



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE FLORIANÓPOLIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ PEREIRA BUENO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE COMPRESSORES DE
CORRENTE CONTÍNUA EM CONDICIONADORES DE AR PARA EMBARCAÇÕES

Florianópolis
2025

ANDRÉ PEREIRA BUENO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE COMPRESSORES DE
CORRENTE CONTÍNUA EM CONDICIONADORES DE AR PARA EMBARCAÇÕES

Trabalho apresentado como requisito
para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico de Florianópolis da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Eng. Joel Boeng

Florianópolis
2025

Pereira Bueno, André

Ar-condicionado Naval com Compressor de Corrente
Contínua / André Pereira Bueno ; orientador, Joel Boeng,
2025.

35 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Mecânica,
Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Eficiência energética. 3.
Climatização. 4. Redução de emissões . I. Boeng, Joel. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

ANDRÉ PEREIRA BUENO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE COMPRESSORES DE
CORRENTE CONTÍNUA EM CONDICIONADORES DE AR PARA EMBARCAÇÕES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Florianópolis.

Florianópolis (SC), 21 de maio de 2025.



Documento assinado digitalmente

Antonio Carlos Valdiero

Data: 06/11/2025 22:47:28-0300

CPF: ***.227.377-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Eng. Antônio Carlos Valdiero

Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

JOEL BOENG

Data: 04/11/2025 10:30:58-0300

CPF: ***.587.559-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Eng. Joel Boeng

Orientador

Presidente



Documento assinado digitalmente

Saulo Güths

Data: 03/11/2025 17:22:31-0300

CPF: ***.889.529-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Eng. Saulo Güths
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Fernando Testoni Knabben

Data: 05/11/2025 09:03:58-0300

CPF: ***.067.899-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Eng. Fernando Testoni Knabben
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, noiva e irmãos

AGRADECIMENTOS

À minha família, quero expressar gratidão pelo apoio e incentivo desde o início desta jornada. Em especial aos meus pais, Raquel e Reginato, que diversas vezes priorizam os meus sonhos, se esforçaram para me oferecer o melhor e investiram na minha educação.

Agradeço à minha noiva Julia Carolina Bertola, que esteve ao meu lado em todos os momentos desta jornada, compartilhando sonhos, desafios e conquistas. Sua paciência, compreensão e apoio foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar as dificuldades e manter o foco nesta etapa tão importante.

Aos meus queridos amigos: Amanda Mikha Miyamoto pela amizade e ajuda com esse trabalho, Tamayo Zanforlin P.A.M. Dias pelas consultorias em termodinâmica e Rafael Luiz Ferreira pelo companheirismo. Sou grato por tê-los ao meu lado.

Ao orientador Joel Boeng, por ser uma referência de profissional e pessoa, com grandes ensinamentos, incentivos e assistências. Foi fundamental para o meu desenvolvimento profissional, destaco a honra que tive em aprender com um dos melhores professores.

Ao sócio e gerente técnico da Navalcare, Ericson Meier (Sony), por dividir comigo a ideia para esse trabalho e por me auxiliar no entendimento da engenharia por trás do projeto. Estendo ao sócio fundador, Marcelo César dos Reis, por ter proporcionado condições e a oportunidade de estagiar em um ambiente que estimulou o meu desenvolvimento profissional e me acolheu desde o começo.

Por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina, ao corpo docente e a todos que mantêm o funcionamento, por proporcionarem ótimas experiências que transformam vidas profissionais. O conhecimento que oferecem contribui para autonomia das pessoas e um mundo melhor.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e dimensionamento de um sistema de climatização para a embarcação SeaRay Sundancer 290, com foco em eficiência energética, sustentabilidade e adaptação ao espaço limitado. O tema abordado envolve a substituição dos sistemas tradicionais de climatização naval, dependentes de compressores de corrente alternada alimentados por geradores a diesel, por uma solução híbrida composta por compressores de corrente contínua, painéis solares e baterias. O problema identificado está relacionado ao elevado consumo energético, impacto ambiental e limitações estruturais que dificultam a implementação de sistemas mais sustentáveis em embarcações de médio porte. A justificativa para o estudo encontra-se na necessidade de promover alternativas que reduzam as emissões de gases poluentes, otimizem o uso de espaço e melhorem a autonomia operacional de embarcações que operam em condições desafiadoras, como alta incidência solar e restrições de peso e volume. O objetivo principal foi dimensionar um sistema de ar-condicionado capaz de atender a uma capacidade inicial de 10.000 BTU/h, utilizando tecnologias que combinam eficiência energética e soluções renováveis. Para alcançar esse objetivo, foram realizados cálculos teóricos para o dimensionamento do compressor, do sistema fotovoltaico e , considerando as limitações estruturais da embarcação e os requisitos de desempenho térmico. O método adotado incluiu a análise de viabilidade técnica e energética, considerando as restrições impostas por tecnologias existentes no mercado. Os resultados demonstraram que o espaço necessário para a instalação de painéis solares, estimado em 5,43 m², revelou-se inviável para a área disponível na embarcação, reforçando a necessidade de explorar alternativas híbridas. Conclui-se que o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como painéis solares de alta eficiência, é essencial para ampliar a viabilidade prática de sistemas híbridos sustentáveis em embarcações. Este trabalho fornece uma base técnica e teórica que contribui para a evolução de soluções de climatização no setor naval, promovendo a eficiência energética e a redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: eficiência energética. climatização. embarcações. condicionador de ar

