o fluido R-410A.

Tabela 7 – Caracterização dos equipamentos com fluido R-410A

Equipamentos de ar-condicionado						
Item	Carga após[m]	IDRS	Valor	Fluido	Carga padrão [Kg]	Carga adicional [Kg/m]
1.1	5	5,50	R\$ 3.899,00	R-410A	0,790	0,020
1.2	5	6,00	R\$ 4.597,00	R-410A	0,880	0,015
1.3	5	6,00	R\$ 3.695,00	R-410A	0,880	0,015
1.4	5	6,20	R\$ 6.281,00	R-410A	1,110	0,015
1.5	5	6,20	R\$ 5.847,00	R-410A	1,100	0,015
1.6	5	6,20	R\$ 5.172,78	R-410A	1,110	0,015
1.7	5	6,00	R\$ 6.966,00	R-410A	1,400	0,015
1.8	5	6,00	R\$ 7.650,00	R-410A	1,400	0,015
1.9	5	6,00	R\$ 6.936,00	R-410A	1,400	0,015

Fonte: Autor.

O mesmo processo adotado para o levantamento das características do equipamento tipo Split Hi-Wall do fluido R-410A, foi aplicado aos equipamentos que adotam

o fluido R-32, uma vez que as características e dados que busca-se obter são os mesmos para fins de estudo. Sendo a tabela 8 a seguir referente a equipamentos de 12.000/18.000/24.000BTU/h equipados com o fluido R-32.

Tabela 8 – Caracterização dos equipamentos com fluido R-32

Equipamentos de ar-condicionado						
Item	Carga após[m]	IDRS	Valor	Fluido	Carga padrão [Kg]	Carga adicional [Kg/m]
1.10	10	7,20	R\$ 4.319,00	R-32	0,900	0,020
1.11	5	6,30	R\$ 4.676,67	R-32	0,710	0,015
1.12	5	6,30	R\$ 4.199,00	R-32	0,710	0,015
1.13	5	5,53	R\$ 6.315,00	R-32	1,050	0,020
1.14	10	6,80	R\$ 6.554,44	R-32	1,300	0,020
1.15	5	6,20	R\$ 5.999,00	R-32	0,850	0,015
1.16	10	8,20	R\$ 7.599,00	R-32	1,450	0,015
1.17	5	6,43	R\$ 6.799,00	R-32	1,100	0,010
1.18	5	5,53	R\$ 6.599,00	R-32	1,320	0,030

Fonte: Autor.

Ao analisar os dados referentes à carga padrão de fluido refrigerante, foi observada uma diferença significativa entre as marcas, especialmente em comparação com a Daikin, uma empresa reconhecida por sua inovação e liderança tecnológica no setor de climatização. A Daikin, sendo uma das principais marcas do mercado, apresenta um comprimento de carga padrão de fluido refrigerante consideravelmente maior à média das demais empresas. Essa diferença pode ser atribuída à eficiência dos seus sistemas e ao desenvolvimento constante de novas tecnologias.

No entanto, dado que a Daikin se destaca justamente por estar à frente em termos de inovação e tecnologia, e o comprimento de carga padrão de fluido refrigerante dessa marca será descartada nas análises comparativas. Considerando que a maioria das outras marcas não oferecem a mesma capacidade, incluir esse valor poderia distorcer os resultados e reduzir a precisão das conclusões.

Por outro lado, o Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS) da Daikin será mantido nas análises, onde o mesmo reflete o desempenho energético dos equipamentos e serve como referência para o setor, bem como a Daikin sendo líder no mercado em desenvolvimento tecnológico, ela impulsiona uma corrida tecnológica que beneficia o setor como um todo. Dessa forma, é esperado que as demais empresas sigam o exemplo e aprimorem continuamente seus produtos, melhorando o padrão de equipamentos disponíveis aos consumidores.

Assim, a decisão de manter o IDRS da Daikin e excluir o comprimento de carga padrão de fluido refrigerante visa garantir uma análise mais coerente e representativa das práticas do mercado atual. Sendo assim, as análises de CO₂ do sistema de climatização previsto pode ser tratado nas próximas seções.

4.5 VOLUME DE GÁS E POTENCIAL DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) DO EMPREENDIMENTO

As linhas de cobre do sistema de climatização dos ambientes presentes no objeto de estudo foram levantadas manualmente, através do Software REVIT, sendo o projeto elaborado pela empresa contratada para a análise e desenvolvimento, utilizando a metodologia Building Information Modeling (BIM). Esta metodologia permitiu que diversas áreas e disciplinas atuassem de maneira integrada no mesmo arquivo, proporcionando uma visão holística e detalhada do projeto. Entretanto, devido à complexidade e à quantidade de componentes envolvidos no modelo BIM, foi necessário realizar uma limpeza nas listas de componentes para isolar e acessar exclusivamente as tubulações de gás associadas aos equipamentos de climatização.

Esse processo garantiu que o cálculo do volume de gás fosse feito com base em dados precisos e relevantes, sem interferências de outros sistemas ou componentes presentes no projeto. Cada comprimento dos trechos de reta e número de curvas presentes na linha de cobre dos apartamentos individuais, foram sendo obtidas através das informações presentes na propriedade daquele componente dentro do software.

Para reduzir a quantidade de informações dentro da tabela, os ambientes serão numerados, e sua identificação nas tabelas a seguir será dada por Descrição dos ambientes (DA), iniciando pelo ambiente 1 até o ambiente 45. A capacidade de climatização das máquinas será identificada pela Carga Térmica (CT) (BTU/h), sendo possível compactar e apresentar mais informações com suas respectivas siglas, conforme a tabela 9, que será base de cálculo para os volumes de massa instalados em cada tipo de tecnologia de fluido refrigerante.

Tabela 9 – Previsão de instalação para o sistema de climatização

DA	A [m ²]	RA	NE	CT	CPL	CL	NC	CLC	CEL
1	34,8	1	2	18.000	5	5,15	8	0,4	2
2	10,6	1	1	12.000	5	16,30	6	0,3	2
3	14,5	1	1	12.000	5	9,45	9	0,45	2
4	33,4	1	2	18.000	5	13,65	12	0,6	2
5	13,2	1	1	12.000	5	15,65	8	0,4	2
6	18,8	1	1	12.000	5	8,55	10	0,5	2
7	74,3	1	2	24.000	5	13,20	8	0,4	2
8	14,4	1	1	12.000	5	15,35	6	0,3	2
9	14,4	1	1	12.000	5	14,85	9	0,45	2
10	11,2	1	1	12.000	5	17,05	12	0,6	2
11	24,4	1	1	12.000	5	16,25	8	0,4	2
12	24,2	8	1	24.000	5	10,90	12	0,6	2
13	11,9	8	1	12.000	5	14,75	12	0,6	2
14	12,5	8	1	12.000	5	8,95	10	0,5	2
15	25,3	8	1	18.000	5	11,55	11	0,55	2
16	9,1	8	1	12.000	5	7,30	10	0,5	2
17	13,3	8	1	12.000	5	9,10	10	0,5	2
18	25,8	8	1	12.000	5	11,55	9	0,45	2
19	27,5	8	1	18.000	5	16,95	10	0,5	2
20	9,1	8	1	12.000	5	7,35	10	0,5	2
21	13,1	8	1	12.000	5	7,25	8	0,4	2
22	31,1	8	1	12.000	5	10,05	8	0,4	2
23	27,5	8	1	18.000	5	10,00	11	0,55	2
24	9,1	8	1	12.000	5	3,90	4	0,2	2
25	13,1	8	1	12.000	5	9,95	9	0,45	2
26	25,8	8	1	12.000	5	13,45	10	0,5	2
27	26,3	8	1	12.000	5	4,85	4	0,2	2
28	21,8	8	1	12.000	5	6,65	6	0,3	2
29	10,8	8	1	12.000	5	8,75	10	0,5	2
30	22	8	1	12.000	5	11,65	8	0,4	2
31	20,7	8	1	18.000	5	4,35	2	0,1	2
32	31,3	1	1	18.000	5	8,85	6	0,3	2
33	18,5	1	1	12.000	5	12,60	8	0,4	2
34	31,9	1	1	12.000	5	10,95	8	0,4	2
35	18,6	1	1	12.000	5	16,35	10	0,5	2
36	31,4	1	1	12.000	5	8,85	6	0,3	2
37	18,7	1	1	12.000	5	11,65	8	0,4	2
38	31,4	1	1	12.000	5	11,15	8	0,4	2
39	18,7	1	1	12.000	5	13,20	11	0,55	2
40	28	1	1	12.000	5	10,45	8	0,4	2
41	16,4	1	1	12.000	5	10,25	8	0,4	2
42	28	1	1	12.000	5	11,60	8	0,4	2
43	16,4	1	1	12.000	5	11,55	10	0,5	2
44	48,5	1	2	24.000	5	27,20	12	0,6	2
45	64,5	1	3	24.000	5	27,60	12	0,6	2
46	10	1	1	12.000	5	3,25	3	0,15	2

Fonte: Autor.

O comprimento linear e o número de curvas são advindos apenas da instalação de espera para os equipamentos dos ambientes, sendo que ainda há tubulação externa à essa espera, a qual geralmente está sobre o forro ou dentro da alvenaria ou contra-

piso da construção. Em consultas à catálogos técnicos, manuais de instalação dos fabricantes e em entrevistas com profissionais de instalação, é possível destacar a necessidade de sifão para comprimentos acima do comprimento de carga padrão, sendo esse comprimento externo à linha de espera, padronizado em 2 metros de tubulação, padronizando os dados para os cálculos de volume de massa de fluido refrigerante do empreendimento.

Dentre todas as marcas de equipamentos levantadas para o presente estudo, apenas uma adota o comprimento de linha da carga padrão de fluido acima de 5 metros, sendo para os fins de estudo, tratada como um *outlier*, uma vez que não há garantias que a instalação seja feita com a marca em questão, logo, 5 metros será a linha padrão para a base de cálculo.

Já destacado nas seções anteriores, a carga adicional a ser inserida em cada instalação de equipamento, será referente ao comprimento excedido da linha padrão, no caso 5 metros. E a carga total será contabilizada pela carga padrão de fábrica para 5 metros, mais a carga adicional para o comprimento de linha excedido.

Após a aplicação da metodologia de construção de cálculo previamente descrita acima e de maneira completa na seção de metodologia, bem como aplicando as condições de carga padrão de fluido refrigerante, carga adicional por metro de tubulação excedidos e valores praticados para cada capacidade de climatização dos equipamentos, para a tecnologia de fluido refrigerante R-410A foram obtidos os valores apresentados na tabela 10 abaixo:

Tabela 10 – Dados da instalação dos equipamentos de R-410A

DA	CTT	CET	CPF	CAU	CAF	CATA	CPTA	CAA
1	7,55	2,55	1,107	0,038	0,015	2,290	0,076	R\$ 11.533,85
2	18,60	13,60	0,850	0,227	0,017	1,077	0,227	R\$ 4.063,67
3	11,90	6,90	0,850	0,115	0,017	0,965	0,115	R\$ 4.063,67
4	16,25	11,25	1,107	0,169	0,015	2,551	0,338	R\$ 11.533,85
5	18,05	13,05	0,850	0,218	0,017	1,068	0,218	R\$ 4.063,67
6	11,05	6,05	0,850	0,101	0,017	0,951	0,101	R\$ 4.063,67
7	15,60	10,60	1,400	0,159	0,015	3,118	0,318	R\$ 14.368,00
8	17,65	12,65	0,850	0,211	0,017	1,061	0,211	R\$ 4.063,67
9	17,30	12,30	0,850	0,205	0,017	1,055	0,205	R\$ 4.063,67
10	19,65	14,65	0,850	0,244	0,017	1,094	0,244	R\$ 4.063,67
11	18,65	13,65	0,850	0,228	0,017	1,078	0,228	R\$ 4.063,67
12	13,50	8,50	1,400	0,128	0,015	12,220	1,020	R\$ 57.472,00
13	17,35	12,35	0,850	0,206	0,017	8,447	1,647	R\$ 32.509,33
14	11,45	6,45	0,850	0,108	0,017	7,660	0,860	R\$ 32.509,33
15	14,10	9,10	1,107	0,137	0,015	9,945	1,092	R\$ 46.135,41
16	9,80	4,80	0,850	0,080	0,017	7,440	0,640	R\$ 32.509,33
17	11,60	6,60	0,850	0,110	0,017	7,680	0,880	R\$ 32.509,33
18	14,00	9,00	0,850	0,150	0,017	8,000	1,200	R\$ 32.509,33
19	19,45	14,45	1,107	0,217	0,015	10,587	1,734	R\$ 46.135,41
20	9,85	4,85	0,850	0,081	0,017	7,447	0,647	R\$ 32.509,33
21	9,65	4,65	0,850	0,078	0,017	7,420	0,620	R\$ 32.509,33
22	12,45	7,45	0,850	0,124	0,017	7,793	0,993	R\$ 32.509,33
23	12,55	7,55	1,107	0,113	0,015	9,759	0,906	R\$ 46.135,41
24	6,10	1,10	0,850	0,018	0,017	6,947	0,147	R\$ 32.509,33
25	12,40	7,40	0,850	0,123	0,017	7,787	0,987	R\$ 32.509,33
26	15,95	10,95	0,850	0,183	0,017	8,260	1,460	R\$ 32.509,33
27	7,05	2,05	0,850	0,034	0,017	7,073	0,273	R\$ 32.509,33
28	8,95	3,95	0,850	0,066	0,017	7,327	0,527	R\$ 32.509,33
29	11,25	6,25	0,850	0,104	0,017	7,633	0,833	R\$ 32.509,33
30	14,05	9,05	0,850	0,151	0,017	8,007	1,207	R\$ 32.509,33
31	6,45	1,45	1,107	0,022	0,015	9,027	0,174	R\$ 46.135,41
32	11,15	6,15	1,107	0,092	0,015	1,199	0,092	R\$ 5.766,93
33	15,00	10,00	0,850	0,167	0,017	1,017	0,167	R\$ 4.063,67
34	13,35	8,35	0,850	0,139	0,017	0,989	0,139	R\$ 4.063,67
35	18,85	13,85	0,850	0,231	0,017	1,081	0,231	R\$ 4.063,67
36	11,15	6,15	0,850	0,103	0,017	0,953	0,103	R\$ 4.063,67
37	14,05	9,05	0,850	0,151	0,017	1,001	0,151	R\$ 4.063,67
38	13,55	8,55	0,850	0,143	0,017	0,993	0,143	R\$ 4.063,67
39	15,75	10,75	0,850	0,179	0,017	1,029	0,179	R\$ 4.063,67
40	12,85	7,85	0,850	0,131	0,017	0,981	0,131	R\$ 4.063,67
41	12,65	7,65	0,850	0,128	0,017	0,978	0,128	R\$ 4.063,67
42	14,00	9,00	0,850	0,150	0,017	1,000	0,150	R\$ 4.063,67
43	14,05	9,05	0,850	0,151	0,017	1,001	0,151	R\$ 4.063,67
44	29,80	24,80	1,400	0,372	0,015	3,544	0,744	R\$ 14.368,00
45	30,20	25,20	1,400	0,378	0,015	5,334	1,134	R\$ 21.552,00
46	5,40	0,40	0,850	0,007	0,017	0,857	0,007	R\$ 4.063,67

