

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A NAVIOS  
ATRACADOS UTILIZANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS: O  
CASO DO TERMINAL DE CONTÊINERES DE PARANAGUÁ**

por

**Caroline Bellé Mével**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, 30 de setembro de 2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A NAVIOS  
ATRACADOS UTILIZANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS:  
O CASO DO TERMINAL DE CONTÊINERES DE PARANAGUÁ**

por

Caroline Bellé Mével

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE **BACHAREL EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA.**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Haffner

Co-orientadora: Profa. Dra. Bibiana Petry

Banca examinadora:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne – DELAE / UFRGS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues – DEMEC / UFRGS

Eng. Victor Ribeiro Barbosa - Terminal de Contêineres de Paranaguá

Porto Alegre, 30 de setembro de 2022

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo amor incondicional e por serem meus grandes apoiadores. Por terem me proporcionado tantas oportunidades e, principalmente, por me mostrarem a importância da educação pública, gratuita e de qualidade para a construção de uma sociedade crítica e consciente.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar este ensino público, gratuito e de excelência, mesmo com as adversidades encontradas no período atual.

Aos meus orientadores, Sérgio Haffner e Bibiana Petry, pela confiança, apoio e por terem me guiado até aqui. Um agradecimento especial à Bibiana, que esteve presente desde minha primeira experiência com pesquisa acadêmica e por quem tenho uma imensa admiração.

À equipe do Terminal de Contêineres de Paranaguá pelo fornecimento dos dados utilizados neste trabalho.

Ao meu irmão, Lucca, uma das pessoas mais importantes para mim e que esteve presente durante toda a escrita deste trabalho, me apoiando e confortando.

À todas amigas que me acompanharam em algum momento desta jornada, a vida é muito mais leve quando compartilhada! Obrigada por caminharem ao meu lado.

Agradeço também, às professoras, professores, alunas e alunos do curso de Engenharia de Energia. Este curso é tão especial por causa de vocês!

## RESUMO

O setor naval é responsável por 30% do total das emissões globais de gases da família dos NO<sub>x</sub>, nocivos à saúde humana e ao planeta. Para minimizar os impactos ambientais associados ao setor, técnicas como o fornecimento de energia elétrica aos navios atracados nos portos, também conhecida como *cold-ironing*, são utilizadas. Desta forma, o presente trabalho apresenta a análise para a implementação de uma instalação de *cold-ironing* no Terminal de Contêineres de Paranaguá aliado a estratégias de geração distribuída, considerando uma análise financeira e ambiental. Uma redução de 79% nas emissões de CO<sub>2</sub> foi constatada a partir da adoção da prática do *cold-ironing* (Cenário 1), o valor passa para 84% para o cenário com produção de energia própria fotovoltaica (Cenário 2) e 80% quando são inseridas baterias para armazenar o excedente de energia (Cenário 3). Além disso, estima-se uma receita anual de R\$ 3.136.272 (Cenário 1), R\$ 3.395.251 (Cenário 2) e R\$ 3.181.277,95 (Cenário 3), associada à venda de créditos de carbono gerados. Finalmente, considerando a venda de energia aos navios, todos os cenários são rentáveis apresentando uma TIR superior a 7%.

**Palavras-chave:** Cold-ironing. Geração Distribuída. Micro-redes. Gases de Efeito Estufa. Análise Financeira. Créditos de Carbono.

## ABSTRACT

The shipping sector is responsible for 30% of total global emissions of gases of the NO<sub>x</sub> family, harmful to human health and to the planet. To minimize these impacts, techniques such as the supply of electricity to ships docked at ports, also known as cold-ironing, are used. Therefore, this work aims to analyze the implementation of a cold-ironing infrastructure in the Terminal of Containers of Paranaguá allied to distributed generation strategies, considering a financial and environmental analysis. A reduction of 79% in CO<sub>2</sub> emission was noticed when cold-ironing is adopted (Scenario 1), the rate increases to 84% when photovoltaic energy production is included (Scenario 2) and lows back to 80% when energy storage is considered (Scenario 3). Furthermore an annual income of R\$ 3.136.272 (Scenario 1), R\$ 3.395.251 (Scenario 2) and R\$ 3.181.277,95 (Scenario 3) is linked to the trade of the carbon credits generated. Finally, considering the sale of energy to ships, all scenarios are profitable, with an IRR above 7%.

**Keywords:** Cold ironing. Distributed generation. Microgrids. Greenhouse gases. Financial analysis. Carbon Credits.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema OPS com fornecimento em alta tensão. . . . .	11
Figura 2 – Ilustração do ângulo zenital. . . . .	14
Figura 3 – Resumo esquemático da metodologia empregada. . . . .	18
Figura 4 – Vista aérea do Terminal de Contêineres de Paranaguá. . . . .	19
Figura 5 – Curva de carga diária para as diferentes taxas de ocupação das tomadas <i>reefer</i> . . . . .	23
Figura 6 – Consumo mensal de energia para as diferentes taxas de ocupação das tomadas <i>reefer</i> . . . . .	23
Figura 7 – Demanda dos navios e produção de energia pelos painéis fotovoltaicos para a primeira quinzena de Janeiro. . . . .	26
Figura 8 – Comportamento da bateria e da demanda dos navios entre os dias 05 a 18 de agosto. . . . .	27
Figura 9 – Variação da TIR Nominal em função do preço de revenda da energia elétrica aos navios. . . . .	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização das Referências utilizadas . . . . .	17
Tabela 2 – Potência ativa e aparente para as diferentes taxas de ocupação. FP=0.8 indutivo. . . . .	24
Tabela 3 – Dimensionamento dos condutores para as diferentes taxas de ocupação	24
Tabela 4 – Queda de tensão da subestação até o ponto de conexão (d =1000m). .	24
Tabela 5 – Emissões em cada cenário e custo associado (taxa de ocupação de tomadas <i>reefer</i> de 30%.) . . . . .	27

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	9
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	11
2.1	Sistema de fornecimento alternativo de energia . . . . .	11
2.1.1	Normas . . . . .	11
2.1.2	Tipologias de um sistema de OPS . . . . .	12
2.2	Sistemas de geração distribuída em portos . . . . .	13
2.2.1	Energia solar fotovoltaica . . . . .	14
2.2.2	Energia eólica . . . . .	15
2.2.3	Armazenamento de energia . . . . .	15
2.3	Análise financeira e ambiental . . . . .	16
2.4	Abordagens correlatas . . . . .	17
3	<b>ESTUDO DE CASO DO TERMINAL DE CONTÊINERES DE PARANAGUÁ</b> . . . . .	18
3.1	Abordagem proposta . . . . .	18
3.2	Descrição do Terminal de Contêineres de Paranaguá . . . . .	19
3.3	Cenário 1: Caso Base . . . . .	19
3.4	Cenário 2: Geração distribuída . . . . .	20
3.4.1	Levantamento do potencial solar-fotovoltaico . . . . .	20
3.4.2	Levantamento do potencial eólico . . . . .	21
3.5	Cenário 3: Geração distribuída com armazenamento de energia . . . . .	21
3.6	Análise econômica e quantificação das emissões . . . . .	21
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	22
4.1	Cenário 1: Caso base . . . . .	22
4.2	Cenário 2: Geração Distribuída . . . . .	25
4.3	Cenário 3: Geração distribuída com armazenamento de energia . . . . .	25
4.4	Avaliação Financeira e Quantificação das Emissões . . . . .	26
5	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	28
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	30
	<b>APÊNDICE A – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES CATEGORIAS DE NAVIOS.</b> . . . . .	34
	<b>APÊNDICE B – ÁREA DISPONÍVEL PARA A INSTALAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.</b> . . . . .	34