ABSTRACT

This paper presents the development and sizing of a climate control system for the SeaRay Sundancer 290 vessel, focusing on energy efficiency, sustainability, and adaptation to limited space. The topic addresses the replacement of traditional marine air conditioning systems, which rely on alternating current compressors powered by diesel generators, with a hybrid solution composed of direct current compressors, solar panels, and batteries. The identified problem relates to high energy consumption, environmental impact, and structural limitations that hinder the implementation of more sustainable systems in medium-sized vessels. The justification for the study lies in the need to promote alternatives that reduce pollutant gas emissions, optimize space usage, and improve the operational autonomy of vessels operating in challenging conditions, such as high solar incidence and restrictions on weight and volume. The main objective was to size an air conditioning system capable of meeting an initial capacity of 10,000 BTU/h, using technologies that combine energy efficiency and renewable solutions. To achieve this goal, theoretical calculations were carried out for sizing the compressor and the photovoltaic system, considering the structural limitations of the vessel and the thermal performance requirements. The adopted method included a technical and energy feasibility analysis, taking into account the constraints imposed by existing market technologies. The results showed that the area required for the installation of solar panels, estimated at 5.43 m², proved unfeasible for the available space on the vessel, reinforcing the need to explore hybrid alternatives. It is concluded that the development of emerging technologies, such as high-efficiency solar panels, is essential to increase the practical feasibility of sustainable hybrid systems in vessels. This work provides a technical and theoretical foundation that contributes to the advancement of climate control solutions in the naval sector, promoting energy efficiency and reducing environmental impacts.

Keywords: energy efficiency. climate control. air conditioning. vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista da cabine popa - proa	11
Figura 2 – Vista da cabine proa - popa	12
Figura 3 – Sea Ray Sundancer 290	13
Figura 4 – Ar-condicionado 12v Frigidum	13
Figura 5 – Gerador diesel Kohler	17
Figura 6 – Painéis solares em embarcações	23
Figura 7 – Compressor 24V	25
Figura 8 – Bateria 24v 150Ah GreenPoint	26
Figura 9 – Paine solar fotovoltaico	27

LISTA DE SÍMBOLOS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
A	Área (m ²)
L	Comprimento (m)
BTU	British Thermal Unit
P	Potência (W)
R	Resistência Elétrica (Ω)
i	Corrente Elétrica (A)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivo	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Sistemas de Condicionamento de Ar em Embarcações de Médio Porte	16
2.2	Corrente Contínua: Alternativa Sustentável para Climatização Naval	17
2.3	Radiação Solar e Ganho de Calor em Embarcações	17
2.4	Eficiência Energética e Sustentabilidade	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Introdução	19
4	METODOLOGIA	21
4.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO	22
4.1.1	Potência do Compressor	22
4.1.2	Dimensionamento das Baterias	22
4.1.3	Dimensionamento dos Painéis Solares	23
5	RESULTADOS	25
5.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO	25
5.1.1	Potência do Compressor	25
5.1.2	Dimensionamento das Baterias	26
5.1.3	Dimensionamento dos Painéis Solares	27
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O uso de sistemas de climatização em embarcações de médio porte, como iates de lazer e embarcações de turismo, é fundamental para garantir conforto térmico aos ocupantes. Em regiões de clima quente e alta incidência solar, essa necessidade é ainda mais evidente. No entanto, os sistemas convencionais de ar-condicionado marítimo, baseados em compressores de corrente alternada (CA) alimentados por geradores a diesel, apresentam desvantagens significativas, como elevado consumo de combustível, manutenção frequente e ocupação de espaço embarcado.

Neste contexto, surge a necessidade de alternativas mais eficientes e sustentáveis. A utilização de sistemas de corrente contínua (CC), alimentados por baterias e painéis solares, representa uma solução promissora, oferecendo maior flexibilidade e eficiência energética. Este trabalho se concentra no desenvolvimento e dimensionamento de um sistema de climatização baseado em corrente contínua para a embarcação SeaRay Sundancer 290, abordando aspectos de eficiência energética, sustentabilidade e adaptação ao espaço limitado.

Embarcações de médio porte, de 26 até 30 pés (de 7,5 a 9 metros), como a Sundancer 290, de 29 pés, (Figura 3) produzida pela fabricante estadunidense Sea Ray, são particularmente sensíveis ao impacto do sistema de climatização em termos de consumo de energia e espaço ocupado (BOATS, 1999). Essa embarcação, projetada para oferecer conforto em navegação costeira e passeios de curta duração, apresenta uma cabine interna, como nas figuras 1 e 2 com áreas de convivência e descanso, que são propensas ao ganho de calor devido às amplas superfícies envidraçadas e à exposição solar constante. Portanto, garantir um sistema de climatização eficiente e compacto é essencial para otimizar o conforto térmico e o uso do espaço interno, respeitando as limitações físicas da embarcação e os requisitos de autonomia energética.

Uma alternativa tecnológica que se destaca nesse contexto é o uso de baterias e fontes de energia renováveis que, em conjunto com compressores de corrente contínua, representam uma solução sustentável, eficiente e adequada para o setor naval, onde as restrições de espaço e a eficiência energética são prioridades.