Fonte: Autor.

Para os equipamentos com tecnologia de fluido refrigerante R-410A, em todos os ambientes projetados do empreendimento foi necessário a utilização de carga adicional de fluido refrigerante, tendo em vista que ultrapassaram o padrão de carga

advindos de fábrica. Já os principais indicadores para os cálculos de geração de créditos de carbono estão as colunas do CATA, CPTA e CAA, dando destaque para a última que nos ambientes DA 12 a 31, onde os valores ficaram bem acima do convencional, se trata dos ambientes locados no pavimento tipo, ou seja, há a multiplicação do número de equipamentos por ambientes e replicado o número de andares que o mesmo está disposto.

Conforme descrito na seção 3.5 da metodologia, é aplicado a média para obter os valores padrão para todos os dados de análise, em sua respectiva capacidade de climatização, bem como o fluido utilizado nessa classe de equipamentos, onde a tabela 11 foi usada de apoio para o levantamento dos valores padrões para cada uma das capacidades de equipamento dispostos com fluido R-410A, podendo ser observada abaixo.

Tabela 11 – Dados padronizados para os equipamentos de R-410A

Capacidade [BTU/h]	CPF	CAF	IDRS	VAU
12.000	0,850	0,017	5,83	R\$ 4.063,67
18.000	1,107	0,015	6,20	R\$ 5.766,93
24.000	1,400	0,015	6,00	R\$ 7.184,00

Fonte: Autor.

Para os equipamentos que utilizam o fluido R-32, utilizou-se da tabela 12, que possui as mesmas configurações para base de apoio, com os valores padrões para cada uma das capacidades de climatização, conforme a seguir:

Tabela 12 – Dados padronizados para os equipamentos de R-32

Capacidade [BTU/h]	CPF	CAF	IDRS	VAU
12.000	0,773	0,017	6,60	R\$ 4.398,22
18.000	1,067	0,018	6,18	R\$ 6.289,48
24.000	1,290	0,018	6,72	R\$ 6.999,00

Fonte: Autor.

De maneira similar aos cálculos para obter os volumes de massa para o fluido R-410A, obteve-se os valores para o sistema com fluido refrigerante R-32, uma vez que o diâmetro da tubulação, bem como pressão de trabalho e GWP não alteraram a caracterização do modelo de cálculo adotado para o presente estudo.

Com os dados padronizados, foi possível realizar a estimativa das emissões de CO₂ baseadas nas características dos equipamentos instalados no empreendimento. A análise considerou não apenas a quantidade de unidades e suas respectivas capacidades, mas também as especificações técnicas médias obtidas no levantamento, proporcionando uma visão abrangente do impacto ambiental relacionado à climatização do edifício.

Os dados obtidos são considerados bons e confiáveis por diversas razões, dentre elas, a pesquisa de mercado que evitou produtos promocionais, focando apenas em equipamentos que refletem a média dos produtos disponíveis para compra pelos investidores a médio e longo prazo, garantindo que os dados não estejam enviesados por preços temporários ou modelos fora do padrão de mercado, proporcionando uma análise mais realista do custo-benefício das tecnologias disponíveis no mercado.

Além disso, a coleta foi feita com base em dados de engenharia diretamente de fabricantes e de agências reguladoras, o que proporciona confiabilidade às informações, assegurando que os valores são exatamente iguais às especificações técnicas e de desempenho dos equipamentos.

A representatividade média busca obter um ponto de equilíbrio entre os mais diversos equipamentos que poderiam ser escolhidos pelos investidores para o empreendimento hoteleiro, servindo como um parâmetro confiável para análise de viabilidade econômica e técnica, facilitando a tomada de decisão para a implementação de tecnologias com fluido refrigerante R-32 ou R-410A.

Logo, os dados fornecidos nas tabelas são bons, permitindo uma avaliação detalhada e precisa dos benefícios e desvantagens de cada opção tecnológica dentro do contexto do estudo proposto, onde a qualidade dos dados dá suporte às análises subsequentes.

Durante o levantamento das características dos equipamentos de ambos os fluidos, notou-se que ambos possuem a mesma restrição em relação ao comprimento que a carga padrão de fluido refrigerante advinda de fábrica irá atender, 5 metros, sendo assim, o valor de CPL permanece o mesmo na segunda planilha, alterando apenas os valores de CPF, CAF, IDRS e VAU para os equipamentos em questão, que serão computados na tabela 13 apresentada abaixo.

Tabela 13 – Dados da instalação dos equipamentos de R-32

DA	CTT	CET	CPF	CAU	CAF	CATA	CPTA	CAA
1	7,55	2,55	1,067	0,047	0,018	2,227	0,094	R\$ 12.578,96
2	18,60	13,60	0,773	0,227	0,017	1,000	0,227	R\$ 4.398,22
3	11,90	6,90	0,773	0,115	0,017	0,888	0,115	R\$ 4.398,22
4	16,25	11,25	1,067	0,206	0,018	2,546	0,413	R\$ 12.578,96
5	18,05	13,05	0,773	0,218	0,017	0,991	0,218	R\$ 4.398,22
6	11,05	6,05	0,773	0,101	0,017	0,874	0,101	R\$ 4.398,22
7	15,60	10,60	1,290	0,194	0,018	2,969	0,389	R\$ 13.998,00
8	17,65	12,65	0,773	0,211	0,017	0,984	0,211	R\$ 4.398,22
9	17,30	12,30	0,773	0,205	0,017	0,978	0,205	R\$ 4.398,22
10	19,65	14,65	0,773	0,244	0,017	1,018	0,244	R\$ 4.398,22
11	18,65	13,65	0,773	0,228	0,017	1,001	0,228	R\$ 4.398,22
12	13,50	8,50	1,290	0,156	0,018	11,567	1,247	R\$ 55.992,00
13	17,35	12,35	0,773	0,206	0,017	7,833	1,647	R\$ 35.185,79
14	11,45	6,45	0,773	0,108	0,017	7,047	0,860	R\$ 35.185,79
15	14,10	9,10	1,067	0,167	0,018	9,868	1,335	R\$ 50.315,84
16	9,80	4,80	0,773	0,080	0,017	6,827	0,640	R\$ 35.185,79
17	11,60	6,60	0,773	0,110	0,017	7,067	0,880	R\$ 35.185,79
18	14,00	9,00	0,773	0,150	0,017	7,387	1,200	R\$ 35.185,79
19	19,45	14,45	1,067	0,265	0,018	10,653	2,119	R\$ 50.315,84
20	9,85	4,85	0,773	0,081	0,017	6,833	0,647	R\$ 35.185,79
21	9,65	4,65	0,773	0,078	0,017	6,807	0,620	R\$ 35.185,79
22	12,45	7,45	0,773	0,124	0,017	7,180	0,993	R\$ 35.185,79
23	12,55	7,55	1,067	0,138	0,018	9,641	1,107	R\$ 50.315,84
24	6,10	1,10	0,773	0,018	0,017	6,333	0,147	R\$ 35.185,79
25	12,40	7,40	0,773	0,123	0,017	7,173	0,987	R\$ 35.185,79
26	15,95	10,95	0,773	0,183	0,017	7,647	1,460	R\$ 35.185,79
27	7,05	2,05	0,773	0,034	0,017	6,460	0,273	R\$ 35.185,79
28	8,95	3,95	0,773	0,066	0,017	6,713	0,527	R\$ 35.185,79
29	11,25	6,25	0,773	0,104	0,017	7,020	0,833	R\$ 35.185,79
30	14,05	9,05	0,773	0,151	0,017	7,393	1,207	R\$ 35.185,79
31	6,45	1,45	1,067	0,027	0,018	8,746	0,213	R\$ 50.315,84
32	11,15	6,15	1,067	0,113	0,018	1,179	0,113	R\$ 6.289,48
33	15,00	10,00	0,773	0,167	0,017	0,940	0,167	R\$ 4.398,22
34	13,35	8,35	0,773	0,139	0,017	0,913	0,139	R\$ 4.398,22
35	18,85	13,85	0,773	0,231	0,017	1,004	0,231	R\$ 4.398,22
36	11,15	6,15	0,773	0,103	0,017	0,876	0,103	R\$ 4.398,22
37	14,05	9,05	0,773	0,151	0,017	0,924	0,151	R\$ 4.398,22
38	13,55	8,55	0,773	0,143	0,017	0,916	0,143	R\$ 4.398,22
39	15,75	10,75	0,773	0,179	0,017	0,953	0,179	R\$ 4.398,22
40	12,85	7,85	0,773	0,131	0,017	0,904	0,131	R\$ 4.398,22
41	12,65	7,65	0,773	0,128	0,017	0,901	0,128	R\$ 4.398,22
42	14,00	9,00	0,773	0,150	0,017	0,923	0,150	R\$ 4.398,22
43	14,05	9,05	0,773	0,151	0,017	0,924	0,151	R\$ 4.398,22
44	29,80	24,80	1,290	0,455	0,018	3,489	0,909	R\$ 13.998,00
45	30,20	25,20	1,290	0,462	0,018	5,256	1,386	R\$ 20.997,00
46	5,40	0,40	0,773	0,007	0,017	0,780	0,007	R\$ 4.398,22

Fonte: Autor.

A tabela 14, trás uma compactação das informações computadas para os dois tipos de fluido refrigerantes aplicados ao empreendimento hoteleiro de estudo, de modo a facilitar a compreensão e interpretação das características e variáveis de cada

uma das tecnologias.

Tabela 14 – Comparação de indicadores para os fluidos R-410A e R-32

Indicador/Fluido	R-410A	R-32	Relação
CPTe [Kg]	180,95	167,08	-7,66%
CTAE [Kg]	23,77	25,47	7,13%
CTFE [kg]	204,72	192,55	-5,94%
IDRS	6,01	6,50	8,11%
CATE	R\$ 890.049,62	R\$ 953.447,03	7,12%
GWP	1.920,00	667,00	-65,26%
tCO ₂ E	393,06	128,43	-67,33%

Fonte: Autor.

Onde:

- a) CPTe: Carga padrão total do empreendimento
- b) CTAE: Carga total adicionada no empreendimento
- c) CTFE: Carga total de fluido do empreendimento
- d) CATE: Custo de aquisição total do empreendimento
- e) tCO₂E: Tonelada de dióxido de carbono equivalente

A comparação dos sistemas permite entender o comportamento de cada fluido refrigerante quando aplicado a um projeto de climatização em um empreendimento hoteleiro, destacando-se principalmente sobre o somatório de carga padrão advindos de fábrica para cada uma das tecnologias de fluido refrigerante.

A carga padrão do R-32 advinda de fábrica é cerca de 7,7% menor em relação ao equipamento de R-410A, ainda que sua pressão de trabalho seja maior e o comprimento admissível para essa carga seja o mesmo que o equipamento R-410A. Essa característica não é explicitamente descrita e apresentada nos manuais técnicos das fabricantes mas, de acordo com conforme SRC (2020), a menor quantidade de carga necessária se deve à maior eficiência térmica do R-32, permitindo atingir a mesma capacidade de resfriamento com uma quantidade reduzida de fluido. Essa eficiência torna o R-32 uma escolha vantajosa em termos ambientais e de desempenho, já que o fluido puro facilita a manutenção e o controle de qualidade ao longo do tempo de acordo com Turpin (2020).