## 1 INTRODUÇÃO

A importância do setor naval é histórica. Desde as primeiras civilizações as vias marítimas são utilizadas para transportar mercadorias e contribuir para o intercâmbio cultural. Atualmente, 90% dos bens negociados no mundo são transportados por mar. Além de possuir grande importância econômica, este setor também é responsável por aproximadamente 30% do total das emissões globais de gases da família dos NO<sub>x</sub>, aos quais milhares de mortes estão atreladas, especialmente nas zonas costeiras (MERK, 2018). Desta forma, evidencia-se a necessidade de reduzir seu impacto socio-ambiental. Por isso, desde 1973 a Organização Marítima Internacional (do inglês *International Maritime Organization* - IMO), atua, por meio de regulamentações, para reduzir os impactos ambientais do setor. Uma medida, incentivada pelo organismo e pelo poder público de diversos países, é o fornecimento de energia elétrica aos navios atracados a partir da rede elétrica do porto. Esta prática conhecida como *cold-ironing*, *onshore power supply (OPS)* ou ainda *alternative maritime power (AMP)*, permite que os motores auxiliares dos navios permaneçam desligados durante sua estadia. Um dos principais benefícios desta ação é a melhoria da qualidade do ar no entorno, uma vez que a queima do combustível utilizado pelos navios libera gases como os NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, e partículas finas. De fato, diversas cidades portuárias já identificaram uma relação entre os índices de poluição do ar e a utilização dos motores dos navios quando esses se encontram atracados. Na cidade de Bastia, França, concluiu-se que o setor marítimo era responsável por um aporte de 30% das emissões durante o período estival (quando a afluência de cruzeiros aumenta significativamente) (MENEGAT, 2017). Por isso, os principais portos do mundo, como o Porto de Roterdã (Holanda) e os portos de Xangai e de Shenzhen (China), já estão equipados para realizar o fornecimento de energia elétrica aos navios atracados. Inclusive, a Comissão Europeia determinou por meio da Diretiva 2014/94/EU, que até 2025 todos os portos europeus devem possuir conexões para realizar o *cold ironing* (EUROPEU, 2014).

Contudo, para que essa estratégia se torne mais popular, desafios técnicos, financeiros e regulatórios devem ser superados. Dentre eles estão o alto custo do investimento inicial, somado ao preço de venda da energia elétrica em cada porto, o qual está sujeito à tributação de cada país (KUMAR; KUMPULAINEN; KAUHANIEMI, 2019). Ademais, a capacidade do sistema elétrico local deve ser compatível com a demanda adicional que cada navio representa; por exemplo no porto de Tallinn (Estônia) a demanda extra das embarcações chega frequentemente a 30 MW, sendo que picos de 45 MW já foram registrados durante a alta temporada dos cruzeiros (KUMAR; KUMPULAINEN; KAUHANIEMI, 2019; ERICSSON; FAZLAGIC, 2008).

Como navios comportam-se como cargas com demanda variável, cuja duração é determinada pelo tempo de escala, diversos autores propuseram combinações de sistemas de geração distribuída (GD) como fonte de energia para a eletrificação dos navios atracados.

[Abdmouleh et al. \(2017\)](#) definem a GD como qualquer tecnologia de geração ou armazenamento modular localizada perto do consumidor, que quando interconectadas com a rede de distribuição, passam a integrar uma micro-rede.

Ainda que as micro-redes já estejam consolidadas, sua aplicação em zonas portuárias é restrita. Isto porque é preciso relacionar a demanda por energia elétrica aos aspectos de ordem logística. Fatores como a alocação de atracação, programação de guindastes, programação de rotas e transportes de carga influenciam na variabilidade do consumo de energia ([BAKAR et al., 2021](#)).

Em busca de superar os desafios da integração destas estruturas, diversos autores propuseram combinações de sistemas de GD para suprir a demanda ocasionada pela eletrificação dos navios atracados. [Wang et al. \(2019\)](#), [Gutierrez-Romero, Esteve-Pérez e Zamora \(2019\)](#) e [Bakar et al. \(2022\)](#) analisaram a geração de energia por sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas e o uso de sistemas de armazenamento de energia para suprir as demandas elétricas portuárias. Enquanto o primeiro estudo buscou minimizar os custos de implementação e as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), o segundo avaliou a melhoria no Índice de Projeto de Eficiência Energética (do inglês *EEDI-Energy Efficiency Design Index*) que o fornecimento de energia elétrica aos navios atracados no porto de Cartagena acarretaria. Já o terceiro definiu o mix energético que minimiza o consumo de energia elétrica proveniente do sistema de distribuição tradicional.

[Song et al. \(2020\)](#) propuseram um sistema integrado de energia portuária (do inglês *Integrated Port Energy System - IPES*), o qual integra a demanda e produção de energia térmica do porto com as elétricas, buscando adotar meios inteligentes de despacho por meio de um modelo de otimização linearizado. Enquanto isso, [Peng et al. \(2019\)](#) buscaram minimizar tanto os custos de implementação do sistema de OPS em um terminal de navios porta-contêiner, como as emissões destas embarcações. [Innes e Monios \(2018\)](#) atentaram-se à implementação de sistemas de *cold-ironing* em pequenos portos, com enfoque no porto de Aberdeen, Escócia; o custo de implementação, demanda elétrica e potencial de redução das emissões foram avaliados. Finalmente, [Dalsøren et al. \(2009\)](#) e [McArthur e Osland \(2013\)](#) desenvolveram modelos para determinar as emissões de GES de diferentes navios.

Neste contexto, o presente trabalho busca analisar um sistema alternativo de fornecimento de energia elétrica para navios atracados aliado a diferentes estratégias de geração distribuída. Por meio de uma abordagem de estudo de caso, a demanda elétrica dos navios porta-contêineres em escala no Terminal de Contêineres de Paranaguá é determinada e os equipamentos necessários à estrutura dimensionados. Em seguida, três cenários são avaliados (caso base, caso com estratégia de GD e caso com armazenamento de energia) quanto a sua viabilidade técnica e financeira, assim como do seu potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa.