A importância desse estudo se torna ainda mais relevante ao considerarmos os desafios ambientais e as regulamentações crescentes em relação às emissões de gases poluentes. A adoção de tecnologias que permitam a operação de sistemas de climatização sem dependência de geradores a diesel contribui para a redução do consumo de combustíveis fósseis e das emissões de CO_2 , alinhando-se aos objetivos globais de descarbonização e eficiência energética. Além disso, a eliminação de



Figura 1 – Vista da cabine popa - proa

Fonte: O Autor

geradores volumosos permite um uso mais racional do espaço interno, favorecendo um layout mais flexível e funcional da embarcação.



Figura 2 – Vista da cabine proa - popa

Fonte: O Autor

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento deste projeto é justificado pela busca por soluções tecnológicas que maximizem o conforto térmico sem comprometer a sustentabilidade ambiental e a eficiência energética. Embarcações de médio porte, como a SeaRay Sundancer 290, são particularmente desafiadoras nesse aspecto, pois possuem espaço limitado e estão sujeitas a alta incidência solar.

Sistemas convencionais de ar-condicionado, que dependem de geradores a diesel, são ineficientes e ambientalmente prejudiciais, além de ocuparem espaço valioso a bordo. O sistema proposto visa substituir esses geradores por uma solução híbrida, composta por compressores de corrente contínua alimentados por baterias e painéis solares (Figura 4). Esta abordagem não apenas reduz o consumo de combustíveis



Figura 3 – Sea Ray Sundancer 290

Fonte: BOATS (1999).

fósseis, mas também melhora a eficiência energética e o conforto a bordo, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e descarbonização do setor naval.



Figura 4 – Ar-condicionado 12v Frigidum

Fonte: MARINE (2022).

A necessidade de sistemas de climatização eficientes em embarcações de lazer e recreio, como a Sea Ray Sundancer 290, é um tema de crescente importância na engenharia naval. Embarcações desse tipo operam em ambientes onde a exposição à radiação solar e as altas temperaturas tornam o resfriamento dos compartimentos

essenciais para o conforto e a habitabilidade a bordo. No entanto, os sistemas de ar-condicionado tradicionalmente utilizados em embarcações — que dependem de compressores de corrente alternada alimentados por geradores a diesel — apresentam desafios significativos, especialmente em termos de consumo energético, emissões de poluentes e otimização do espaço.

O uso de geradores a diesel, ainda predominante em sistemas de climatização naval, é conhecido por ser uma solução de alto custo operacional e ambiental. Esses geradores ocupam um espaço valioso a bordo e exigem manutenções frequentes, além de serem uma fonte constante de ruído e vibração (DEGU, 2014). Esses fatores são particularmente limitantes em embarcações de médio porte, como a Sundancer 290, onde a otimização do espaço interno é essencial para acomodar equipamentos e garantir o conforto dos passageiros.

Por outro lado, a crescente demanda por soluções sustentáveis no setor naval tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que permitem a utilização de fontes de energia alternativas, como baterias e painéis solares. Essas fontes renováveis são especialmente adequadas para alimentar compressores de corrente contínua, que operam de maneira mais eficiente e com menor demanda de manutenção em comparação com os compressores de corrente alternada. A eliminação dos geradores a diesel não apenas reduz o consumo de combustíveis fósseis, mas também libera espaço a bordo e torna a operação da embarcação mais silenciosa, um benefício significativo para as embarcações de lazer.

O estudo de caso sobre a Sea Ray Sundancer 290 é justificado pela crescente relevância das embarcações de lazer no mercado, onde a demanda por soluções tecnológicas que maximizem o conforto sem comprometer a sustentabilidade é cada vez mais expressiva. A aplicação de compressores de corrente contínua não apenas atende às necessidades de conforto dos ocupantes, mas também representa um passo significativo rumo à descarbonização do setor naval, que tem buscado reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e melhorar a eficiência energética de suas operações.

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade de desenvolver soluções inovadoras que integrem tecnologias sustentáveis e eficientes para o resfriamento de embarcações, ao mesmo tempo em que reduz o impacto ambiental e os custos operacionais. A possibilidade de alimentar o sistema de climatização com fontes renováveis, como baterias e painéis solares, e a eliminação de geradores a diesel, torna o sistema proposto uma alternativa viável e vantajosa para embarcações de médio porte, contribuindo para o avanço tecnológico e a sustentabilidade no setor naval.

1.2 OBJETIVO

Os objetivos do projeto realizado podem ser divididos em dois grupos: o objetivo geral que explica a finalidade e o escopo do projeto; e os objetivos específicos que destacam as principais etapas do objetivo principal.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica e energética de um sistema de ar-condicionado em corrente contínua para a Sea Ray Sundancer 290, visando otimizar o consumo de energia, reduzir a ocupação de espaço embarcado e explorar o uso de fontes de energia renováveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar um sistema de ar-condicionado de corrente contínua com capacidade de 10.000 BTU/h, adequando-o às necessidades térmicas da embarcação e às restrições de espaço;
- Avaliar o consumo energético do sistema em comparação com sistemas tradicionais de corrente alternada e geradores a diesel, considerando o uso de fontes renováveis como baterias e painéis solares;
- Investigar os benefícios do aproveitamento do espaço liberado, ao eliminar a necessidade de geradores e reduzir o tamanho dos componentes do sistema de climatização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns conceitos, componentes, operações e tecnologias relevantes para o desenvolvimento do projeto.

2.1 SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE AR EM EMBARCAÇÕES DE MÉDIO PORTE

As embarcações de médio porte, como a SeaRay Sundancer 290, apresentam características específicas que impactam diretamente o desempenho e a viabilidade dos sistemas de climatização. Entre os principais desafios estão o espaço físico restrito, a limitação na geração de energia elétrica embarcada e o alto ganho térmico resultante da exposição à radiação solar.