A carga adicional necessária para equipamentos que utilizam R-32 é ligeiramente maior do que a exigida para o R-410A, particularmente ao considerar longas distâncias de tubulação. Apesar da sua grande capacidade de transferência térmica, exige ajustes na quantidade de fluido para compensar a eficiência ao longo de grandes linhas frigorígenas. De acordo com Walker (2021) em sistemas otimizados para R-32, a carga pode ser até 40% menor para certas aplicações, mas pode exigir um acréscimo quando o comprimento da tubulação excede o padrão de fábrica de 5 metros, especialmente em empreendimentos com grandes linhas de conexão.

O somatório da carga padrão com a carga adicional necessária para o funcionamento de ambos os sistemas, apresenta um volume de massa cerca de 6% menor para o fluido R-32. A equiparação das cargas quando o comprimento da linha tende a se aproximar do limite admissível, parece equilibrar o impacto de ambos os fluidos, mas isso não é uma verdade. É necessário aplicar ainda a conversão do impacto ambiental de cada uma das tecnologias para o monóxido de carbono, sendo a conversão uma multiplicação direta da massa pelo GWP característico de cada um dos fluidos refrigerantes, que será discutido mais a frente, no decorrer da seção.

Apesar do IDRS não ser um dos indicadores avaliados pelo presente estudo para o potencial de geração de créditos de carbono, é necessário destaca-lo para entender o impacto do mesmo dentro de um projeto que visa além de gerar receita para o conjunto de investidores, através do menor GWP entre as duas tecnologias, mas também reduzir os custos com consumo de energia e, reduzir os impactos ambientais pelo alto consumo de energia elétrica, que em diversas partes do planeta são de origem fóssil, que não é o caso do Brasil onde a maior matriz energética é de recursos hídricos. De acordo com Costa (2021) que avalia a transição tecnológica com foco eficiência energética desses equipamentos com fluidos refrigerantes R-410A e R-32 em 3 cenários diferentes, afirma que a economia de energia devido a utilização de equipamentos com R-32, poderia variar entre 3.308GWh e 7.218GWh no ano de 2025 apenas no Brasil, em função do maior IDRS desses equipamentos quando comparados aos que possuem o fluido R-410A, chegando economizar entre 10.548GWh e 23.017GWh no ano de 2030, segundo suas previsões.

Para encontrar o número de créditos de carbono (representados pela tCO₂D gerados pela instalação dos equipamentos, é necessário aplicar a fórmula 14 aos dados obtidos até o presente momento, a qual é a diferença entre os volumes de massa dos fluidos refrigerantes, multiplicados pelos respectivos valores de GWP e divididos por 1000 para encontrar as toneladas equivalentes de CO₂, podendo ver na tabela 15 essa conversão.

Tabela 15 – Geração de créditos de carbono da instalação

Indicador/Fluido	R-410A	R-32
tCO ₂ E	393,06	128,43
tCO ₂ D	264,63	

Fonte: Autor.

Onde:

- a) tCO₂E: Tonelada de dióxido de carbono equivalente
- b) tCO₂D: Tonelada de dióxido de carbono não emitidas pela instalação

A tabela 15 evidencia a quantidade de toneladas CO₂ que deixariam de ser emitidas em função da adoção dos fluidos refrigerantes na hora da instalação, con-

siderando que ao final da vida útil do equipamento, todo esse gás será vazado para atmosfera, em função de uma falha mecânica que acaba danificando a linha de fluido, por um vazamento decorrente de corrosão que leva a substituição do sistema ou até mesmo por um descarte inadequado de um técnico instalador. Vale ressaltar que a taxa de reaproveitamento de fluido entra apenas na manutenção dos equipamentos, onde eventualmente é feito o recolhimento do fluido refrigerante a fim de garantir que o reparo seja feito ao sistema com segurança e o novo fluido refrigerante é recarregado na linha de cobre do equipamento.

Ou seja, apenas a instalação dos equipamentos no seu primeiro ciclo de vida que é entre 5 e 10 anos, deixa de emitir a atmosfera cerca de 264,6 toneladas de CO₂ quando adotado o sistema com tecnologia de fluido refrigerante R-32.

Para obter o valor do impacto total da instalação no período de 20 anos, cujo o presente objeto de estudo visa abranger com sua complementariedade na geração de créditos de carbono dentro de um PDD, deve-se olhar para os problemas que podem ocorrer ao sistema previsto, sendo neste caso, basicamente composto pela falha de componentes mecânicos, corrosões ou manutenções que levam ao vazamento do fluido para a atmosfera, que é analisado através da fórmula 15, levando em consideração a taxa de vazamento anual do fluido, e a taxa de reaproveitamento do mesmo em manutenções ou substituições do sistema, sendo o resultado do cálculo apresentado pela tabela 16.

Tabela 16 – Geração de créditos de carbono por manutenções ao longo de 20 anos

Indicador	Valor
tCO ₂ D	264,63
CO _v	0,03
CO _r	0,03
tCO ₂ v	174,66

Fonte: Autor.

Onde,

- a) tCO₂D: Tonelada de dióxido de carbono não emitidas pela instalação
- b) CO_v: Correção por vazamento
- c) CO_r: Correção por reciclagem
- d) tCO₂v: Tonelada de dióxido de carbono não vazadas em 20 anos

O valor do impacto ambiental pela ocorrência de manutenções é de aproximadamente 174,66 toneladas de CO₂ em 20 anos, cerca de 34% menor do que a própria instalação dos equipamentos e a chegada ao fim da sua vida útil. Entretanto é um valor representativo, pois quase todos os sistemas passam por manutenções e esse gás irá parar na atmosfera, sendo necessário contabilizar seu valor de impacto, para que o sistema de climatização com tecnologia R-32, sendo mais ecologicamente sustentável,

possa ser viabilizado pela geração de créditos de carbono. De acordo com Cowan *et al.* (2011), uma proporção significativa das emissões ocorre devido a falhas nos sistemas, onde as análises do relatório mostram que, as principais causas de vazamentos incluem vedações e flanges com defeito, bem como falhas mecânicas e tubulações comprometida, destacando ainda que, vazamentos não identificados representaram mais de 20% dos casos, dificultando a análise e previsão de manutenção para mitigar esses impactos.

A instalação como um todo, ao implementar o fluido R-32, pode deixar de emitir ao longo de 20 anos 439,29 toneladas de CO₂ na atmosfera, que em termos de comparativo, de acordo com Oliveira Rodrigues e Almeida (2020) cada litro de gasolina corresponde a 2,5Kg de CO₂ emitidos na atmosfera, ou seja, a instalação de climatização prevista para o empreendimento hoteleiro do presente estudo emite o equivalente a 156.889,29 litros de gasolina queimada na atmosfera. Traduzindo para um indicador mais comum, considerando um carro com médio de consumo aproximada de 15 Km/litro, seria o equivalente a percorrer 2.353.339,3Km.

Nas seções seguintes, são avaliadas as gerações de valor pela comercialização desse crédito, bem como os custos envolvidos no processo de viabilização da instalação do sistema de climatização com fluido refrigerante R-32 em substituição do antigo R-410A.

4.6 PREÇOS DE CO₂ PRATICADOS NO MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL)

Durante a execução da parte de análise do presente estudo, foram realizadas diversas entrevistas com especialistas do setor de descarbonização e da geração de créditos de carbono, com a finalidade de entender com maior precisão o funcionamento do mercado de carbono e entregar uma análise que faça sentido para as partes interessadas (investidor, construtor, projetista, instaladores e usuário final) que farão uso do presente estudo para orientar suas tomadas de decisão frente as opções de tecnologia em fluidos refrigerantes.

Há dois mercados na comercialização dos créditos de carbono, sendo o primeiro aquele que é uma produção de crédito para consumo/venda direta, onde uma empresa que emite grandes quantidades de CO₂ na produção e distribuição de seus produtos, compensa financeiramente o seu impacto ambiental através de projetos de redução de emissão de CO₂ na atmosfera ou a conservação de recursos naturais que consomem o CO₂ da atmosfera.

Essa prática tem seu preço acordado entre a parte produtora e consumidora, na maioria das vezes tendo a parte consumidora como fundo de investimento para viabilizar o projeto de descarbonização. O valor da tonelada de CO₂ nessa modalidade oscila entre 10 a 20 reais, a depender do tipo de prática de geração à ser utilizada,

impacto social na região do projeto e riscos de viabilização.

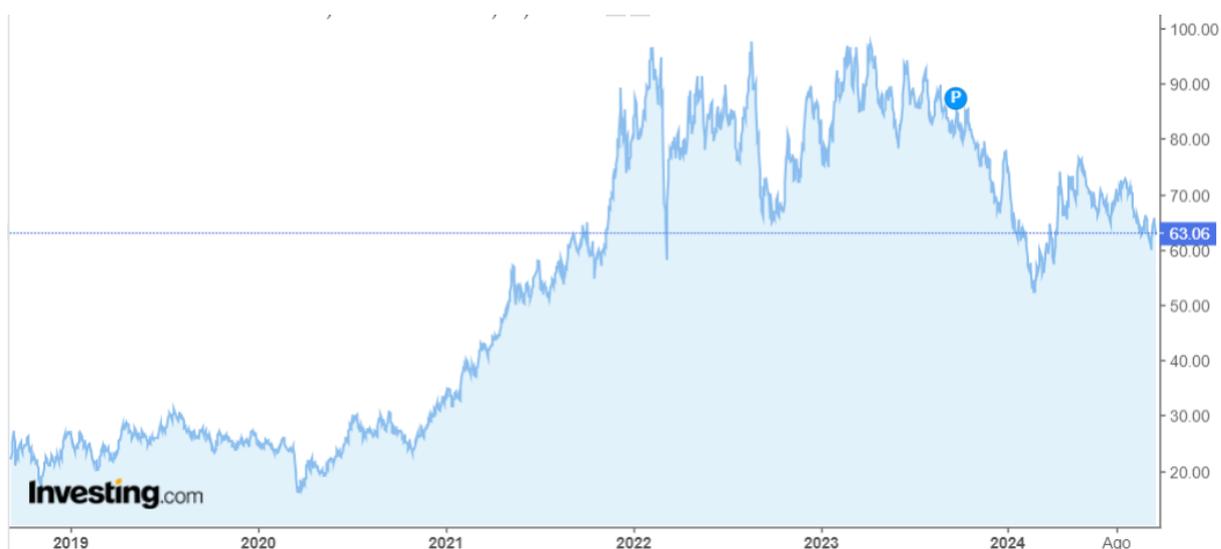
O segundo mercado é caracterizado pela geração de créditos de carbono sobre as mesmas práticas do primeiro, entretanto esse crédito não é vendido diretamente para uma empresa, mas tratado como um ativo financeiro (uma ação), muitas vezes comercializado em plataformas de investimentos à nível global, na expectativa da valorização da prática e tendo lucros à longo prazo.

O modelo de geração de crédito de carbono tem o preço definido pelo mercado de investimentos, sofrendo altas e baixas em função de mecanismos de mercado, durante a execução desse estudo, o valor médio da tonelada de CO₂ estava cotada na média de U\$63,06, com a última conversão de valores do presente estudo sendo feita no dia 17/10/2024 com a cotação do dólar em R\$5,65, totalizando um valor dólares, algo em torno de R\$356,30 por crédito de carbono futuro de acordo com Investing.com (2024) e segundo Credcarbo (2024) podendo chegar à R\$370.

No segundo modelo de comercialização do crédito de carbono, há períodos de alta e baixa valorização do ativo, sendo essa uma oportunidade de maximizar os lucros provenientes da venda do ativo na perspectiva do produtor, bem como em períodos de baixa em função da redução dos custos para o comprador.

Os gráficos históricos do segundo mercado, de janeiro e junho representam os melhores meses para a venda do crédito de carbono e, maio, agosto e setembro os melhores meses de compra do crédito de carbono, conforme destaca a figura 25.

Figura 25 – Histórico dos valores do Crédito Carbono Futuros



Fonte: (Investing.com, 2024)

A avaliação dos mercados e o período de comercialização não é o escopo do presente estudo, logo o valor base adotado para as análises posteriores será de R\$356,30 por crédito de carbono futuro, considerando o estudo como uma proposta de investimento no segundo modelo de mercado de créditos de carbono, para uma

valorização futura, tratando projeto como um "ativo financeiro" para a Holding e para o grupo de investidores.

4.7 ANÁLISE DAS RECEITAS E CUSTOS PARA VIABILIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO PARA O EMPREENDIMENTO HOTELEIRO DE MÉDIO PORTE

O cálculo da receita gerada pelos créditos de carbono do empreendimento foi realizado a partir da conversão do sistema de climatização do fluido refrigerante R410-A para o R-32. Essa conversão não apenas trouxe vantagens econômicas diretas, mas também resultou em um menor impacto ambiental, considerando que o R-32 possui um Potencial de Aquecimento Global (GWP) significativamente inferior ao do R410-A.

O processo de conversão envolveu a contabilização do volume total de gás refrigerante utilizado, conforme descrito anteriormente, e a subsequente aplicação dos valores de GWP para ambos os fluidos.

A redução nas emissões de CO₂ equivalentes, obtida através do uso do R-32, foi então convertida em créditos de carbono. Esses créditos podem ser comercializados no mercado de carbono, gerando uma receita adicional para o empreendimento.