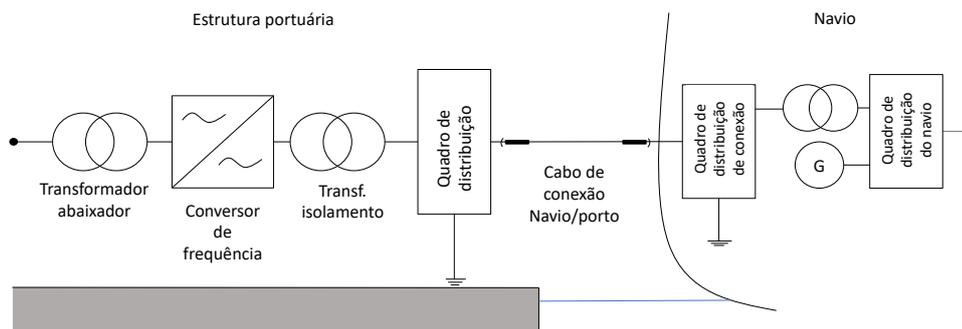
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção, apresenta a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Desta forma, ela contextualizará o dimensionamento de uma instalação de OPS, produção e armazenamento de energia, além dos conceitos utilizados para realizar a análise financeira e ambiental do projeto.

### 2.1 Sistema de fornecimento alternativo de energia

Deve-se se atentar a diversos fatores durante o projeto de uma instalação de fornecimento de energia elétrica alternativa. O espaço disponível no porto, a incidência de uma determinada categoria de navio, a frequência e tensão de sua rede elétrica e a demanda de pico à ser atendida irão influenciar no dimensionamento do sistema de *cold-ironing*, o qual esta ilustrado pelo diagrama de blocos da Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema OPS com fornecimento em alta tensão.



Fonte: Adaptado de Sciberras, Zahawi e Atkinson (2015)

#### 2.1.1 Normas

O papel das organizações normatizadoras é fundamental para garantir a segurança das instalações, e para que a tecnologia se desenvolva de forma unificada em todo mundo, o que propicia a adesão de todos os atores. Atualmente, existem três normas internacionais que buscam padronizar as instalações de OPS; IEC/IEEE 80005-1 (IEC/IEEE, 2019), IEC/IEEE 80005-2, IEC/IEEE 80005-3. Como apenas a IEC/IEEE 80005-1 trata do fornecimento de energia elétrica aos navios em alta tensão (6,6/11 kV) e este sistema é recomendado pelos autores Kumar, Kumpulainen e Kauhaniemi (2019), Sáenz (2019). Neste trabalho, se considera que as redes portuárias devem obedecer às características elétricas, proteção de energia e questões de segurança, descritas pela norma 80005-1.;

Por meio da IEC/IEEE 80005-1 é possível definir os sistemas necessários aos portos e navios para realizar o fornecimento de energia elétrica em alta e baixa tensão, tratando dos seguintes aspectos: qualidade da energia elétrica fornecida, equipamentos essenciais e seus parâmetros de dimensionamento e sistema de proteção. A conexão entre o porto e o navio é detalhada quanto ao número de cabos, características de resistência ao fogo, temperatura de operação, capacidade de condução e resistência a forças mecânicas. Um ponto crítico é a operação de sincronização entre a rede do porto e o navio: a transição entre desligamento dos geradores auxiliares para o fornecimento de energia elétrica do porto para a embarcação deve ser suave, o que significa que devem ser evitadas quedas de tensão, picos e sobrecargas. De acordo com a IEC/IEEE 80005-1 (IEC/IEEE, 2019), os equipamentos devem ser dimensionados conforme a previsão de carga dos navios, garantindo que a variação na frequência não exceda 5% entre a operação a vazio e nominal, que a queda de tensão, Equação (2.1), no ponto de fornecimento não seja superior a 3,5% para condições nominais e 6% a vazio.

$$QT[\%] = \frac{I\sqrt{3}d(R_{ca} \cos \phi + X_l \text{sen}(\phi))}{V_n} \times 100 \quad (2.1)$$

onde  $V_n$  é a tensão de linha em V,  $\phi$  o ângulo correspondente ao fator de potência,  $I$  a corrente nominal em A,  $d$  a distância em km,  $R_{ca}$  a resistência do cabo em ohm/km,  $X_l$  a reatância do cabo em ohm/km.

Para realizar o dimensionamento dos condutores, é calculado o valor da corrente de projeto  $I_p(A)$ ,

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3}VFP} \quad (2.2)$$

onde  $P[W]$  é a potência ativa total do circuito,  $V[V]$  a tensão do circuito e  $FP$  o fator de potência total do circuito.

### 2.1.2 Tipologias de um sistema de OPS

Existem três principais configurações para um sistema de OPS, propostas por Ericsson e Fazlagic (2008): 1. Cada cais com seu próprio transformador, conversor de frequência e sistema de aterramento; 2. Um conversor de frequência central para todos os pontos de conexão; 3. Distribuição em corrente contínua, a qual consiste em um retificador central que converte a tensão CA em CC. Um elemento comum a estas configurações é a presença de um transformador na doca, de maneira a propiciar um isolamento galvânico entre a rede elétrica do porto e a do navio. Além disso, o transformador na doca permite que a energia elétrica seja distribuída em uma tensão maior, reduzindo perdas nos cabos (ERICSSON; FAZLAGIC, 2008) (SÁENZ, 2019).

A configuração que apresenta um conversor de frequência central necessita de menor investimento inicial e ocupa menos espaço, portanto se mostra como a mais elegível; no entanto, em caso de falta no conversor de frequência central todas as embarcações serão afetadas (KUMAR; KUMPULAINEN; KAUHANIEMI, 2019).

Além da tipologia do sistema, é fundamental conhecer as diferentes categorias de navios (Apêndice A), pois o dimensionamento de um sistema de OPS, depende da potência instalada, tensão e frequência do sistema de elétrico de cada um. Estas 3 principais características variam conforme a categoria, o tamanho e o país de origem de cada navio. Ericsson e Fazlagic (2008) definiram a demanda média e de pico para navios porta-contêineres, Ro-Ro's, cruzeiros, petroleiros e/ou graneleiros de acordo com o comprimento de cada embarcação. O autor também quantificou a tensão e frequência adotadas por estes navios, no entanto, sem sub-categorizar para diferentes comprimentos. Outra maneira de filtrar a demanda de cada classe de navio é por meio da sua arqueação bruta (AB, ou GT, do inglês, *gross tonnage*), um valor adimensional relacionado com o volume interno total do navio (PARTNERSHIPS, 2022). Gutierrez-Romero, Esteve-Pérez e Zamora (2019) correlacionaram os valores de AB com a potência dos motores auxiliares para diversas classes de navios. Ainda que o espaço amostral considerado pelos autores seja bastante abrangente, as correlações propostas são apenas válidas dentro dos limites de AB avaliados.