Os sistemas convencionais de ar-condicionado para embarcações de grande porte, maiores que 30 pés, utilizam ciclos de compressão de vapor alimentados por energia proveniente de geradores a diesel. Os principais componentes incluem:

Compressor (CA): geralmente operando com corrente alternada, é responsável por comprimir o fluido refrigerante. Funciona de forma cíclica (ligando/desligando conforme a demanda) e costuma apresentar elevado consumo de energia;

Condensador a ar: dissipa o calor extraído do ambiente;

Evaporador: realiza a troca térmica com o ar interno, resfriando-o;

Dispositivo de expansão: usualmente uma válvula de expansão termostática, que regula a entrada do refrigerante na serpentina do evaporador.

Esses sistemas requerem considerável espaço físico para a instalação dos equipamentos e dutos, além de demandarem manutenções periódicas e apresentarem alto impacto ambiental.

A Figura 5 ilustra um exemplo típico de gerador diesel embarcado:

Em sistemas convencionais de ar-condicionado naval, os compressores de corrente alternada apresentam bom desempenho, mas exigem fontes de energia estáveis e, muitas vezes, volumosas, como geradores movidos a diesel. Esses sistemas, além de ocupar espaço significativo nas embarcações, também são menos eficientes quando comparados a soluções mais modernas, como o uso de compressores de corrente contínua (CC) (DEGU, 2014). Além disso, o consumo de combustível e o impacto ambiental desses geradores têm sido uma preocupação crescente, levando à busca por soluções mais sustentáveis e compactas.



Figura 5 – Gerador diesel Kohler

Fonte: BRASIL (2023).

2.2 CORRENTE CONTÍNUA: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA CLIMATIZAÇÃO NAVAL

Os compressores de corrente contínua (CC) vêm se consolidando como uma alternativa mais eficiente e sustentável (BHATIA, 2014) (WADDELL; KASEREKAR, 2010), principalmente para aplicações off-grid e em ambientes com restrição de espaço, como veículos e embarcações.

Esses compressores funcionam com motores brushless controlados por inversores, o que permite modulação de velocidade (inversores de frequência) e operação contínua com menor consumo energético. Entre suas vantagens destacam-se:

Menor consumo de energia (eficiência até 30% superior a compressores CA em regime variável)(DEGU, 2014);

Redução de ruído e vibração;

Operação com fontes renováveis (painéis solares e baterias);

Menor volume e peso em relação aos sistemas com geradores.

Fisicamente, são menores e mais leves, podendo ser integrados diretamente ao circuito de climatização sem a necessidade de geradores auxiliares. No entanto, apresentam limitação de capacidade de refrigeração: a maioria dos modelos disponíveis no mercado opera com potências abaixo de 2000 W (cerca de 6800 BTU/h), exigindo abordagens como o uso de compressores em paralelo para alcançar maiores demandas térmicas.

2.3 RADIAÇÃO SOLAR E GANHO DE CALOR EM EMBARCAÇÕES

A radiação solar incidente é uma das principais fontes de carga térmica em embarcações, especialmente naquelas com amplas superfícies envidraçadas e áreas

expostas ao sol. Essa radiação provoca o aquecimento das superfícies externas e internas, gerando ganho de calor por: radiação direta (insolação nas superfícies); radiação difusa (reflexão da luz em superfícies próximas) e condução pelas paredes da estrutura e janelas.

Esse ganho térmico varia conforme as condições climáticas. Em Florianópolis, por exemplo, a radiação solar média diária gira em torno de 4,5 a 5,0 kWh/m²/dia (REGINATO., 2020). Em dias nublados, essa energia pode cair pela metade, o que impacta diretamente a geração dos sistemas fotovoltaicos e o desempenho da climatização.

Modelos como o Radiant Time Series (RTS) (REGINATO., 2020) são utilizados para calcular esse ganho térmico, considerando área envidraçada, orientação, inclinação, material da embarcação e taxa de renovação de ar (WADDELL; KASEREKAR, 2010) (WALTRICH, 2009).

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

A eficiência energética é uma prioridade em embarcações modernas, especialmente em contextos onde o consumo de combustível e as emissões de gases de efeito estufa são preocupações constantes. O sistema proposto alinha-se a esses princípios, integrando tecnologias de baixa demanda energética e explorando o uso de fontes renováveis.

A integração de fontes renováveis de energia representa um avanço importante para a redução das emissões de gases de efeito estufa e o consumo de combustíveis fósseis em embarcações (BHATIA, 2014) (WADDELL; KASEREKAR, 2010).

Estudos de caso envolvendo embarcações similares à Sea Ray Sundancer 290 demonstram que a implementação de sistemas de ar-condicionado com corrente contínua pode resultar em uma redução significativa do consumo de combustível, além de melhorar a autonomia da embarcação. Essa abordagem permite que o sistema de climatização funcione por mais tempo sem a necessidade de reabastecimento ou recarga constante, o que é crucial para embarcações que operam em áreas remotas ou em travessias de longa duração (WADDELL; KASEREKAR, 2010).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por embarcações mais eficientes e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de climatização que adotem fontes renováveis e soluções compactas. Diversos estudos vêm sendo conduzidos nas últimas décadas para viabilizar, em especial, a climatização de embarcações de pequeno e médio porte sem o uso de geradores a diesel, utilizando-se de compressores de corrente contínua, baterias e energia solar.