Na tabela 17, pode ser observada a redução equivalente em toneladas de CO₂, bem como a receita agregada com os créditos de carbono no empreendimento em questão, onde os valores adotados por tonelada de CO₂ foram discutidos na seção anterior.

Agora, os custos de implementação são representados pela diferença de valores de aquisição dos diferentes tipos de fluidos refrigerante, onde os equipamentos de R-32 são em média 7,12% mais elevados em relação aos equipamentos com tecnologia de fluido refrigerante R-410A. Entretanto a vida útil de tais equipamentos, de acordo com estudos da ANSI/ASHRAE (2023), são em torno de 10 anos, valor próximo com o encontrado pela pesquisa realizada do Autor. Ou seja, para o período de análise 20 anos, conforme a duração do fluido refrigerante R-410A na atmosfera, serão feitas 2 trocas de equipamento nesse espaço tempo.

Os custos de carga adicional de gás refrigerante ao sistema de climatização ocorre em 2 etapas distintas, a primeira se refere ao custo atrelado a instalação dos equipamentos, representada pelo comprimento de linha que excede o comprimento da carga padrão de fluido refrigerante advinda de fábrica.

A segunda etapa ocorre na recarga de fluido refrigerante ao sistema, devido a vazamentos decorrente de falhas mecânica, corrosões ou até mesmo de manutenções feitas aos equipamentos, essa recarga é mensurada em função de uma taxa de vazamento anual, que conforme a ANSI/ASHRAE (2023) ocorre em torno de 3% ano ano de todo o fluido presente no sistema, mas que outros autores como Silva *et al.* (2019) afirmam que pode variar em até 7% de todo o fluido do sistema ao ano, ou

de acordo com Assmann (2017) "no Brasil esta taxa de vazamento e reposições dos fluidos podem alcançar 100% da carga devido a condições, por vezes, precárias das instalações..

Ambos os custos são diretamente correlacionados com o preço de botija praticado para cada um dos fluidos refrigerantes, em pesquisas na internet, foi possível definir os seguintes custos de aquisição em:

- a) R32 - Cilindro de 3Kg = R\$453,00
- b) R410a - Cilindro de 11,34Kg = R\$556,00

Logo, os preços médios fixados por quilograma para os fluidos R-410A e R-32 são respectivamente R\$49,53 e R\$151,00.

Por fim, o último custo significativo para o objeto de estudo é o do PDD, sendo o custo atrelado ao projeto de estudo e creditação dos créditos de carbono para a proposta de descarbonização, o mesmo é geralmente executado para projetos com foco em eficiência energética em construções, onde o presente estudo visa complementar a geração de créditos, maximizando os lucros dos projetos já existentes logo, o mesmo não será tratado aqui como um custo direto para a substituição dos fluidos refrigerantes.

Todos os custos citados acima, exceto o custo do PDD, são referentes à diferença de custos entre os sistemas de fluido refrigerante R-410A e R-32, tendo em vista que a execução e viabilização de todos ocorreriam independente do sistema adotado, sendo a diferença de valores investidos em ambos os casos que resultarão no projeto com maior retorno econômico.

Logo, os valores obtidos pela análise detalhada acima e também tratada pela metodologia, pode ser observada na tabela 17 a seguir.

Tabela 17 – Receita e custos envolvidos no processo de geração de créditos de carbono futuro

Indicador/Fluido	R-410A	R-32	Caixa	Ocorrência
VC [R\$]	–	–	R\$ 356,30	–
RCi	–	–	R\$ 188.575,50	2x em 20 anos
RCr	–	–	R\$ 62.229,91	18x em 20 anos
CAE	R\$ 1.780.099,24	R\$ 1.906.894,05	-R\$ 126.794,81	2x em 20 anos
CACA [R\$/Kg]	R\$ 49,03	R\$ 151,00	-R\$ 101,97	18x em 20 anos
CME	R\$ 5.420,21	R\$ 15.700,67	-R\$ 10.280,46	18x em 20 anos
CIE	R\$ 2.331,20	R\$ 7.691,46	-R\$ 5.360,26	2x em 20 anos
CP	–	–	R\$ 0,00	0x em 20 anos
LC	–	–	R\$ 108.267,91	1x em 20 anos

Fonte: Autor.

Onde:

- a) VC: Preço dos créditos de carbono no mercado
- b) RCi: Receita de instalação

- c) RCr: Receita de recarga
- d) CAE: Custos de aquisição dos equipamentos
- e) CACA: Custo da quilograma do fluido refrigerante à preço de mercado
- f) CME: Custos de manutenção dos equipamentos
- g) CIE: Custos de instalação dos equipamentos
- h) CP: Custo Project Design Document
- i) LC: Lucro do projeto

A receita de instalação foi identificada como a maior parcela representativa da geração de créditos de carbono no projeto, correspondendo a mais de 75% do total de receita gerada ao longo do período de análise de 20 anos. Este dado é importante, refletindo o peso financeiro da implementação de um sistema de climatização com tecnologias sustentáveis, onde os sistemas de climatização baseados no fluido R-32, apesar de ter um custo de aquisição, instalação e manutenção maior, prevê uma potencial fonte de geração de receita. A geração de valor ao longo do tempo, ainda que proporcional à durabilidade dos sistemas instalados, mostra uma duplicação do valor em 20 anos, resultado do ciclo de substituição de equipamentos.

A receita proveniente de vazamentos, apesar de ocorrerem anualmente, representam uma contribuição financeira menor, devido à baixa taxa de vazamento dos sistemas de climatização do tipo split Hi-wall, reduzindo o impacto ambiental significativamente em comparação com outros tipos de sistema, como o de refrigeração industrial e varejista, que de acordo com a AIRAH (2012), possuem taxas de vazamento anuais em torno de 12,5%. Segundo a Cowan *et al.* (2011), a baixa taxa de vazamento em sistemas bem mantidos pode reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa, apesar de pequenos vazamentos contínuos ainda representarem uma fonte relevante de impacto ambiental. Ou seja, embora as emissões anuais sejam pequenas, a soma dos vazamentos ao longo da vida útil de um sistema pode representar um volume considerável de CO₂ equivalente, justificando a maior necessidade de controle sobre essas falhas.

Quanto aos custos de aquisição (CAE), instalação (CIE) e manutenção (CME) de equipamentos, estes estão diretamente atrelados a fatores de mercado, reduzidos a questão de oferta e demanda, influenciando diretamente os custos de fabricação dos equipamentos, que são repassados aos consumidores. Entretanto, a adoção gradual de novas tecnologias ao longo do tempo tende a reduzir esses custos, um exemplo disso é o comportamento do custo dos fluidos refrigerantes no mercado, como o R-22, onde hoje tem um valor elevado devido à sua proibição comercial e, o R-410A, no momento de seu lançamento, tinha um custo relativamente alto, mas a ampla adoção global resultou em uma queda considerável no preço.

Hoje, há uma curva de aprendizado do mercado ocorrendo novamente, com os custos de aquisição do R-410A elevando-se, enquanto os custos de aquisição de fluido refrigerante e de equipamentos com tecnologia R-32 vem sendo reduzidos ano a ano. De acordo com Repair (2024), o preço de aquisição do quilo do fluido R-22 disparou cerca de 400% desde 2017, e o R-410A subiu mais de 150%, conforme mostra a tabela 18.

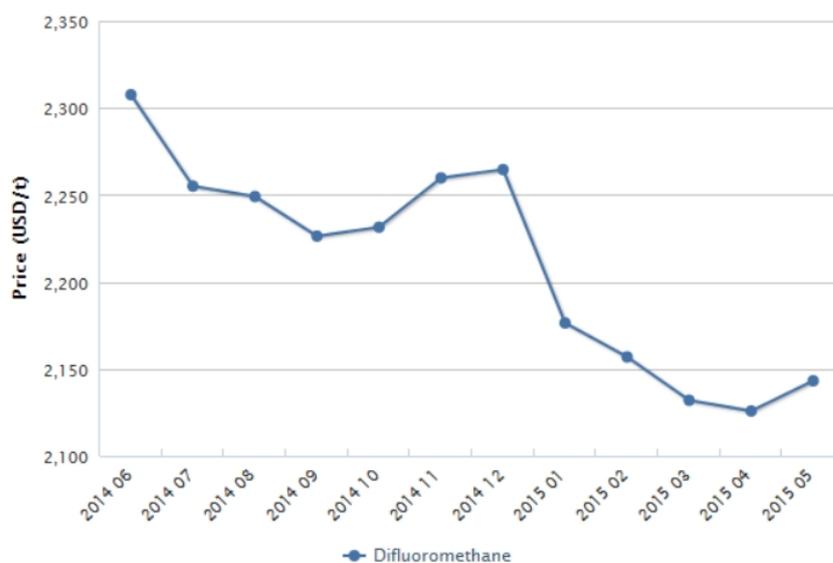
Tabela 18 – Valor dos fluidos refrigerantes R-22 e R-410 entre 2017 e 2024

Year	↕ R410a	↕ R22
2024 Refrigerant Cost Per Pound	\$90	\$250
2023 Refrigerant Cost Per Pound	\$49	\$195
2022 Refrigerant Cost Per Pound	\$45	\$145
2021 Refrigerant Cost Per Pound	\$45	\$80
2020 Refrigerant Cost Per Pound	\$42	\$70
2019 Refrigerant Cost Per Pound	\$40	\$60
2018 Refrigerant Cost Per Pound	\$37	\$55
2017 Refrigerant Cost Per Pound	\$35	\$50

Fonte: (Repair, 2024)

Com o R-32, espera-se que os custos de aquisição na segunda substituição de equipamentos sejam drasticamente menores, contribuindo para o aumento da margem de lucratividade do projeto pois, de acordo com Data e Intelligence (2016), o preço de aquisição do R-32 vem ano a ano sendo reduzido à padrões competitivos para suprir a demanda mundial por fluidos com menor impacto ambiental, sendo essa produção fortemente alimentada por um programa de incentivo do governo Chinês. A redução do valor do fluido refrigerante R-32 para exportação na China, pode ser observada pela figura26.

Figura 26 – Valor do fluido refrigerante R-32 entre 2014 2025



Fonte: (Data; Intelligence, 2016)

Com base na análise realizada até o presente momento entre os equipamentos que utilizam os fluidos refrigerantes R-32 e R-410A, é possível complementar que os custos de aquisição dos equipamentos com fluido R-32 são apenas 7,12% superiores em relação aos equipamentos com tecnologia R-410A. No entanto, essa diferença pode ser rapidamente compensada no primeiro ano de operação devido à maior eficiência energética dos equipamentos que utilizam R-32, onde a eficiência energética reduz o consumo de energia, resultando em economia significativa nas despesas operacionais.

Esse dado pode ser comparado com os resultados apresentados por Costa (2021), na qual ele destaca que os custos iniciais associados à adoção de tecnologias de baixo GWP, como o R-32, podem ser recuperados rapidamente graças à economia proporcionada pela eficiência energética superior, cuja em seu estudo, são avaliados 3 cenários e em todos eles o payback da transição é menor à 1 ano. A análise corrobora com o que foi descrito alguns parágrafos atrás, onde o quanto mais a tecnologia se torna difundida e a escala de produção aumenta, os custos de aquisição dos equipamentos tendem a diminuir substancialmente em futuras substituições, ampliando ainda mais a margem de lucratividade do projeto e a satisfação dos consumidores.

Portanto, a transição para equipamentos mais eficientes e com menor impacto ambiental não apenas viabiliza a geração de créditos de carbono, mas também oferece um retorno econômico vantajoso para o empreendimento hoteleiro, contribuindo para a sustentabilidade financeira e ambiental a longo prazo.

Na próxima seção, será abordado o Retorno sobre o Investimento (ROI), analisando os benefícios econômicos proporcionados pela transição para equipamentos com fluido refrigerante R-32 e o impacto desses benefícios na viabilidade financeira

do projeto.

4.8 RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO (ROI)

Conforme mencionado na seção de metodologia, o ROI leva em consideração o ganho dos investimentos em relação aos custos para viabilização, sendo essencial estabelecer a relação entre os custos e as receitas provenientes da implementação do sistema proposto pelo objeto de análise.

Os cálculos indicam um ROI aproximado de 76%, o que representa um saldo positivo na implementação do projeto de geração de créditos de carbono a partir de fluidos refrigerantes. Um ROI de 76% indica que a receita gerada pelos investimentos é 76% superior ao custo inicial do projeto, demonstrando a atratividade econômica do empreendimento.

A avaliação sobre o que constitui um bom ROI pode variar dependendo do setor e do contexto, onde em geral, um ROI elevado é um sinal positivo, indicando que o retorno é significativamente superior ao investimento inicial. De acordo com Lawler (2024), um ROI acima de 50% é geralmente considerado um excelente indicador de viabilidade, bem como Batista *et al.* (2019) trás que o ROI de empresas de capital aberto do setor da construção civil estão em aproximadamente 4,2%, mostrando que o projeto é lucrativo e que o retorno ocorre de maneira relativamente rápida. No caso deste projeto, o ROI obtido reforça a viabilidade financeira e a atratividade para os investidores.

O resultado demonstra que o investimento é não apenas viável, mas também lucrativo a curto prazo. Uma vez solicitado o registro do PDD, concluída a instalação dos sistemas de climatização e aprovada a vistoria pelo órgão certificador, já é possível vender os créditos de carbono e obter os lucros esperados.