Ericsson e Fazlagic (2008) também constataram que a maioria dos navios opera em baixa tensão (380–460 V), a exceção são cruzeiros e porta-contêineres de grande porte, os quais são alimentados em alta tensão. Além disso, aproximadamente 75% das embarcações tem seu fornecimento de eletricidade a 60 Hz e o restante a 50 Hz (KUMAR; KUMPULAINEN; KAUHANIEMI, 2019).

## 2.2 Sistemas de geração distribuída em portos

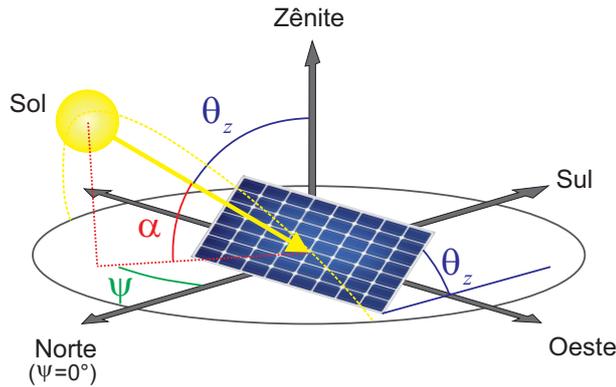
A integração das unidades de geração distribuída com os sistemas de armazenamento de energia elétrica e térmica, juntamente com o controle das cargas é classificada como uma micro-rede (KINNON; RAZEGHI; SAMUELSEN, 2021). A tendência do aumento da demanda elétrica nos portos (ocasionada por novas infraestruturas de *cold-ironing*) somada à eletrificação de seu próprio conjunto operacional (gruas e empilhadeiras, por exemplo), tornam imprescindível a garantia de um fornecimento confiável e resiliente de energia. Isto porque os custos para cada dia em que um grande complexo portuário se encontra inoperante podem atingir 150 milhões de dólares (KINNON; RAZEGHI; SAMUELSEN, 2021).

Portanto, com o intuito de proteger a rede portuária de possíveis faltas, além de garantir o fornecimento de energia elétrica renovável, serão abordadas as seguintes estratégias de GD: instalação de módulos fotovoltaicos, geração de energia eólica e sistemas de armazenamento de energia.

### 2.2.1 Energia solar fotovoltaica

O efeito fotovoltaico possibilita converter a energia solar em eletricidade, por meio das células de silício. O agrupamento destas células dá origem ao módulo (ou painel) fotovoltaico, que pode ser agrupado a outros módulos, adequando-se à demanda (e espaço disponível) do consumidor) (TOLEDO; FILHO; DINIZ, 2010). Devido à sua arquitetura, os portos apresentam-se como pontos interessantes para instalação de módulos fotovoltaicos, pois esses podem ser posicionados nos telhados dos galpões e armazéns sem necessitar de um espaço dedicado. Como a maioria dos módulos é instalada de forma fixa, uma análise técnica do melhor ângulo de geração solar fotovoltaica torna-se necessária. Os dois principais parâmetros a serem determinados são: o ângulo azimutal ( $\psi$ ) e o ângulo zenital ( $\theta_z$ ) (CAMPOS; ALCANTARA, 2013), ilustrados na Figura 2. Eles dependem de parâmetros relacionados com a geografia do local (CAMPOS; ALCANTARA, 2013), tais como: o ângulo horário  $\omega$ , o ângulo da declinação solar  $\delta$ , o ângulo da da altitude solar  $\alpha$  e, por fim, a latitude  $\phi$ .

Figura 2 – Ilustração do ângulo zenital.



Fonte: Mével et al. (2019)

A escolha correta da orientação permite otimizar a curva de geração, melhorando o desempenho da produção de energia elétrica. Finalmente, a potência de saída do sistema de painéis fotovoltaicos,  $P(t)$  é dada por (BAKAR et al., 2022):

$$P(t) = P_{nom} f_{pv} \frac{Ir(t)}{Ir_{base}} [1 + T_c(C_T - C_{Tc})] \quad (2.3)$$

onde  $P_{nom}$  é a potência nominal do sistema (em kW),  $f_{pv}$  é um fator de redução,  $Ir(t)$  é a irradiação no instante  $t$  (em kW/m<sup>2</sup>),  $Ir_{base}$  é a irradiação nas condições padrões de teste do painel;  $T_c$  é um fator de correção de temperatura,  $C_{Tc}$  a temperatura nas condições padrões de teste e  $C_T$  a temperatura do módulo no instante  $t$ . Assim, a potência ativa fornecida pelo sistema resulta do produto entre  $P(t)$  e  $\eta$ , que é a eficiência do inversor para uma dada potência de saída.

A potência instalada do sistema fotovoltaico depende da área disponível e pode ser determinada por meio da Equação (2.4):

$$P_{inst} = \frac{A_g}{A_p} \times P_{ppv} \quad (2.4)$$

onde  $A_g$  é a área disponível nos telhados dos galpões do terminal,  $A_p$  a superfície de um módulo fotovoltaico e  $P_{ppv}$  a potência de pico do painel em [kW].

### 2.2.2 Energia eólica

Define-se o vento como o ar atmosférico em movimento. Esse movimento é gerado, basicamente, pela circulação das camadas de ar da atmosfera devido à diferença de temperatura entre elas. A energia eólica, portanto, é a energia cinética desse movimento de ar. Zonas portuárias também podem apresentar bom potencial de geração de energia eólica tanto *onshore* quanto *off-shore* devido a sua localização geográfica. Se tomarmos como exemplo a costa brasileira, a velocidade média anual dos ventos é de, no mínimo, 6,5 m/s, podendo chegar a 10 m/s em várias regiões para uma altura de 100 m (JUNIOR et al., 2017). As principais unidades conversoras de energia eólica são aerogeradores de eixo horizontal e três pás, que convertem a energia cinética do vento em torque mecânico em seu eixo (DUMONT, 2019). A potência de um aerogerador é descrita da seguinte maneira:

$$P = \frac{1}{2} \eta_m \eta_e \rho C_p A U^3 \quad (2.5)$$

onde  $\eta_m$  é a eficiência mecânica,  $\eta_e$  a eficiência elétrica do aerogerador,  $U$  a velocidade do vento [m/s],  $A$  a superfície perpendicular ao escoamento [m<sup>2</sup>],  $\rho$  a massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>] e  $C_p$  é o coeficiente de potência do rotor, que representa a parcela do escoamento que é realmente aproveitada pela turbina. O valor de  $C_p$  será sempre inferior a 0,59, conhecido como limite de Betz (DUMONT, 2019).

### 2.2.3 Armazenamento de energia

Os sistemas de armazenamento de energia permitem estocar o excedente da produção de energia, para ser utilizada durante períodos de pico na demanda e/ou baixa produção das unidades de GD.