Lan et al. (2021) realizaram uma extensa revisão sobre sistemas de climatização em embarcações, destacando o potencial do uso de fontes renováveis e as dificuldades técnicas relacionadas ao espaço limitado, peso adicional e variabilidade na geração solar. Os autores apontam que a transição de sistemas baseados em corrente alternada para corrente contínua é uma das estratégias mais promissoras, especialmente em embarcações que operam em regiões de alta incidência solar. Zhang e Li (2023) apresentaram um estudo de caso sobre sistemas de climatização sustentáveis aplicados a embarcações de pequeno e médio porte. O trabalho mostra que a substituição dos geradores a diesel por sistemas híbridos alimentados por painéis solares e baterias, acoplados a compressores de corrente contínua, permite ganhos substanciais em autonomia e eficiência, mas esbarra em limitações físicas – como a área necessária para os painéis solares – e no peso total do sistema embarcado.

O desempenho dos compressores de corrente contínua foi investigado por Kim e Park (2022), que analisaram modelos comerciais com capacidade de até 2000 W. Embora os compressores CC apresentem maior eficiência energética em relação aos de corrente alternada, sua capacidade limitada de refrigeração impõe o uso de múltiplas unidades para aplicações de maior demanda térmica, o que exige adaptações no ciclo de refrigeração e na arquitetura do sistema, como ressaltado por Daffallah et al. (2017). No tocante à geração de energia, Muteri et al. (2020) discutem os principais desafios na integração de sistemas fotovoltaicos a embarcações, especialmente as restrições de espaço e a dificuldade de instalar painéis solares em locais adequadamente orientados. A utilização de painéis solares flexíveis surge como alternativa viável para áreas com geometria irregular, permitindo certa recuperação da eficiência perdida pelo sombreamento parcial.

Liu e Zhao (2023) complementam essa discussão ao analisarem o desempenho de painéis solares de alta eficiência para uso marítimo, com rendimento superior a 20%. Esses painéis podem reduzir significativamente a área necessária para a geração da

mesma quantidade de energia, o que os torna atrativos para embarcações com convés reduzido, como a SeaRay Sundancer 290.

No armazenamento de energia, Chen et al. (2022) avaliaram baterias de íon-lítio aplicadas a ambientes marítimos, destacando seu bom desempenho em termos de densidade energética (150–200 Wh/kg) e resistência a ciclos profundos de descarga. No entanto, o peso acumulado do banco de baterias necessário para aplicações como a deste trabalho ainda é um entrave significativo, tanto para a estabilidade quanto para a distribuição de cargas na embarcação. Novas tecnologias, como baterias de estado sólido, vêm sendo estudadas por Zhang e Wu (2024), prometendo maior densidade energética com menor volume e peso.

Por fim, Balcombe et al. (2021) discutem estratégias para a descarbonização do setor naval, ressaltando que soluções distribuídas baseadas em eletrificação e fontes renováveis são fundamentais para embarcações de menor porte. Esta visão está alinhada às metas da Organização Marítima Internacional (IMO, 2023), que estabelece a redução de 50% nas emissões do setor marítimo até 2050.

Dessa forma, a revisão evidencia que a proposta deste trabalho está em consonância com os esforços globais para a eletrificação e descarbonização da climatização naval.

No entanto, desafios significativos ainda persistem, exigindo inovação nos componentes, integração eficiente dos sistemas e desenvolvimento de novos materiais e arquiteturas energéticas.

4 METODOLOGIA

Esta seção foi elaborada para descrever as metodologias utilizadas no desenvolvimento do sistema de climatização para a embarcação SeaRay Sundancer 290, considerando a natureza multiprofissional do projeto. O trabalho abrange áreas do conhecimento como engenharia naval, elétrica, mecânica e química, assegurando uma abordagem integrada para atender aos requisitos técnicos, funcionais e ambientais do projeto. O objetivo foi implementar e desenvolver métodos reconhecidos que garantam a funcionalidade, a eficiência energética e a sustentabilidade do sistema proposto.

Inicialmente, foi realizado um levantamento para definir a missão da embarcação, identificar o perfil do usuário e compreender os requisitos específicos. Este processo guiou todas as etapas subsequentes, fornecendo diretrizes para o desenvolvimento e as escolhas técnicas do sistema de climatização. Entre os aspectos levantados, destacaram-se a necessidade de otimização do espaço a bordo, a redução do consumo energético e a adoção de soluções sustentáveis, como fontes de energia renováveis e componentes compactos.

O desenvolvimento do projeto seguiu uma abordagem estruturada, começando pelo dimensionamento teórico dos componentes principais, incluindo o compressor de corrente contínua, as baterias e os painéis solares. Foram utilizados métodos analíticos para calcular a potência necessária, a eficiência energética e a capacidade de cada componente, assegurando que o sistema atendesse à carga térmica especificada de 10.000 BTU/h, apesar das limitações técnicas e físicas impostas pela embarcação.

Além disso, foi implementada uma análise de viabilidade técnica e energética, considerando as condições reais de operação da embarcação, como a disponibilidade de espaço, a capacidade estrutural para suportar o peso dos equipamentos e as condições ambientais de uso, como a exposição solar.

O projeto conceitual incluiu a integração de baterias como sistemas de armazenamento de energia e geração fotovoltaica, com foco na autonomia energética e na compatibilidade com os componentes elétricos da embarcação. Para isso, foram dimensionados painéis solares de alta eficiência e baterias de íon-lítio, considerando perdas por eficiência e demandas de operação contínua.

Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre o sistema proposto e os sistemas tradicionais de climatização, com base em consumo energético, impacto ambiental, custo operacional e viabilidade técnica. Essa análise permitiu identificar as vantagens e limitações da solução desenvolvida, destacando oportunidades para aprimoramentos futuros e possíveis adaptações para outras aplicações no setor naval.

4.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta seção, será apresentada a metodologia aplicada para o dimensionamento do sistema elétrico necessário para alimentar o compressor de corrente contínua responsável pela climatização na embarcação SeaRay Sundancer 290. O sistema deve garantir uma operação utilizando uma combinação de baterias e painéis solares para suprir a demanda energética do compressor, com uma capacidade de resfriamento de 10.000 BTU/h que se equivale a uma potência térmica requerida de 2930 W.

4.1.1 Potência do Compressor

O COP de compressores de corrente contínua modernos varia tipicamente entre 2,5 e 3,0. Assumindo um COP médio de 2,5, a potência elétrica necessária (P_e) é dada por:

$$P_e = \frac{Q_{fornecido}}{COP} = \frac{2930W}{2,5} = 1172W \quad (1)$$

Assim, a potência elétrica real a ser fornecida ao compressor para atingir 10.000 BTU/h é da ordem de 1.172 W.

Essa potência será utilizada como base para o dimensionamento dos componentes elétricos do sistema, que devem garantir a operação contínua do compressor durante o período de utilização diário.

Primeiramente, foi necessário determinar a capacidade total de armazenamento de energia necessária. Considerando um tempo de operação de 5 horas, a energia total requerida é calculada através da Equação 2.

$$E_{Total} = P_{Compressor} \cdot t_{uso} \quad (2)$$

Essa energia total representa a capacidade mínima que o banco de baterias deve ter para sustentar o funcionamento do compressor de forma contínua durante as 5 horas estipuladas.

4.1.2 Dimensionamento das Baterias

O dimensionamento das baterias é essencial para assegurar a autonomia do sistema de ar-condicionado durante períodos de baixa ou nula geração solar, como dias nublados ou horários noturnos. O objetivo é garantir que o sistema possa operar por pelo menos 5 horas sem recarga adicional.

Para atender a essa demanda, foi feita a seleção das baterias levando em consideração a densidade energética, o peso e a vida útil. É calculada a capacidade de armazenamento de energia através da Equação 3.

$$E_{Bateria} = V \cdot Ah \quad (3)$$

Para suprir a demanda da capacidade total necessária, o número de baterias necessárias é calculado dividindo a energia total requerida pela capacidade de cada bateria, como representado na Equação 4.

$$N = \frac{E_{Total}}{E_{Bateria}} \quad (4)$$

4.1.3 Dimensionamento dos Painéis Solares

Para garantir que as baterias sejam recarregadas adequadamente e que o compressor possa operar de forma contínua, o dimensionamento dos painéis solares deve considerar a irradiação solar média e a eficiência dos painéis, bem como a área disponível na embarcação para a instalação dos módulos, assim como na figura 6.



Figura 6 – Painéis solares em embarcações

Fonte: VENTO-SUL (2023).

O sistema fotovoltaico deve gerar energia suficiente para manter o compressor operando durante 5 horas por dia com uma potência de 1172 W, a energia diária requerida é de 5.860 Wh. Essa energia diária será utilizada como referência para o dimensionamento dos painéis solares.

Para o cálculo da energia gerada por metro quadrado de painel solar, foi necessário utilizar a energia do painel, a eficiência do painel, a média de pico solar por dia em áreas costeiras e um fator de segurança. Tais valores são aplicados na Equação 5 para estimar a energia gerada por metro quadrado de painel solar.

$$E_{Gerada} = E_{Painel} \cdot Eficincia \cdot t \cdot fs \quad (5)$$

Para calcular a área total de painéis solares necessária para suprir a demanda energética diária do compressor, divide-se a energia requerida pela energia gerada por metro quadrado, como representado na Equação 6.

$$A = \frac{E_{Total}}{E_{Gerada}} \quad (6)$$

5 RESULTADOS

5.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO

Nesta seção, serão apresentados os resultados após a aplicação da metodologia apresentada no capítulo anterior para o dimensionamento do sistema elétrico necessário para alimentar o compressor de corrente contínua responsável pela climatização na embarcação SeaRay Sundancer 290. O sistema deve garantir uma operação utilizando uma combinação de baterias e painéis solares para suprir a demanda energética do compressor, com uma capacidade de resfriamento de 10.000 BTU/h.

5.1.1 Potência do Compressor

A potência necessária para o compressor é de 1172 W como apresentado na Equação 1. Para garantir que seja atingida tal potência, será considerado o uso de um compressor 24v que consome 1200 W, como o da figura 7.



Figura 7 – Compressor 24V

Fonte: MARINE (2022).

Considerando a potência combinada e um tempo de operação de 5 horas, a energia total requerida é calculada através da Equação 7.

$$E_{Total} = P_{Combinada} \cdot t = 1172W \cdot 5h = 5860Wh \quad (7)$$



Figura 8 – Bateria 24v 150Ah GreenPoint (EMERGENTE, 2024)

Portanto, a energia total de 5.860 Wh representa a capacidade mínima que o banco de baterias deve possuir para sustentar o funcionamento do compressor de forma contínua durante as 5 horas estipuladas.