Além dos benefícios ambientais obtidos pela transição para fluidos refrigerantes de menor impacto, essa escolha de negócio melhora a contabilidade financeira do empreendimento hoteleiro de médio porte, gerando receita adicional para o grupo investidor. Isso destaca a importância de considerar o impacto ambiental dos equipamentos e tecnologias empregados na construção, optando por soluções mais eficientes e sustentáveis.

A sensibilidade do ROI está diretamente ligada aos custos e receitas resultantes das decisões no projeto. Essas possíveis flutuações serão analisadas nas seções subsequentes, especialmente ao discutir a diluição do custo do Project Design Document PDD dentro do contexto do objeto de estudo.

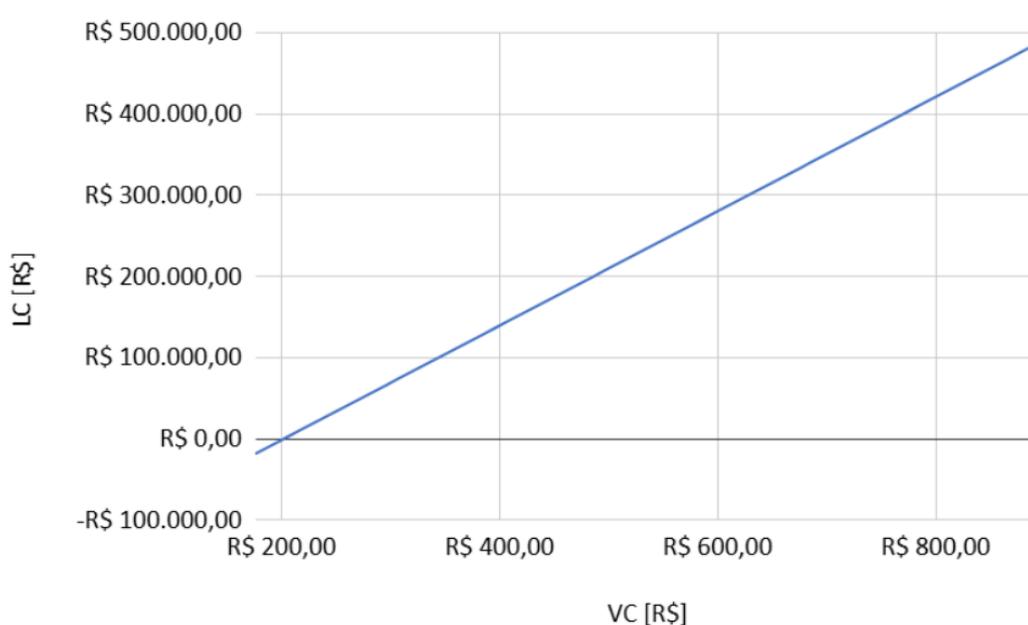
4.9 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade ajuda a entender como variações em diferentes parâmetros podem impactar a viabilidade econômica do projeto de geração de créditos de carbono no empreendimento hoteleiro de médio porte. Onde no presente este estudo, foram analisados os cenários de variação do valor do crédito de carbono, variação da taxa de vazamento de fluido refrigerante, variação do custo do fluido em decorrência da transição de tecnologia e a introdução do custo do PDD e sua diluição em um ou mais empreendimentos hoteleiros de médio porte.

4.9.1 Variação do valor do crédito de carbono

A primeira análise considerou diferentes cenários de preço para os créditos de carbono, e como o valor de mercado dos créditos pode ser volátil, variando de acordo com a oferta, demanda e políticas regulatórias, esta análise visa avaliar o impacto dessas flutuações na receita do projeto. Com o aumento do valor do crédito de carbono, a receita gerada pela mitigação das emissões de GEE também aumenta, maximizando as receitas e, conseqüentemente melhorando o ROI, o que reduz o tempo de retorno do investimento. Em contrapartida, a queda no preço dos créditos de carbono pode diminuir significativamente a lucratividade e atratividade do projeto. Na figura 27 é possível observar a variação do valor do crédito de carbono desde uma possível queda de 50% para cima ou para baixo e o respectivo valor para o lucro do projeto e o respectivo ROI.

Figura 27 – Lucro com a variação do valor do crédito de carbono (VC)



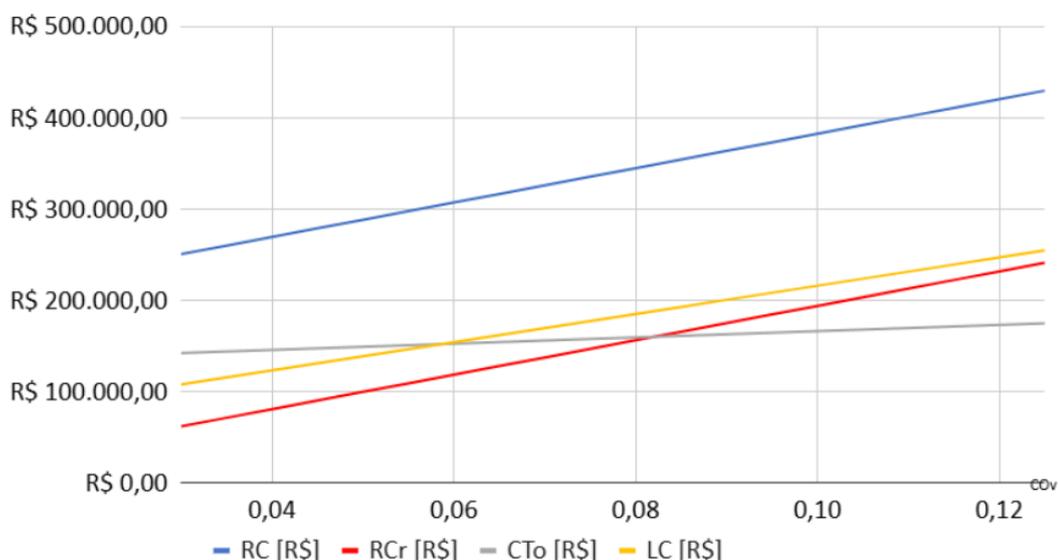
Fonte: (Autor)

A figura 27 ilustra com clareza a curva de margem de lucro em relação ao preço praticado por cada tonelada de CO₂ pelo mercado, ou seja, para que a transição de tecnologia proposta pelo presente estudo se torne viável economicamente, sendo apenas mais uma variável dentro de um PDD, o ponto de equilíbrio do projeto se dá quando o valor de comercialização por tonelada de CO₂ é igual ou superior à R\$200,00 por tonelada de CO₂, mas de uma maneira geral, esse valor é maximizado quando olhamos para a eficiência energética, onde a junção das duas variáveis citadas, reduziria o valor mínimo de VC para patamares menores a fim de viabilizar o projeto, porém como está fora do escopo do estudo, essa análise não será tratada no documento.

4.9.2 Variação da taxa de vazamento

A taxa de vazamento do fluido refrigerante, apesar de ser uma parcela significativamente menor da geração de receita, afeta a viabilidade econômica e ambiental do projeto. Uma taxa maior de vazamento implica em perdas adicionais de fluido, aumentando os custos de reposição e reduzindo a eficiência dos sistemas de climatização, mas por outro lado, uma redução na taxa de vazamento pode melhorar os resultados econômicos, uma vez que menos fluido precisa ser adquirido e o impacto ambiental é mitigado. Outro ponto importante, é que quanto maior for a taxa de vazamento, maior se torna a mitigação dos impactos ambientais no caso da adoção de fluidos refrigerantes sustentáveis como o R-32 e por consequência, receita é gerada através dos créditos de carbono dessa variável de projeto. A análise de sensibilidade considera cenários de diferentes taxas de vazamento, desde uma taxa de 3% para sistemas residenciais de acordo com a ANSI/ASHRAE (2023), até sistemas de varejo, que podem ter taxas de vazamento de até 12,5%. A figura 28 mostra o comportamento da curva de receita e de custos com base na taxa de vazamento de fluido refrigerante, onde Custo Total (CTo) representa todos os custos envolvidos no projeto.

Figura 28 – Lucro com a variação da taxa de vazamento (COv)



Fonte: (Autor)

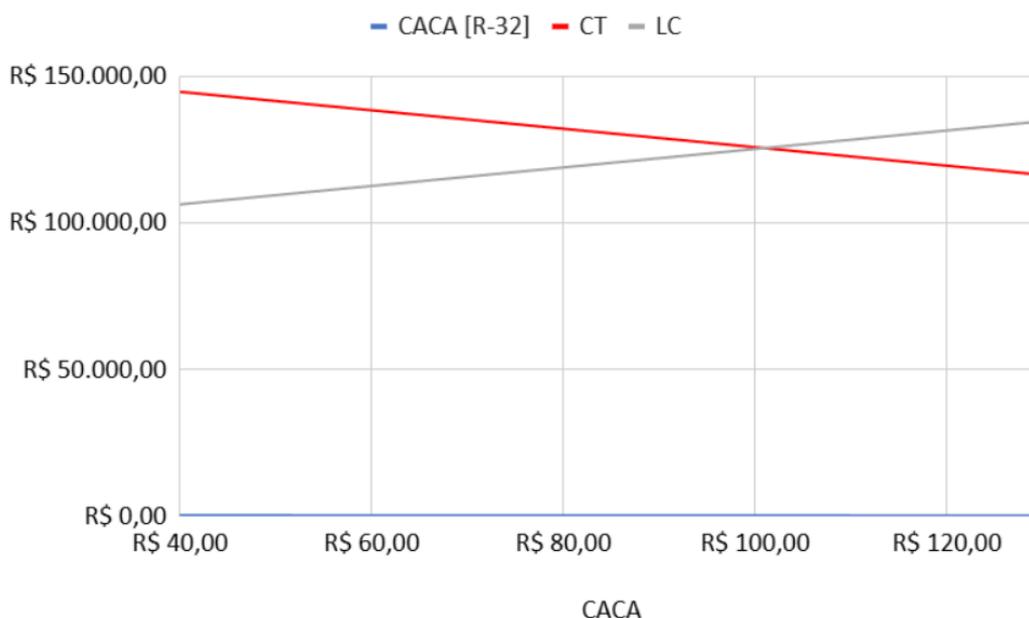
A figura 28 ilustra a evolução das receitas e custos atrelados diretamente com o vazamento de fluido refrigerante do sistema de climatização previsto para o empreendimento hoteleiro de médio porte, destacando principalmente a curva de Receita de recarga (RCr), onde é possível observar que quanto maior a taxa de vazamento do sistema, maior é a receita gerada através dessa variável de análise, de maneira mais acentuada que o custo atrelado à recarga de fluido refrigerante ao sistema ao longo do tempo, ou seja, gerando um paradoxo que, quanto mais fluido refrigerante vazar, maior é o lucro do empreendimento, apesar dos impactos ambientais causados por essa ação. Logo, esse dado destaca a necessidade de regulamentações e um controle rigoroso sobre os vazamentos pelo governo, agências regulatórias, fiscalizadoras, técnicos e empresa que detém o projeto, para que lucros não sejam gerados indevidamente às custas de um impacto ambiental.

4.9.3 Variação do custo do fluido em decorrência da transição de tecnologia

Nesta análise, são considerados diferentes cenários de variação de custo do fluido refrigerante devido à transição para tecnologias mais sustentáveis, como o uso do R-32. À medida que o uso de fluidos de baixo GWP se tornam mais comuns no mercado, é esperado que o custo de aquisição do fluido refrigerante diminua, reduzindo o impacto financeiro inicial da transição. No presente cenário, onde a transição de tecnologias se faz necessária a médio/longo prazo, em função das regulamentações globais, a elevação dos custos atrelado ao fluido sustentável não é um ponto de análise, tendo em vista que cada vez mais ele se tornará a única opção, a proposta do presente

trabalho é a substituição imediata das tecnologias, a um custo o qual está sendo avaliado. Os questionamentos feitos em relação à variação do preço e seu impacto no projeto podem ser observados pela evolução dos custos e do lucro final, apresentados pela figura 29, que leva os parâmetros de transição de tecnologia de Data e Intelligence (2016) e Repair (2024).

Figura 29 – Lucro com a variação do valor de aquisição dos fluidos refrigerantes (CACA)



Fonte: (Autor)

Na figura 29 o custo dos fluidos refrigerantes foi baseado nas evoluções temporais de preço de acordo com Data e Intelligence (2016) e Repair (2024), essa variação se deu com uma variação de R\$5,00 em cada um dos fluidos refrigerante de maneira simultânea, iniciando com os valores de R\$40,00 e R\$155,00 para os fluidos R-410A e R-32 respectivamente e, indo até os valores de R\$130,00 e R\$65,00 para os fluidos R-410A e R-32. Em função do valor de aquisição dos fluidos refrigerantes serem muitas vezes menores do que a lucratividade do empreendimento, as curvas do valor do CACA dos fluidos R-410A e R-32 não aparecem na figura 29.