Dentre as tecnologias de armazenamento existentes se destacam as baterias de íon de lítio pela maior densidade de energia e de potência, maior vida útil, além de sua capacidade de reagir rapidamente a picos na demanda (KUMAR et al., 2020). Além disso esta tecnologia já é madura e possui alta eficiência, baixa manutenção e baixo risco (DUFO-LÓPEZ; BERNAL-AGUSTÍN, 2015). Em seu estudo, Wang et al. (2019) expressou o comportamento de um sistema de armazenamento por:

$$E_t = E_{t-1}(1 - \sigma_b) + \eta_c Q_t^c - \frac{1}{\eta_d} Q_t^d \quad (2.6)$$

onde  $E_t$  representa o estado de carga da bateria no instante  $t$ , em kWh;  $\sigma_b$  é um peso para a auto-descarga da bateria;  $\eta_c$  e  $\eta_d$  são as eficiências de carregamento e descarregamento (compreendidas no intervalo  $[0,1]$ ), respectivamente;  $Q_t^c$  e  $Q_t^d$  são, respectivamente, a energia de carregamento e descarregamento, em kWh, no instante de tempo  $t$ . Além disso, o carregamento da bateria é limitado pela sua capacidade máxima, assim como o descarregamento o é por um nível mínimo de energia, o qual varia de acordo com a tecnologia escolhida.

### 2.3 Análise financeira e ambiental

A análise financeira busca avaliar a viabilidade do investimento. Isto é feito por meio de indicadores como a Taxa Interna de Retorno (TIR). De acordo com [Torres \(2004\)](#), o método da TIR é aquele que nos permite encontrar a remuneração do investimento em termos percentuais, ou seja, encontrar a taxa de juros que permite igualar receitas e despesas na data zero; para que o investimento seja vantajoso, a TIR deve ser, no mínimo maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) ([TORRES, 2004](#)).

Visto que a principal motivação em implementar um sistema de *cold-ironing* é a melhoria da qualidade do ar, deseja-se monetizar os benefícios sociais e ambientais gerados pelo não funcionamento dos motores à combustão interna dos navios ([INNES; MONIOS, 2018](#); [PAPOUTSOGLU, 2012](#)). Desta forma, busca-se determinar os custos marginais causados pelas emissões geradas pela queima do combustível e compará-los com os do sistema de fornecimento de energia elétrica portuário ([MCARTHUR; OSLAND, 2013](#)). Para a quantificação das emissões utiliza-se:

$$E_{ijk} = T_{ij}(AE_i LF_i EF_k) \quad (2.7)$$

onde  $E_{ijk}$  são as emissões referentes ao poluente  $k$  emitidas pelo navio  $i$  na escala  $j$ ;  $T_{ij}$  é a duração da escala  $j$  do navio  $i$ ; já  $AE_i$  é a potência dos motores auxiliares do navio  $i$  e  $LF_i$  representa o fator de carga destes motores; por fim,  $EF_k$  é o fator de emissão do poluente  $k$ . Os autores [Wang, Mao e Rutherford \(2015\)](#) consideraram os fatores de emissão, os quais são baseados na regulamentação de 2020 que exige o uso de combustíveis com baixo teor de enxofre ([ORGANIZATION, 2020](#)). Em seguida, atrela-se um valor à cada quilograma de poluente emitido. [McArthur e Osland \(2013\)](#) fornecem os custos, em coroas norueguesas, por quilograma de  $NO_x$  (200 K) e  $PM_{10}$  (2900 NOK) e por tonelada de  $CO_2$  (205 NOK) emitidos. Eles representam os prejuízos à saúde e ao ecossistema, assim como a depreciação de construções causada pelos poluentes. Outra abordagem é considerar cada tonelada de  $CO_2$  evitada como um crédito de carbono e incluí-lo como receita no fluxo de caixa.

## 2.4 Abordagens correlatas

A Tabela 1 caracteriza as diferentes referências utilizadas para a elaboração deste trabalho. Percebe-se que a maior parte dos estudos desenvolvidos não analisam o caso brasileiro, exceto o autor H (MACIEL, 2018). O autor dimensionou um sistema de *cold-ironing* para o Terminal de Contêineres de Paranaguá; embora a viabilidade técnica do sistema tenha sido avaliada, nenhuma avaliação econômica ou ambiental foi realizada, lacunas que este trabalho busca suprir. Em relação ao perímetro de estudo, as referências A, D, E, I consideraram as demandas energéticas de todo o porto; no entanto predominaram os estudos focados apenas nas demandas referentes ao fornecimento de energia elétrica para os navios. Assim como H (MACIEL, 2018) e L (SCIBERRAS; ZAHAWI; ATKINSON, 2015), este trabalho se concentra em apenas uma classe de navios. Alguns autores atentaram-se mais ao dimensionamento dos equipamentos, enquanto outros focaram-se em realizar um balanço de energia e potência. Nem todas as referências avaliaram o porto como uma micro-rede produtora de energia, contudo os que o fizeram consideraram a integração de energia eólica, fotovoltaica e armazenamento de energia (B, D, J). Várias referências (A, B, C, D, E, F, I e K) buscaram otimizar a alocação dos navios, assim como o despacho da geração de energia pelas fontes de geração distribuída. Enquanto G, H, I, K, L e presente trabalho se concentraram em determinar a demanda dos navios. Finalmente, as referências A, C, E, F e K avaliaram tanto a redução dos impactos ambientais como viabilidade econômica da implementação do OPS, tal qual este estudo busca fazer.

Tabela 1 – Caracterização das Referências utilizadas

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	*
<b>Aplicação</b>	Nacional								X					X
	Internacional	X	X	X	X	X	X	X			X		X	
<b>Perímetro</b>	Todas instalações do porto	X			X	X				X				
	Instalação de cold-ironing (diferentes tipos de navio)		X	X			X	X				X		
	Instalação de cold-ironing (apenas uma classe de navio)								X				X	X
<b>Dimensionamento da infraestrutura</b>	Detalhado					X	X	X			X	X	X	X
	Balanço de energia	X	X	X	X	X				X				X
<b>Geração distribuída</b>	PV		X	X							X			X
	Eólica	X	X	X							X			X
	Armazenamento	X	X	X							X			X
<b>Contribuição</b>	Revisão bibliográfica							X				X		
	Otimização (fluxo de potência, custo-benefício...)	X	X	X	X	X				X	X			
	Análise dos impactos do cold-ironing no SEP													X
	Determinação da demanda elétrica dos navios/porto							X	X	X		X	X	X
<b>Análise do impacto ambiental</b>	Quantificação das emissões de CO2	X	X	X		X	X					X	X	X
	Avaliação de indicadores ambientais ( EEDI)		X											
	Análise de custo-benefício social						X							
<b>Análise financeira</b>	CAPEX/OPEX	X		X	X	X						X		X

Nota:

A: Wang et al. (2019)

B: Gutierrez-Romero, Esteve-Pérez e Zamora (2019)

C: Bakar et al. (2022)

D: Song et al. (2020)

E: Peng et al. (2019)

F: Innes e Monios (2018)

G: Ericsson e Fazlagic (2008)

H: Maciel (2018)