5.1.2 Dimensionamento das Baterias

Para atender a essa demanda, foram escolhidas baterias de íon-lítio de 24V e 150Ah devido à sua alta densidade energética, menor peso e maior vida útil em comparação com baterias de chumbo-ácido. Cada bateria de 24V e 100Ah possui uma capacidade de armazenamento de energia de 3600Wh, calculada através da Equação 8.

$$E_{Bateria} = V \cdot Ah = 24V \cdot 150Ah = 3600Wh \quad (8)$$

Para suprir a demanda de energia total de 5860 Wh, o número de baterias necessárias é calculado através da Equação 9.

$$N = \frac{E_{Total}}{E_{Bateria}} = \frac{5860Wh}{3600Wh} = 1,62 \quad (9)$$

Arredondando para cima, são necessárias 2 baterias para garantir a autonomia desejada, com uma margem de segurança que cobre eventuais perdas de eficiência e degradação ao longo do tempo. Essas baterias serão configuradas em série ou paralelo, conforme a tensão desejada do sistema, otimizando a distribuição de energia.

As baterias sugeridas são as de Lítio 24V 150Ah da GreenPoint, vistas na figura 8, que pesam aproximadamente 27kg cada, totalizando 54kg o pack completo requerido.



Figura 9 – Painel solar fotovoltaico (SOLAR, 2023)

5.1.3 Dimensionamento dos Painéis Solares

Para o cálculo da energia gerada por metro quadrado de painel solar, foi assumida uma eficiência de 18% para os painéis solares (WEG, 2023) e uma média de 5 horas de pico solar por dia em áreas costeiras (REGINATO., 2020). Além disso, no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e de armazenamento, é importante considerar perdas que ocorrem devido à eficiência de controladores de carga, inversores e resistências internas das baterias. Para compensar essas perdas, recomenda-se (WEG, 2023) uma margem de segurança adicional de 20%, o que resultaria em um aumento proporcional tanto na área dos painéis quanto na capacidade das baterias; portanto, a energia gerada por metro quadrado de painel foi estimada pela Equação 10

$$E_{Gerada} = E_{Painel} \cdot Eficiencia \cdot t = 1000W/m \cdot 0,18 \cdot 5h \cdot 0,80 = 720Wh/m \quad (10)$$

Esse valor de $720Wh/m^2$ representa a quantidade de energia que um metro quadrado de painel pode gerar em um dia, considerando uma exposição solar ideal.

Em seguida, a área total de painéis solares necessária foi calculada com a Equação 11

$$A = \frac{E_{Total}}{E_{Gerada}} = \frac{5860Wh}{720Wh/m^2} = 8,13m^2 \quad (11)$$

Portanto, seriam necessários aproximadamente $8,13 m^2$ de painéis solares, como da figura 9, para atender à demanda energética diária do sistema (SOLAR, 2023). Este valor pode ser ajustado de acordo com a área disponível na embarcação para a instalação dos painéis solares e a disposição dos mesmos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e dimensionar um sistema de ar-condicionado para a embarcação SeaRay Sundancer 290 que utilizasse um compressor de corrente contínua, painéis solares e baterias. A proposta visava proporcionar uma alternativa eficiente e sustentável aos sistemas tradicionais que utilizam compressores de corrente alternada alimentados por geradores a diesel, com foco na economia de espaço e no impacto ambiental reduzido.

Durante a fase de dimensionamento, foram observados alguns desafios técnicos e limitações significativas que impactam a viabilidade prática da implementação deste sistema com a capacidade inicialmente proposta.

1. **Espaço Limitado para Painéis Solares:** Um ponto de limitação identificado foi o espaço disponível para a instalação dos painéis solares na embarcação. O dimensionamento inicial indicava a necessidade de aproximadamente 8,13 m² de área de painéis solares para garantir a autonomia energética do sistema em períodos de alta demanda de climatização. No entanto, em uma embarcação de médio porte como a SeaRay Sundancer 290, esse espaço é dificilmente viável, considerando as limitações físicas do convés e a necessidade de manter a funcionalidade e o design do barco. Segundo a Sea Ray (1999) a Sundancer 290 possui aproximadamente 4,71 m² de área livre na proa da embarcação, o que inviabiliza a instalação de painéis solares a fim de atender a demanda energética requerida. Essa restrição compromete a capacidade de recarga contínua das baterias apenas com energia solar, o que limita o potencial de autonomia do sistema.
2. **Desafios de Integração e Manutenção:** Além das limitações de potência e espaço, o sistema de ar-condicionado proposto exigiria uma integração cuidadosa com os sistemas elétricos e estruturais da embarcação. A instalação de baterias adicionais e a configuração dos painéis solares poderiam aumentar o peso total do barco, afetando a estabilidade e a performance. Ademais, o ambiente marinho exige materiais resistentes à corrosão e com alta durabilidade, o que pode aumentar os custos de instalação e manutenção a longo prazo.
3. **Baterias:** Para o caso do uso de baterias da GreenPoint, a fonte de energia pesará 54kg. Já para o uso de baterias de chumbo, seriam necessárias 4 baterias de 42kg para tocar o sistema, totalizando um peso de 168kg, o que parece inviável se comparado ao gerador Kohler de 5kW (BRASIL, 2023) sugerido pela fabricante Searay (1999) que pesa 132kg
4. **Viabilidade:** dadas as observações anteriores, chegou-se a conclusão que o

projeto é possível, mas não viável para a utilização de painéis solares. A maior limitação está na área necessária para a instalação dos painéis solares, ocupando um espaço inviável na embarcação. Quanto ao compressor verifica-se a questão física dos cabos de força através da equação :

$$P = V.i \quad (12)$$

Pode-se observar que para uma potência de 1200W a uma tensão de 24V será necessária uma corrente de 50A, o que agrega uma certa perda por Efeito Joule devido à necessidade de um cabeamento mais grosso, de pelo menos 16mm² para a demanda de corrente.