Entretanto, é possível destacar a evolução das curvas de custo total de viabilização e o lucro do projeto em decorrência a variação dos preços dos fluidos refrigerantes, sendo essa influenciada por dois motivos, sendo a primeira o preço do fluido e a segunda pela quantidade de gás requerida para cada tipo de tecnologia de fluido refrigerante, onde o sistema dotado de tecnologia R-32 requer menor volume de massa total, resultando um custo muito maior em relação à recarga de fluido R-410A, principalmente quando o custo do mesmo vai crescendo ao longo do tempo. Isso destaca que, equipamentos que usam fluido refrigerante R-410A terão seus custos cada

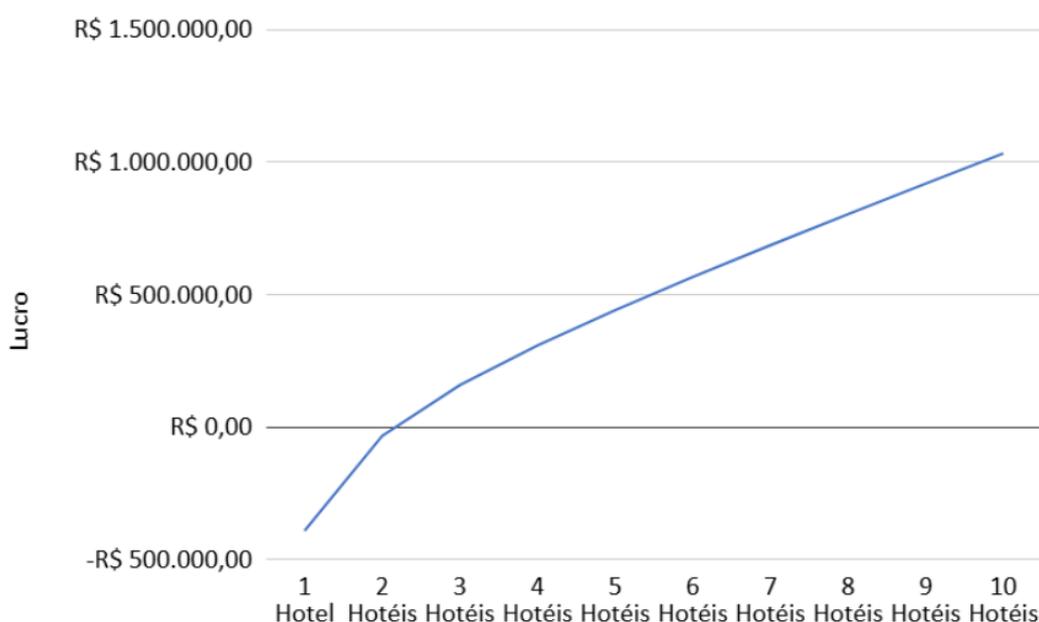
vez maiores com o passar dos anos, devido à menor oferta desse tipo de fluido no mercado, reflexo direto das restrições regulatórias para a produção e comercialização de fluidos com alto GWP.

4.9.4 Variação da diluição do PDD em mais de um empreendimento

A partir do pressuposto levantado nas do presente estudo, considerando que seja feito um PDD apenas visando a viabilização de créditos de carbono em empreendimentos hoteleiros de médio porte exclusivamente através de fluidos refrigerantes, é necessário diluir os custos do projeto na presente análise. Logo, a diluição dos custos do PDD em múltiplos empreendimentos pode influenciar significativamente o custo total, onde o custo por unidade reduz, melhorando o ROI e o retorno financeiro geral do projeto. Essa estratégia pode ser vantajosa em casos onde vários empreendimentos similares adotam simultaneamente tecnologias de baixo GWP e sistemas de climatização mais eficientes, maximizando os benefícios econômicos e ambientais, para o grupo de investidores e para a sociedade geral.

A implementação dessa análise junto ao balanço financeiro pode ser avaliada através da figura 30, que mostra a evolução da margem de lucro com a diluição dos custos entre 1 e 10 empreendimentos.

Figura 30 – Lucro com a variação da diluição do custo de projeto (PDD)



Fonte: (Autor)

Inicialmente à vinculação do custo de um projeto de geração de créditos de carbono à um único empreendimento hoteleiro de médio porte, utilizando apenas o fluido refrigerante como variável de análise para a geração de crédito de carbono

não é interessante, resultando perdas monetárias para o grupo de investidores do empreendimento, entretanto, se o projeto for viabilizado para no mínimo 3 hotéis com as mesmas características daquele analisado no presente objeto de estudo, já é possível obter um lucro de aproximadamente R\$158.137,00, apresentando um ROI de 26,61% ao investimento aportado no projeto dos 3 prédios.

Tal lucratividade pode ser maximizada através da diluição em um número maior de empreendimentos, na análise sobre o consumo energético ou até mesmo na implementação de outras tecnologias da construção civil para mitigação dos impactos ambientais da construção, evitando que mais toneladas de CO₂ sejam emitidas na atmosfera, gerando em contra-partida, lucro para o projeto através dos créditos de carbono.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo explorou a viabilidade econômica e ambiental da geração de créditos de carbono como através da substituição de fluidos refrigerantes com alto potencial de aquecimento global (GWP) em empreendimentos hoteleiros de médio porte, focando na transição do fluido R-410A para o R-32, demonstrando que essa substituição não apenas contribui para a redução de impactos ambientais, mas também potencializa o retorno financeiro para os empreendimentos que adotam essa prática.

Inicialmente, observou-se que o sistema mais comumente adotado é o split Hi-Wall, com fluido refrigerante R-410A, o qual possui um GWP elevado, aumentando o impacto ambiental no se refere ao aquecimento global. A transição para sistemas de fluido refrigerante R-32, que possui GWP significativamente menor, possibilita aos empreendimentos não só reduzem diretamente a sua pegada de carbono, mas possibilita a geração de créditos de carbono, dos quais podem ser comercializados no mercado, constituindo uma nova fonte de receita para tais empreendimentos, aumentando o retorno financeiro através implementação de práticas mais sustentáveis na construção e operação dos empreendimentos.

A redução de emissões proporcionada pela substituição de fluidos refrigerantes R-410A pelo R-32, contribui para uma diminuição significativa da quantidade de gases de efeito estufa (GEE) emitidos na atmosfera através da conversão da quantidade de CO₂ das instalações, sendo em média deixadas de ser emitidas 439,29 toneladas de CO₂ em 20 anos somente por um empreendimento.

A análise de viabilidade econômica mostrou que a receita obtida com a venda de créditos de carbono, apesar da elevação dos custos de operação a longo prazo em função do valor dos equipamentos e do fluido refrigerante R-32 comparativamente maiores, compensa amplamente os investimentos. O retorno sobre o investimento (ROI) foi projetado em torno de 76%, mostrando que o projeto de transição é financeiramente atrativo, particularmente em um cenário de mercado em que a valorização dos créditos de carbono e o crescimento da demanda por soluções sustentáveis estão em ascensão.

Além disso, os resultados destaca que a adoção de refrigerantes com menor GWP coloca os empreendimentos hoteleiros de médio porte com normas e compromissos ambientais nacionais e internacionais, como a Emenda de Kigali, Acordo de Paris e Protocolo de Kyoto, reforçando a imagem positiva de responsabilidade ambiental e sustentabilidade da construção. Essa prática pode agregar valor à marca do empreendimento, tornando-o mais atrativo para um público que prioriza práticas sustentáveis em suas escolhas de consumo, podendo assim, aumentar a receita através da venda ou locação das acomodações.

Logo, a adoção de fluidos refrigerantes sustentáveis, associada à geração de

créditos de carbono, demonstra uma estratégia viável e vantajosa tanto para a sustentabilidade econômica quanto ambiental em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Podendo esse ser um novo modelo de negócio a ser implementado no mercado para mudança de paradigma, geração de inovação e aumento de eficiência das construções, visando a redução dos impactos climáticos dos sistemas de climatização no setor hoteleiro.

Por meio do questionário, foi possível identificar uma grande necessidade de ampliar o conhecimento sobre fluidos refrigerantes, seus impactos ambientais e as boas práticas para reduzir a liberação desses compostos de fluido refrigerante na atmosfera. Sendo que o conhecimento precisa ser difundido não apenas entre os técnicos de refrigeração e climatização, que atuam diretamente na instalação e manutenção, mas também entre todos os participantes do mercado (fabricantes, vendedores e, principalmente, consumidores). Os consumidores, em especial, exercem papel importante na transição, pois suas preferências moldam o mercado, sendo eles que escolhem o design, a cor, o nível de ruído, o tipo de condensadora e a tecnologia do fluido refrigerante de seus equipamentos, influenciando diretamente as tendências e as práticas adotadas pela indústria.

O presente estudo contribuiu significativamente para a compreensão da viabilidade e das vantagens da substituição de fluidos refrigerantes R-410A para o R-32 em empreendimentos hoteleiros de médio porte, tanto no aspecto econômico quanto ambiental. A pesquisa demonstrou que a geração de créditos de carbono, através da substituição de fluidos refrigerantes, é uma estratégia promissora para o desenvolvimento sustentável do setor hoteleiro, impulsionando a adoção de tecnologias e práticas inovadoras, com impactos positivos na mitigação das mudanças climáticas e na rentabilidade dos empreendimentos.

A pesquisa também revelou a importância da conscientização sobre os impactos ambientais dos fluidos refrigerantes, demonstrando a necessidade de ampliar a difusão de conhecimento e boas práticas entre os diferentes atores do mercado, desde os técnicos e instaladores até os consumidores finais. O estudo evidenciou o papel fundamental da educação ambiental na promoção da sustentabilidade, e como a escolha consciente dos consumidores pode influenciar positivamente as tendências e práticas adotadas pela indústria.

Apesar do sucesso em atingir os objetivos propostos, algumas limitações do estudo abrem oportunidades para trabalhos futuros. Uma das recomendações é avaliar a influência da pressão de trabalho dos fluidos refrigerantes sobre a taxa de vazamento dos equipamentos, pois essa variável pode impactar significativamente a quantidade de CO₂ que uma instalação emite para a atmosfera, modificando a viabilidade econômica e o impacto ambiental nos projetos de substituição de fluidos refrigerantes. É interessante avaliar a inclusão dos efeitos da eficiência energética da transição dos

fluidos refrigerantes, de modo a quantificar os benefícios econômicos advindos da redução no consumo de energia em relação à tecnologia adotada em cada projeto.

A realização de uma análise mais detalhada sobre aspectos socioeconômicos se faz necessária, investigando como a transição de tecnologias de fluidos refrigerantes pode impactar a geração de empregos, o desenvolvimento de tecnologias nacionais e a rotina de comunidades locais. Sendo essa análise complementada por estudos de caso em diferentes regiões e contextos, promovendo uma compreensão mais completa sobre as externalidades do projeto. Também se propõe a inclusão de uma avaliação de ciclo de vida dos diferentes fluidos refrigerantes, considerando as emissões de gases de efeito estufa em todas as etapas, desde a produção até o descarte, o que pode fornecer uma perspectiva abrangente do impacto ambiental de cada alternativa.

Outra sugestão é incorporação de diversas fontes de energia renováveis, como solar e a eólica ao sistema de climatização do empreendimento, avaliando como a combinação dessas fontes pode aumentar a eficiência energética e reduzir ainda mais as emissões de gases que intensificam o efeito estufa. Essa análise pode incluir a modelagem de cenários híbridos, considerando a disponibilidade e complementaridade de diferentes fontes renováveis ao longo do ano. Por fim, sugere-se uma revisão abrangente dos incentivos fiscais e políticas públicas que podem promover a adoção de fluidos refrigerantes mais sustentáveis e a geração de créditos de carbono em empreendimentos hoteleiros de médio porte. Essa análise pode incluir a comparação entre diferentes regimes fiscais e a avaliação do impacto de políticas de incentivo à produção e comercialização de créditos de carbono.

REFERÊNCIAS

- ACTION, Climate. **The EU emissions trading system (EU ETS)**. [S.l.: s.n.], 2013.
- AIRAH, D. Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI) 2012. **Australian Institute of Refrigeration, Air conditioning and Heating**, 2012.
- AMAZONAS, Iuri Tavares *et al.* **Gestão ambiental na hotelaria: tecnologias e práticas sustentáveis aplicadas nos hotéis de João Pessoa-PB**. [S.l.]: Universidade Federal da Paraíba, 2014.
- ANSI/ASHRAE. Standard Method of Evaluating Zero Net Energy and Zero Net Carbon Building Performance. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - Standart**, 2023.
- ANUKWONKE, Charles C; ABAZU, Chinedu I. Green Business through Carbon Credits. *In: CLIMATE Change Alleviation for Sustainable Progression*. [S.l.]: CRC Press, 2022.
- ARORA, Ramesh Chandra. **Refrigeration and air conditioning**. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- ASHRAE, American Society of Heating Refrigerating; ENGINEERS, Air Conditioning. **Designation and Safety Classification of Refrigerants**. [S.l.: s.n.], 2010.
- ASSMANN, Rodrigo Felipe. Estratégia de retrofit do refrigerante hfc-22 em máquinas de refrigeração de uma indústria petroquímica visando a eficiência energética. Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- BARRETT, Scott. **Environment and statecraft: The strategy of environmental treaty-making: The strategy of environmental treaty-making**. [S.l.]: OUP Oxford, 2003.
- BATISTA, Alexandre Teixeira Norberto *et al.* Impacto da gestão do capital de giro na rentabilidade das empresas do setor de construção civil. **Revista de Administração IMED**, Faculdade Meridional-IMED, v. 9, n. 1, 2019.
- BBC. **Mudanças climáticas: o rápido e recente aquecimento dos oceanos que alarma cientistas**. [S.l.: s.n.], 2023.
<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2023/04/25/mudancas-climaticas-o-rapido-e-recente-aquecimento-dos-oceanos-que-alarma-cientistas.ghtml>.
- BBC, Isabelle Gerretsen. **How your fridge is heating up the planet**. [S.l.: s.n.], 2020.
https://www.bbc.com/future/article/20201204-climate-change-how-chemicals-in-your-fridge-warm-the-planet?ocid=global_future_rss.