I: Kanellos, Volanis e Hatzigiorgiou (2017)

J: Kumar et al. (2020)

K: Papoutsoglou (2012)

L: Sciberras, Zahawi e Atkinson (2015)

\* estudo proposto pela autora

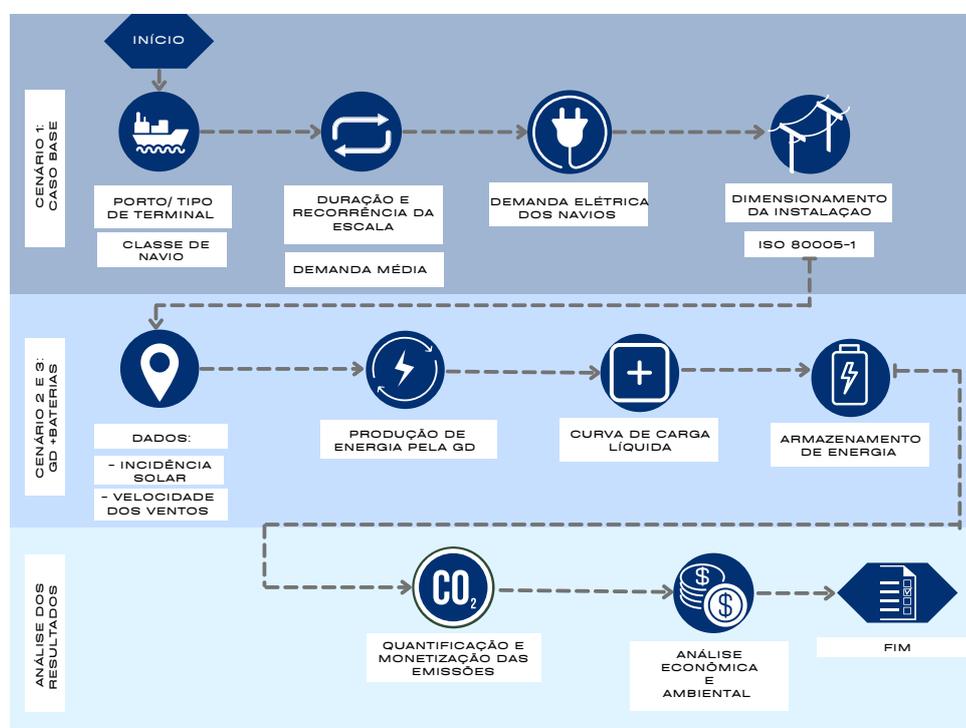
### 3 ESTUDO DE CASO DO TERMINAL DE CONTÊINERES DE PARANAGUÁ

O presente trabalho visa quantificar o consumo de energia elétrica dos navios atracados, bem como dimensionar o sistema de fornecimento de energia elétrica alternativo. A motivação deste trabalho consiste em melhorar a qualidade do ar localmente, e consequentemente, os indicadores de sustentabilidade do porto. Também propõe-se analisar a implementação de estratégias de geração distribuída. Para isso, a metodologia desenvolvida se baseia no fluxo de navios do Terminal de Contêineres de Paranaguá, TCP (Paranaguá - PR), posicionando-se como um caso base para futuros trabalhos e estudos.

#### 3.1 Abordagem proposta

Como ilustrado na Figura 3, o ponto inicial é a definição do Porto atendido, quais os terminais existentes e quais categorias o frequentam. Em seguida, é necessário compreender o padrão de chegada dos navios, tempo de estadia e recorrência no porto, além de determinar a demanda elétrica, frequência e tensão de operação da embarcação. Por meio destes dados dimensionam-se os principais equipamentos da instalação: transformador, conversor de frequência, painel de distribuição, transformador secundário (na doca), assim como o arranjo e dimensão dos cabos respeitando as orientações da ISO 80005-1.

Figura 3 – Resumo esquemático da metodologia empregada.



Fonte: Autora.

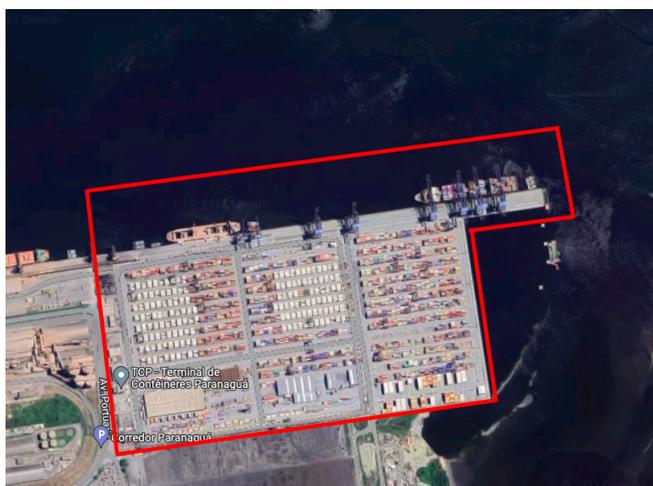
Para estimar o potencial de geração própria de energia, necessita-se analisar a incidência solar, velocidade e distribuição dos ventos, como discutido nas Seções 2.2.1 e 2.2.2. A necessidade de investir em unidades de armazenamento de energia é avaliada caso

haja excedente de produção pelas unidades de GD. Uma vez que o sistema de OPS e as fontes de GD forem dimensionados é possível realizar as análises financeira e ambiental.

### 3.2 Descrição do Terminal de Contêineres de Paranaguá

O Terminal de Contêineres de Paranaguá (TCP), Paraná, é o maior terminal de contêineres da América do Sul, com capacidade de operar 2,5 milhões de TEU's/ano, além disso pode receber até três porta-contêineres simultaneamente (TCP, 2022). A Figura 4 apresenta a vista aérea do porto.

Figura 4 – Vista aérea do Terminal de Contêineres de Paranaguá.



Fonte: Maps (2022)

Para adequar a metodologia proposta às necessidades do TCP, definiu-se três cenários:

- Cenário 1 (caso base) : fornecimento de eletricidade exclusivamente pela concessionária;
- Cenário 2 (caso base + GD): geração própria de energia por meio de energia eólica e solar fotovoltaica;
- Cenário 3 (caso base + GD + armazenamento de energia): uso de baterias para armazenar o excedente de produção.