Com base nos desafios observados, algumas recomendações para pesquisas e projetos futuros são:

1. **Pesquisa por Compressores de Corrente Contínua com Menor Potência** : Investigar novas opções de compressores de corrente contínua com maior capacidade de resfriamento.
2. **Miniaturização e Otimização de Painéis Solares:** Explorar painéis solares de maior eficiência energética ou soluções flexíveis que possam ser integradas em superfícies inclinadas e áreas menores da embarcação.
3. **Análise Econômica e de Manutenção:** Investigar os custos de instalação e manutenção a longo prazo, especialmente em ambientes de alta corrosão, para verificar a viabilidade econômica do sistema.

Em conclusão, embora o projeto apresente desafios significativos em termos de viabilidade prática, ele contribui para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis de climatização para o setor naval. As recomendações feitas poderão auxiliar em futuras adaptações e ajustes, garantindo que a implementação de sistemas de ar-condicionado sustentáveis continue evoluindo para embarcações de todos os portes.

Com o dimensionamento descrito acima, o sistema elétrico projetado para alimentar o compressor apresenta uma configuração que garante a operação do ar-condicionado. A combinação de 2 baterias e 8,13 m² de painéis solares fornecem a autonomia necessária para operar o sistema de climatização durante 5 horas, mesmo em condições de baixa insolação. No entanto, o projeto não apresenta viabilidade para a embarcação em questão .

A instalação de painéis solares e baterias de chumbo na embarcação implica em ajustes no layout e potencial aumento de peso. Com base no dimensionamento realizado, o espaço necessário para os painéis solares é muito maior do que o espaço disponível embarcado, podendo comprometer o design funcional da embarcação, isto é, atrapalhar a movimentação das pessoas e oferecer riscos. Além disso, o peso das baterias de chumbo deverá ser considerado no cálculo de estabilidade para garantir

que o sistema elétrico não prejudique a navegabilidade e desempenho da SeaRay Sundancer 290.

REFERÊNCIAS

- BHATIA, A. Cooling load calculations and principles. **Continuing Education and Development**, v. 4, n. 6, p. 01–62, jun. 2014.
- BOATS, S. R. **290 Sundancer**. 1. ed. Knoxville: SEA RAY BOATS, 1999. 4 p.
- BRASIL, K. **Gerador 15kVA**. 2023. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_otto.htm. Acesso em: 13 mai 2024.
- DEGU, Y. M. Cooling load estimation and air conditioning unit selection for hibir boat. In: **The International Journal Of Engineering And Science (Ijes)**. Bahir Dar: Anais, 2014. p. 63 – 72. Disponível em: <https://theijes.com/papers/v3-i5/version-4/103504063072.pdf>. Acesso em: 19 set. 2024.
- EMERGENTE. **Bateria Lítio-íon 12V 150Ah**. 2024. Disponível em: <https://www.emergente.com.co/producto/bateria-de-litio-24v-150ah-greenpointl>. Acesso em: 13 mai 2025.
- MARINE, F. **Provectus 12V/220V**. 2022. Disponível em: https://scontent.fvcp10-1.fna.fbcdn.net/v/t39.30808-6/267890893_112528321274732_3585183215772703646_n.png?_nc_cat=107&ccb=1-7&_nc_sid=cc71e4&_nc_ohc=OVgesMCIhLwQ7kNvgFZJ0kX&_nc_zt=23&_nc_ht=scontent.fvcp10-1.fna&_nc_gid=AZQVFk5mUxpqEL4I8sM_Fr&oh=00_AYCVQhp38jmPxjeprpBmVyMpETH7pNzw9g_BzhX3VO5yYg&oe=6757CFE8. Acesso em: 5 nov. 2024.
- SILVA CELESTINO REGINATO., V. da. **POTENCIAL SOLAR NA ILHA DE FLORIANÓPOLIS – PROPOSTA DE MÉTODO**. 2020. Artigo, Engenharia Civil — Centro Tecnológico UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- SOLAR, N. **Painel Solar Fotovoltaico Renesola**. 2023. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-150wp-renesola-jc150m-12gb.html>. Acesso em: 13 mai 2024.
- VENTO-SUL. **BARCO SOLAR UFSC**. 2023. Disponível em: <https://teamventosul.com/>. Acesso em: 13 mai 2024.
- WADDELL, C.; KASERREKAR, S. Solar gain and cooling load comparison using energy modeling software. In: **Fourth National Conference Of Ibpsa-Usa**. New York: Anais, 2010. p. 150 – 159. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/proceedings/simbuild/2010/papers/simbuild2010_TS04A-01-Kasarekar.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.
- WALTRICH, M. **Projeto e otimização de cassetes de refrigeração para aplicações comerciais**. 2009. 125 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

WEG. **Saiba o que é eficiência de painéis solares e veja como calculá-la.** 2023. Disponível em: <https://www.weg.net/solar/blog/saiba-o-que-e-eficiencia-de-paineis-solares-e-veja-como-calcula-la/>. Acesso em: 13 mai 2024.