BINOTTI, Andressa. O turismo e os empreendimentos hoteleiros: análise econômico-financeira das empresas do segmento de hotelaria listadas na bolsa de valores (B3-Brasil bolsa balcão) no período de 2012 a 2016, 2017.

BIRMINGHAM, University of. **Clean Cold and the Global Goals**. [S.l.: s.n.], 2016. <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/energy/Publications/Clean-Cold-and-the-Global-Goals.pdf>.

BODANSKY, Daniel; BRUNNÉE, Jutta; RAJAMANI, Lavanya. **International climate change law**. [S.l.]: Oxford University Press, 2017.

BORDERA, Juan. **El Niño y su mar (en llamas) en la era de la Gran Aceleración**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://ctxt.es/es/20230601/Firmas/43302/Juan-Bordera-corrientes-oceanos-cambio-climatico-calentamiento-el-nino.htm>.

BROHÉ, Arnaud *et al.* **Carbon markets: an international business guide**. [S.l.]: routledge, 2012.

CABOCLO, Adeildo. **Eficiência Energética: A Chave para um Futuro de Baixas Emissões**. [S.l.: s.n.], 2024.

CALESTINI, Eduardo Del Nery. **A questão dos créditos de carbono e sua viabilidade econômica ambiental**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

CALM, James M; HOURAHAN, Glenn C. Refrigerant Data Summary. **Engineered systems**, Business News Publishing Company, v. 18, n. 11, 2001.

CARVALHO, Mauricio. **Água no óleo, receita para o desastre**. [S.l.: s.n.], 2017.

CARVALHO, Micaele Martins de; MAGALHAES, Aline Souza; DOMINGUES, Edson P. **Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: Custos econômicos e potenciais de abatimento**. [S.l.]: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2022.

CENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A; KANOĞLU, Mehmet. **Thermodynamics: an engineering approach**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2011. v. 5.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Conhecimentos Gerais**. [S.l.: s.n.], 2004. <https://cetesb.sp.gov.br/prozoesp/perguntas-e-respostas/conhecimentos-gerais/#>.

CHANGE, Projected Climate. Global warming of 1.5 C. **World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland**, 2018.

CORRÊA, Lásaro Roberto. Sustentabilidade na construção civil. **Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil)-Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais**, 2009.

COSTA, Fernando Nascimento. **Índices Mínimos de Eficiência Energética e Uso de Fluido Refrigerante de Baixo GWP em Condicionadores de Ar Tipo Split no Brasil**. 2021. Tese (Doutorado) – [sn].

COWAN, David *et al.* REAL Zero—Reducing refrigerant emissions & leakage-feedback from the IOR Project. *In: IIR. PROCEEDINGS of the Institute of Refrigeration*. [S.l.: s.n.], 2011.

CREDCARBO, Assesoria em Creditos de Carbono. **Saiba como fazer o caculo da precificacao de carbono**. [S.l.: s.n.], 2024.

CUNHA JUNIOR, Nelson Boechat *et al.* **A Certificação verde no setor da construção civil: os benefícios da implementação da gestão e uso eficiente da água**. [S.l.: s.n.], 2012.

DAIKIN, Industries. **Ar condicionado DAIKIN - Manual de instalação - Split Hi Wall Advance**. [S.l.: s.n.], 2012.

DAIKIN, Industries. **R32: A nova era dos fluidos sintéticos**. [S.l.: s.n.], 2024.

DATA, CCM; INTELLIGENCE, Business. **China R32 market recovery devastated by increasing production capacity in 2015**. [S.l.: s.n.], 2016.

DEMIRALAY, Sercan; GENCER, Hatice Gaye; BAYRACI, Selcuk. Carbon credit futures as an emerging asset: Hedging, diversification and downside risks. **Energy Economics**, Elsevier, v. 113, 2022.

DREYFUS, Gabrielle *et al.* Assessment of climate and development benefits of efficient and climate-friendly cooling. **Climate & Clean Air Coalition and Institute for Governance & Sustainable Development**, 2020.

FDC, Fundação Dom Cabral. **Credito Carbono para Imagine**. [S.l.: s.n.], 2023.

FRIOTERMICA, Climatização LTDA. **que é um ar condicionado SPLIT?** [S.l.: s.n.], 2015. <http://friotermica1.hospedagemdesites.ws/blog/2015/09/24/o-que-e-um-ar-condicionado-split/>.

GENIÊR, Francielli; COSTA, Andréa; JUNIOR, Esly Costa. Ciclos de refrigeração: conceitos e estudos de eficiência. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.

GENTA, Maria Mônica Pereira. **A contabilidade ambiental como instrumento de gestão turística: o caso da hotelaria de Caxias do Sul**. [S.l.: s.n.], 2006.

GÓMEZ, Jessica Alexandra Calo; SOLORZANO, Diego Vera. Carbon credits as an alternative for the development of Las Damas, Alluriquín, Santo Domingo. **Espirales Revista Multidisciplinaria de investigación**, v. 7, n. 46, 2023.

GUPTA, Anil. Climate change and Kyoto protocol: An overview. **Handbook of environmental and sustainable finance**, Elsevier, 2016.

ICC, International Chamber of Commerce Brasil. **Opportunities for Brazil in Carbon Markets**. [S.l.: s.n.], 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA. **Implementing Effective Emissions Trading Systems**. [S.l.: s.n.], 2020.

INVESTING.COM. **Crédito Carbono Futuros - Dez 24 (CFI2Z4)**. [S.l.: s.n.], 2024. <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-streaming-chart>.

IPCC, Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas. **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing - Chapter08**. [S.l.: s.n.], 2018. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf.

IPCC, Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas. **Aquecimento Global de 1,5°C**. [S.l.: s.n.], 2019.

KIBERT, Charles J. **Sustainable Construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16, November 6-9, 1994, Tampa, Florida, USA**. [S.l.]: University of Florida, Center for Construction & Environment, 1994.

LAWLER, Jasper. **Return on Investment (ROI) vs Return on Equity (ROE) vs Return on Assets (ROA) vs Return on Capital (ROC)**. [S.l.: s.n.], 2024. <https://www.trading212.com/learn/investing-101/roi-roe-roa>.

LEITE JÚNIOR, Hamilton de França. **Sustentabilidade em empreendimentos imobiliários residenciais: avaliação dos custos adicionais para o atendimento dos requisitos de certificação ambiental**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

LEVINE, Joel S. Ozone, Climate, and Global Atmospheric Change. **Science Activities**, Taylor Francis Group, v. 29, n. 1, 1991. DOI: 10.1080/00368121.1992.10113007.

MAKHNATCH, Pavel; KHODABANDEH, Rahmatollah. The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 61, 2014.

MARTINS, Leonardo Victor Silva *et al.* **Estudo comparativo de um ar condicionado convencional utilizando um fluido refrigerante alternativo ao R-410A para aplicação em escritórios.** [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2023.

MIDEA, Group Co Ltd. **Manual do Proprietário - Split Hi Wall Luna.** [S.l.: s.n.], 2012.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional sobre Mudança do Clima.** [S.l.: s.n.], 2009.

MONTREAL, Protocolo de. **EMENDA DE KIGALI.** [S.l.: s.n.], 2017.
<https://www.protocolodemontreal.org.br/site/quem-somos/emenda-de-kigali>.

MONTREAL, Protocolo de. **PROTOCOLO DE MONTREAL.** [S.l.: s.n.], 1987.
<https://www.protocolodemontreal.org.br/site/quem-somos/protocolo-de-montreal/sobre-o-protocolo-de-montreal>.

NAEI, National Atmospheric Emissions Inventory. **Pollutant Information: HFCs.** [S.l.: s.n.], 2021.
https://naei.beis.gov.uk/overview/pollutants?pollutant_id=HFCs.

NAZNEEN, Seema; SUSHMA, Nedunuri. Carbon credit trading. **Journal of emerging technologies and innovative research**, JETIR(www.jetir.org), v. 8, n. 2, 2021.

NEALE, Rachel E *et al.* Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2020. **Photochemical & Photobiological Sciences**, Springer, 2021.

NEWELL, Pete. **Globalization and the environment: Capitalism, ecology and power.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

NOWAK, Thomas. Heat Pumps: Integrating technologies to decarbonise heating and cooling. **European Copper Institute**, 2018.

OGUNDELE, F. O.; OMOTAYO, A.; TAIWO, I. S. **The dilemma of ozone layer depletion, global warming and climate change in tropical countries: a review.** [S.l.]: SAVAP International (Society for the Advancement of Education through Visionary Academicians/Researchers for Peaceful Globe), 2010.

OLIVEIRA RODRIGUES, Luanda Kívia de; ALMEIDA, Antonio Gabriel Souza. Responsabilidade ambiental: A contribuição do Instituto Federal da Bahia (Campus Salvador) para o Meio Ambiente através da reciclagem dos fluidos refrigerantes atendidos pelo o Programa Brasileiro de Eliminação de HCFCs. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 4, 2020.

ORFORD, Margie; RAUBENHEIMER, Stefan; KANTOR, Barry. **Climate Change and the Kyoto Protocol's Clean Development Mechanism: Brazil, Bangladesh, Indonesia, South Africa.** [S.l.]: Juta e Company Ltd, 2004.

PROANO, Maximiliano. **Carbon pricing in Latin America: far from being an effective instrument.** [S.l.: s.n.], 2017.

<https://cbey.yale.edu/our-stories/pricing-carbon-in-brazil>.

RAMIREZ, John Ariel Nascimento. **Um estudo bibliográfico da análise da substituição do fluido refrigerante R410A pelo fluido R32.** [S.l.]: Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia do Amazonas, 2021.

REPAIR, Atlas AC. **Air Conditioner Freon Refill Cost Guide for 2024 (by a Real HVAC Company).** [S.l.: s.n.], 2024.

<https://atlasarepair.com/cost/air-conditioner-freon-refill-cost/>.

RIBEIRO, Marina Almeida; CRUZ, Matheus Bruno Dias; CARVALHO MONTEIRO, Me Isabella Pearce de. O desafio da sustentabilidade na construção civil: aspectos legais e jurisprudenciais. **Revista do CEDS**, v. 1, 2016.

RIGONI, Bríscia Oliveira Prates; VASCONCELOS, Angélica; SILVA JUNIOR, Annor da. Maximização do lucro no setor hoteleiro sob o enfoque do Yield Management. *In*: ANAIS do Congresso Brasileiro de Custos-ABC. [S.l.: s.n.], 2018.

ROM, William N.; PINKERTON, Kent E. **Introduction: Consequences of Global Warming to Planetary and Human Health.** [S.l.]: Humana, Cham, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-54746-2_1.

SANTOS, Luan; ANGELO, Ana Carolina Maia; CORDEIRO, Marcelle Candido. Carbon pricing research in Brazil: advances and challenges/pesquisa de preços de carbono no Brasil: avanços e desafios. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, 2021.

SANTOS, Mauro Meirelles de Oliveira. **Relatório de referência: setor de processos industriais e uso de produtos.** [S.l.]: Brasil, 2020.

SATYANARAYANA, D.V. IMPACT OF CFCs ON OZONE LAYER AND GLOBAL WARMING. **IOSR Journal of Engineering**, v. 2, n. 1, 2011. DOI: 10.9790/3021-0215969.

SCHENINI, Pedro Carlos; LEMOS, Renato Nunes; SILVA, FA da. Sistema de gestão ambiental no segmento hoteleiro. **Seminário de Gestão de Negócios FAE**, v. 2, 2005.

SILVA, Marco Tulio Gama *et al.* **Avaliação experimental do desempenho do R-32 como substituto do R-410A em um sistema de refrigeração.** [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

SMITH, Brad. **Microsoft will be Carbon Negative by 2030**. [S.l.: s.n.], 2020.

SRC, Super Radiator Coils. **R-32: Pros, Cons, Comparisons to Other Refrigerants**. [S.l.: s.n.], 2020. <https://www.superradiatorcoils.com/blog/refrigerant-focus-r-32-difluoromethane>.

STOECKER, WF. **DESIGN OF THERMAL SYSTEMS INTERNATIONAL EDITION 1989**. [S.l.: s.n.], 1989.

SUN, Huadong; DING, Yongling *et al.* Current Situation and Mode Construction of Mixed Teaching in Civil Engineering Materials Course. **International Journal of New Developments in Education**, Francis Academic Press, v. 4, n. 13, 2022.

TEIXEIRA, Emanuely de Almeida. **Gestão de eventos na hotelaria: a utilização do ROI nos empreendimentos da Praia da Pipa/RN-Brasil Natal**. 2016. B.S. thesis – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

TOMCZYK, John *et al.* **Refrigeration and air conditioning technology**. [S.l.]: Cengage Learning Boston, MA, USA, 2017.

TRANE, Technologies. **Considerations for Next Generation HVAC Refrigerants**. [S.l.: s.n.], 2015.
https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/education-training/industry-articles/ENV-APN001A-EN_2015_refrigerants.pdf.