### 3.3 Cenário 1: Caso Base

Os dados correspondentes ao fluxo de navios para o ano base de 2021, a qual classe estes pertencem e seu tempo de atracação foram fornecidos pelo TCP. A partir do nome do navio, obtém-se o valor da arqueação bruta, do comprimento, peso bruto e capacidade em TEU's<sup>1</sup>, estes valores permitem prever a potência solicitada à rede elétrica do porto

<sup>1</sup> Do inglês *Twenty-foot Equivalent Unit*, a unidade equivalente a vinte pés é uma unidade de medida utilizada para determinar a capacidade de carga de navios porta-contêineres e terminais.

e estimar as emissões geradas. Neste estudo foram considerados apenas navios do tipo porta-contêineres, pois esses representaram 90,6% das visitas recebidas no terminal em 2021. A maior carga elétrica desta classe de embarcação são os contêineres refrigerados, também chamados de *reefer*, por isso optou-se por quantificar a demanda elétrica do terminal com base neste equipamento. Desta forma, para os navios de comprimento de até 300 m a capacidade de contêineres refrigerados considerada foi de 500 contêineres, enquanto para os porta-contêineres cujo comprimento é superior a 300 m, considerou-se 1479 tomadas *reefer* por navio. Ao todo, o TCP conta com 2812 tomadas para armazenar contêineres refrigerados em seu pátio, além disso, o produto cujo percentual de exportação é o mais significativo (38%) são as carnes de aves, as quais devem ser condicionadas em ambiente de temperatura controlada [PORTOS \(2020\)](#). Para o transporte deste tipo de produto a temperatura interna do contêiner deve ser entorno de  $-21^{\circ}\text{C}$ , o que implica em uma potência média de 4 kW ([NABER et al., 2003](#)) por contêiner. Por isso, considerou-se que cada um dos *reefers* apresenta uma demanda de 4 kW.

Atualmente, o terminal passa por obras de melhoria da sua infraestrutura, dentre elas, a construção de uma nova subestação, a qual foi considerada como condição inicial para o dimensionamento dos equipamentos. As características da subestação são:

- tensão de recebimento de energia: 138 kV;
- tensão de distribuição de energia: 13,8 kV;
- demanda contratada atual: 10 MVA (com possibilidade de aumento para 20 MVA sem investimentos adicionais e expansão para até 40 MVA).

A corrente de projeto foi determinada por meio da Equação (2.2) e o fator de potência considerado foi de 0,8, conforme [Ericsson e Fazlagic \(2008\)](#). Visto que a distribuição de energia elétrica dentro do terminal é feita em média tensão, utilizou-se como apoio a NBR 14039 para o dimensionamento dos cabos ([MORENO et al., 2011](#)). O método de referência adotado é o “C - cabos unipolares justapostos (na horizontal ou em trifólio) e cabos tripolares em canaletas fechadas no solo”. A norma IEC 80005-1 determina que os condutores devem ser de cobre lisos ou revestidos de metal, o isolamento deve ser em EPR, HF EPR, HEPR, etc. Em seguida, procedeu-se com a verificação da queda de tensão por meio da Equação (2.1).

### 3.4 Cenário 2: Geração distribuída

#### 3.4.1 Levantamento do potencial solar-fotovoltaico

A partir das coordenadas geográficas do porto, pode-se estimar a incidência solar na região bem como determinar o ângulo ótimo da inclinação dos painéis. A ferramenta

*Global Solar Atlas* disponibilizada pelo Banco Mundial, possibilitou a obtenção dos dados de irradiação solar no local, além de determinar o ângulo de inclinação ótimo dos módulos fotovoltaicos (SOLARGIS, 2021). As curvas de geração diárias para uma determinada potência instalada, são obtidas por meio da plataforma *Renewables Ninja* (PFENNINGER; STAFFELL, 2016).

A potência instalada foi determinada pela Equação (2.4). A estimativa da área disponível sobre os telhados dos galpões foi realizada por meio da ferramenta de medição do *Google Maps* (MAPS, 2022). Como os painéis devem estar orientados para o norte geográfico, optou-se por avaliar apenas as parcelas voltadas para esta direção. O modelo de painel utilizado foi o “ODA465-36V-MH”, cuja potência máxima e dimensões são 465 W e 2102 x 1040 x 35 mm, respectivamente (NINGBO OSDA SOLAR CO., LTDA, 2020), desta forma o sistema completo conta com 7770 painéis, totalizando 3,6 MWp. As áreas obtidas estão detalhadas no Apêndice B.

### 3.4.2 Levantamento do potencial eólico

Para estimar o potencial de geração eólica é necessário determinar a velocidade média do vento na região. A partir dos Atlas eólico do Paraná e do Brasil (COPEL, 2007; JUNIOR et al., 2017) obteve-se os valores da velocidade média ( $U = 4$  m/s) para uma altura de 100m, do fator de forma ( $k = 1,7$ ) e do fator de escala ( $c = 7$ ). Em seguida, é possível estimar o potencial eólico de uma turbina pela Equação (2.5), onde  $C_p$  é obtido pelos dados disponíveis em catálogos de fabricantes.

### 3.5 Cenário 3: Geração distribuída com armazenamento de energia

As unidades de armazenamento de energia são dimensionadas com base nos resultados da simulação do Cenário 3, pois o seu objetivo é aproveitar a energia gerada pelos sistemas eólico e fotovoltaico. Outro ponto considerado é a variação da tarifa em relação aos horários de ponta (18, 19, 20 horas). Assim, a operação da bateria é governada pelas seguintes condições:

- a energia armazenada respeita um valor máximo e mínimo;
- a energia produzida pelo sistema de GD é utilizada para abater a demanda dos navios, sendo que o excedente é utilizado para carregar as baterias;
- a bateria é descarregada no horário de ponta, buscando alisar a curva de carga.

### 3.6 Análise econômica e quantificação das emissões

O custo de investimento do sistema de OPS foi calculado com base nos valores fornecidos por Papoutsoglou (2012), o preço das baterias foi baseado na estimativa de

Mongird et al. (2020) que apresenta o investimento em dólar por kWh de bateria instalada. Para os demais equipamentos foram utilizados dados públicos disponíveis na internet e consultas a empresas especializadas. Aplicou-se um horizonte temporal de 20 anos e uma taxa de juros de 5,5% a.a. Para estimar as despesas com a demanda adicional de energia, partiu-se da hipótese de que o TCP é um consumidor do subgrupo A2 com enquadramento tarifário Azul<sup>2</sup>. As emissões dos navios foram quantificadas conforme a Equação 2.7, a potência dos motores auxiliares foi considerada como a mesma das curvas de carga obtidas e os fatores de emissão ( $CO_2$ : 610 g/kWh;  $NO_x$ : 9,8 g/kWh;  $SO_x$ : 2,1 g/kWh;  $PM_{10}$ : 0,4 g/kWh) conforme (WANG; MAO; RUTHERFORD, 2015). Para os Cenários 1 e 2 os Fator de Emissão de  $CO_2$  do Sistema Interligado (MCTI, 2022) foram utilizados. No caso dos Cenários 2 e 3, não há emissão associada à produção de energia; embora haja durante a fabricação, instalação e reciclagem dos módulos fotovoltaicos e baterias, considerou-se um fator nulo. Também foi considerado que a energia injetada na rede resultava em uma "emissão negativa", com o objetivo de compensar o uso futuro do sistema elétrico convencional. Por fim, os benefícios sociais originados pela redução das emissões de  $NO_x$  e  $PM_{10}$  foram quantificados (MCARTHUR; OSLAND, 2013). Em relação às emissões de  $CO_2$ , seu custo foi calculado com base do valor de um crédito de carbono, R\$ 365 para cada tonelada de  $CO_2$  não emitida (CREDCARBONO, 2022). A venda destes créditos foi incluída como receita no fluxo de caixa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram divididos para cada um dos cenários propostos, os quais são comparados através da avaliação financeira. Esta separação busca manter uma coerência com a ordem apresentada no Capítulo 3.