TRANE, Technologies. **Transição de fluidos refrigerantes é essencial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas**. [S.l.: s.n.], 2024.
<https://www.trane.com/commercial/latin-america/br/pt/about-us/newsroom/press-releases/transicao-de-fluidos-refrigerantes-e-essencial-para-mitigar-os-efeitos-das-mudancas-climaticas.html>.

TURPIN, Joanna R. **Examining R-32's Validity as an R-410A Replacement**. [S.l.: s.n.], 2020. <https://www.achrnews.com/articles/160793-examining-r-32s-validity-as-an-r-410a-replacement>.

UNIDO, United Nations Industrial Development Organization. **Barriers to industrial energy efficiency: A literature review**. [S.l.: s.n.], 2011.
<https://downloads.unido.org/ot/99/24/9924333/WP10.pdf>.

US EPA, United States Environmental Protection Agency. **Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle**. [S.l.: s.n.], 2021.
<https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>.

VERRA, Verified Carbon Standard. **Verified Carbon Standard – VCS project Validation and Verification**. [S.l.: s.n.], 2024.

<https://www.controlunion.com/certification-program/verified-carbon-standard-vcs-project-validation-and-verification/>.

WALKER, Nathan. **R-32 Is the Easy Choice for Contractors**. [S.l.: s.n.], 2021.

<https://hvac-blog.acca.org/r-32-is-the-easy-choice-for-contractors/>.

WANG, Shan Kuo; WANG, Shan K. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2000. v. 49.

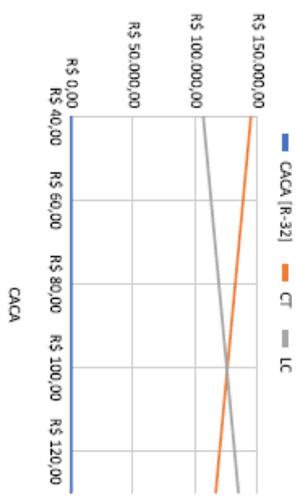
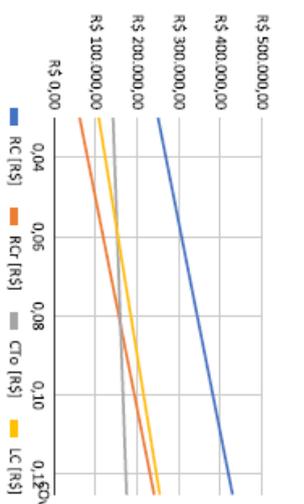
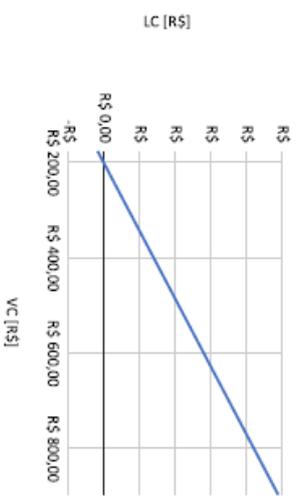
WATER, Weather Climate. **WMO greenhouse gas bulletin**. [S.l.: s.n.], 2019.

ZHAO, Chuang *et al.* Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, National Academy of Sciences, v. 114, n. 35, 2017. DOI: 10.1073/PNAS.1701762114.

Apêndices

Equipamentos de ar-condicionado											
Item	Capacidade	Modelo	Operação	Marca	Carga após[m]	IDRS	Valor	Fluido	Carga padrão [Kg]	Carga adicional [Kg/m]	
1.1	12.000 BTU/h	GWH12AGC-D3DNA1JD/O	Quente/Frio	Gree	5	5,50	R\$ 3.899,00	R-410A	0,790	0,020	
1.2	12.000 BTU/h	AR12CSECABTNAZ/AR12CSECABTXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,00	R\$ 4.597,00	R-410A	0,880	0,015	
1.3	12.000 BTU/h	AR12BSHZCWKNAZ/AR12BSHZCWKXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,00	R\$ 3.695,00	R-410A	0,880	0,015	
1.4	18.000 BTU/h	AR18CSECABTNAZ / AR18CSECABTXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,20	R\$ 6.281,00	R-410A	1,110	0,015	
1.5	18.000 BTU/h	AR18BSEAAWKNAZ / AR18BSEAAWKXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,20	R\$ 5.847,00	R-410A	1,100	0,015	
1.6	18.000 BTU/h	AR18BSHZCWKNAZ / AR18BSHZCWKXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,20	R\$ 5.172,78	R-410A	1,110	0,015	
1.7	24.000 BTU/h	AR24BSEAAWKNAZ / AR24BSEAAWKXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,00	R\$ 6.966,00	R-410A	1,400	0,015	
1.8	24.000 BTU/h	AR24CSECABTNAZ / AR24CSECABTXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,00	R\$ 7.650,00	R-410A	1,400	0,015	
1.9	24.000 BTU/h	AR24BSHZCWKNAZ / AR24BSHZCWKXAZ	Quente/Frio	Samsung	5	6,00	R\$ 6.936,00	R-410A	1,400	0,015	
1.10	12.000 BTU/h	STHP12Q5VL	Quente/Frio	Daikin	10	7,20	R\$ 4.319,00	R-32	0,900	0,020	
1.11	12.000 BTU/h	TAC-12CHFG2BHINV	Quente/Frio	TCL	5	6,30	R\$ 4.676,67	R-32	0,710	0,015	
1.12	12.000 BTU/h	TAC-12CHFG2O-INV	Quente/Frio	TCL	5	6,30	R\$ 4.199,00	R-32	0,710	0,015	
1.13	18.000 BTU/h	ASKA18KPBA / AOKA18KPBA	Quente/Frio	Fujitsu	5	5,53	R\$ 6.315,00	R-32	1,050	0,020	
1.14	18.000 BTU/h	FTHP18S5VL / RHP18S5VL	Quente/Frio	Daikin	10	6,80	R\$ 6.554,44	R-32	1,300	0,020	
1.15	18.000 BTU/h	S3UW18KLR7A.EB2GAM1 S3NW18KLR7A.EB2GAM1	Quente/Frio	LG	5	6,20	R\$ 5.999,00	R-32	0,850	0,015	
1.16	24.000 BTU/h	RHP24S5VL FTHP24S5VL	Quente/Frio	Daikin	10	8,20	R\$ 7.599,00	R-32	1,450	0,015	
1.17	24.000 BTU/h	GWH24ATE-D6DNA1A/O GWH24ACE-D6DNA1B/I	Quente/Frio	Gree	5	6,43	R\$ 6.799,00	R-32	1,100	0,010	
1.18	24.000 BTU/h	AOKA24KPBA ASKA24KPBA	Quente/Frio	Fujitsu	5	5,53	R\$ 6.599,00	R-32	1,320	0,030	

Seção 4.9.1 - VC	
VC (R\$)	LC (R\$)
R\$ 176,00	-R\$ 18.648,22
R\$ 186,00	-R\$ 11.609,06
R\$ 196,00	-R\$ 4.569,89
R\$ 206,00	R\$ 2.469,27
R\$ 216,00	R\$ 9.508,44
R\$ 226,00	R\$ 16.547,60
R\$ 236,00	R\$ 23.586,76
R\$ 246,00	R\$ 30.625,93
R\$ 256,00	R\$ 37.665,09
R\$ 266,00	R\$ 44.704,26
R\$ 276,00	R\$ 51.743,42
R\$ 286,00	R\$ 58.782,58
R\$ 296,00	R\$ 65.821,75
R\$ 306,00	R\$ 72.860,91
R\$ 316,00	R\$ 79.900,08
R\$ 326,00	R\$ 86.939,24
R\$ 336,00	R\$ 93.978,40
R\$ 346,00	R\$ 101.017,57
R\$ 356,00	R\$ 108.056,73
R\$ 366,00	R\$ 115.095,90
R\$ 376,00	R\$ 122.135,06
R\$ 386,00	R\$ 129.174,22
R\$ 396,00	R\$ 136.213,39
R\$ 406,00	R\$ 143.252,55
R\$ 416,00	R\$ 150.291,71
R\$ 426,00	R\$ 157.330,88
R\$ 436,00	R\$ 164.370,04
R\$ 446,00	R\$ 171.409,21
R\$ 456,00	R\$ 178.448,37
R\$ 466,00	R\$ 185.487,53
R\$ 476,00	R\$ 192.526,70
R\$ 486,00	R\$ 199.565,86
R\$ 496,00	R\$ 206.605,03
R\$ 506,00	R\$ 213.644,19
R\$ 516,00	R\$ 220.683,35
R\$ 526,00	R\$ 227.722,52
R\$ 536,00	R\$ 234.761,68
R\$ 546,00	R\$ 241.800,85
R\$ 556,00	R\$ 248.840,01
R\$ 566,00	R\$ 255.879,17
R\$ 576,00	R\$ 262.918,34
R\$ 586,00	R\$ 269.957,50



Seção 4.9.2 - COV		Seção 4.9.2 - COV			
COV	RC (R\$)	RCr (R\$)	CTo (R\$)	LC (R\$)	
0,03	R\$ 250.805,41	R\$ 62.229,91	R\$ 142.537,50	R\$ 108.267,91	
0,035	R\$ 260.234,19	R\$ 71.658,69	R\$ 144.250,92	R\$ 115.983,27	
0,04	R\$ 269.662,96	R\$ 81.087,46	R\$ 145.964,33	R\$ 123.698,63	
0,045	R\$ 279.091,74	R\$ 90.516,24	R\$ 147.677,74	R\$ 131.414,00	
0,05	R\$ 288.520,51	R\$ 99.945,01	R\$ 149.391,15	R\$ 139.129,36	
0,055	R\$ 297.949,28	R\$ 109.373,79	R\$ 151.104,56	R\$ 146.844,73	
0,06	R\$ 307.378,06	R\$ 118.802,56	R\$ 152.817,97	R\$ 154.560,09	
0,065	R\$ 316.806,83	R\$ 128.231,34	R\$ 154.531,38	R\$ 162.275,46	
0,07	R\$ 326.235,61	R\$ 137.660,11	R\$ 156.244,79	R\$ 169.990,82	
0,075	R\$ 335.664,38	R\$ 147.088,89	R\$ 157.958,20	R\$ 177.706,18	
0,08	R\$ 345.093,16	R\$ 156.517,66	R\$ 159.671,61	R\$ 185.421,55	
0,085	R\$ 354.521,93	R\$ 165.946,44	R\$ 161.385,02	R\$ 193.136,91	
0,09	R\$ 363.950,71	R\$ 175.375,21	R\$ 163.098,43	R\$ 200.852,28	
0,095	R\$ 373.379,48	R\$ 184.803,99	R\$ 164.811,84	R\$ 208.567,64	
0,1	R\$ 382.808,26	R\$ 194.232,76	R\$ 166.525,25	R\$ 216.283,00	
0,105	R\$ 392.237,03	R\$ 203.661,54	R\$ 168.238,67	R\$ 223.998,37	
0,11	R\$ 401.665,81	R\$ 213.090,31	R\$ 169.952,08	R\$ 231.713,73	
0,115	R\$ 411.094,58	R\$ 222.519,09	R\$ 171.665,49	R\$ 239.429,10	
0,12	R\$ 420.523,36	R\$ 231.947,86	R\$ 173.378,90	R\$ 247.144,46	
0,125	R\$ 429.952,13	R\$ 241.376,64	R\$ 175.092,31	R\$ 254.859,82	
Seção 4.9.2 - COV					
CACA [R-410A]	CACA [R-32]	CT	LC		
R\$ 40,00	R\$ 155,00	R\$ 144.597,79	R\$ 106.207,62		
R\$ 45,00	R\$ 150,00	R\$ 143.022,74	R\$ 107.782,67		
R\$ 50,00	R\$ 145,00	R\$ 141.447,69	R\$ 109.357,72		
R\$ 55,00	R\$ 140,00	R\$ 139.872,64	R\$ 110.932,77		
R\$ 60,00	R\$ 135,00	R\$ 138.297,59	R\$ 112.507,82		
R\$ 65,00	R\$ 130,00	R\$ 136.722,54	R\$ 114.082,87		
R\$ 70,00	R\$ 125,00	R\$ 135.147,49	R\$ 115.657,92		
R\$ 75,00	R\$ 120,00	R\$ 133.572,44	R\$ 117.232,97		
R\$ 80,00	R\$ 115,00	R\$ 131.997,39	R\$ 118.808,02		
R\$ 85,00	R\$ 110,00	R\$ 130.422,34	R\$ 120.383,07		
R\$ 90,00	R\$ 105,00	R\$ 128.847,29	R\$ 121.958,12		
R\$ 95,00	R\$ 100,00	R\$ 127.272,24	R\$ 123.533,17		
R\$ 100,00	R\$ 95,00	R\$ 125.697,19	R\$ 125.108,22		
R\$ 105,00	R\$ 90,00	R\$ 124.122,14	R\$ 126.683,27		
R\$ 110,00	R\$ 85,00	R\$ 122.547,09	R\$ 128.258,32		
R\$ 115,00	R\$ 80,00	R\$ 120.972,04	R\$ 129.833,37		
R\$ 120,00	R\$ 75,00	R\$ 119.396,99	R\$ 131.408,42		
R\$ 125,00	R\$ 70,00	R\$ 117.821,94	R\$ 132.983,47		
R\$ 130,00	R\$ 65,00	R\$ 116.246,89	R\$ 134.558,52		