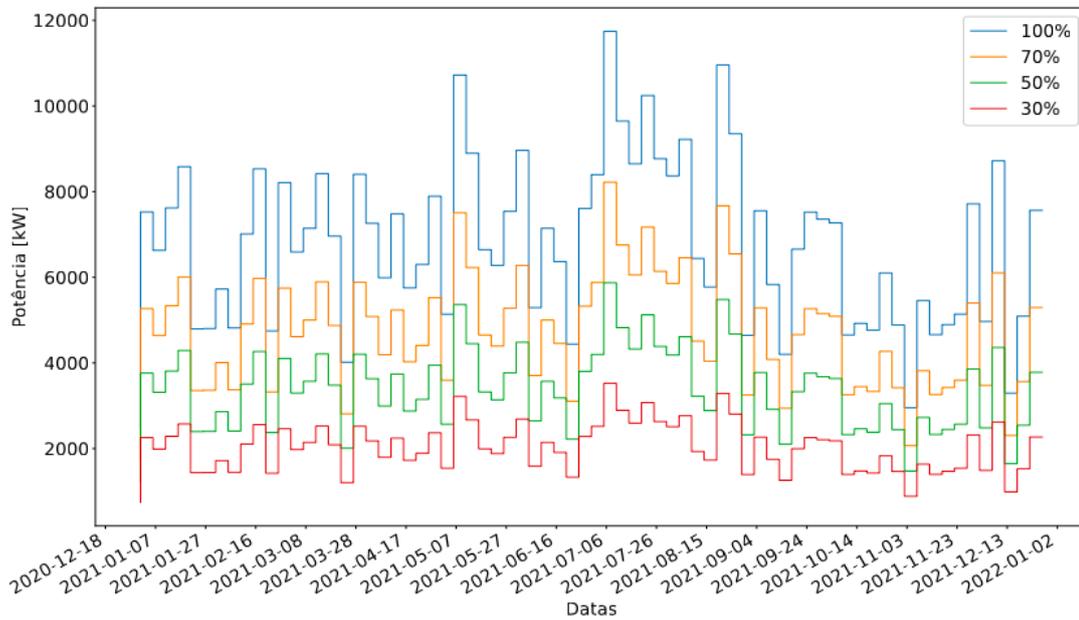
### 4.1 Cenário 1: Caso base

O cenário base considera que a demanda adicional por parte dos navios será suprida pela sistema elétrico convencional. Analisou-se quatro diferentes taxas de ocupação das tomadas *reefer*: 100%, 70%, 50% e 30%. As curvas de carga estão representadas pela Figura 5 e o consumo de energia mensal é ilustrado pela Figura 6. Por meio dela percebe-se que o pico de demanda é no mês de julho, quando o consumo foi de 6904,1 MWh, para uma taxa de ocupação das tomadas de 100%.

A Tabela 2 apresenta os valores de pico encontrados para os diferentes cenários, nota-se que mesmo para o caso mais severo a nova subestação do TCP teria possibilidade aumentar a demanda contrata. Todavia, como o terminal conta com apenas 2812 tomadas, sem previsão de ampliação até 2045 (PORTOS, 2020) considera-se que o cenário com taxa de ocupação de 100% das tomadas dos navios pouco provável.

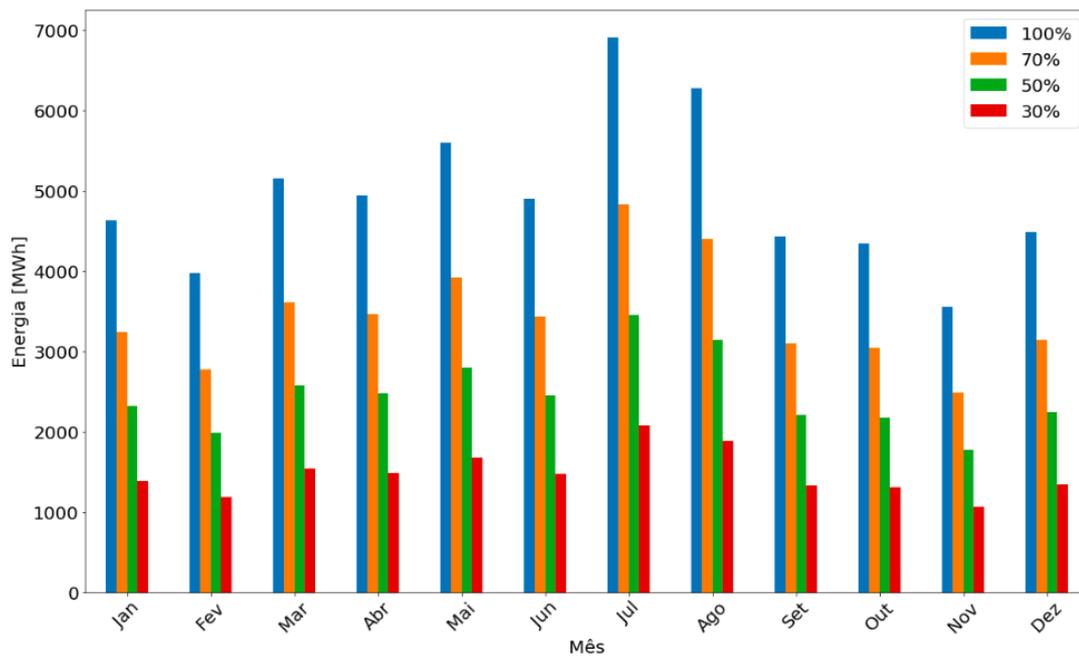
<sup>2</sup> Consumidor do Grupo A2, Azul, Valores Médios Anuais: Demanda Fora da Ponta R\$ 8,06/kW, Demanda Ponta R\$16,72/kW, Consumo R\$60,17/MWh. (ANEEL, 2022).

Figura 5 – Curva de carga diária para as diferentes taxas de ocupação das tomadas *reefer*.



Fonte: Autora.

Figura 6 – Consumo mensal de energia para as diferentes taxas de ocupação das tomadas *reefer*.



Fonte: Autora.

Tabela 2 – Potência ativa e aparente para as diferentes taxas de ocupação. FP=0.8 indutivo.

Taxa de ocup.	$P_{max,central}$ [kW]	$P_{max,doca}$ [kW]	$S_{central}$ [kVA]	$S_{doca}$ [kVA]
100%	17748	5916	22185	7395
70%	12424	4141	15529	5176
50%	8874	2958	11092	3697
30%	5324	1774,5	6655	2218

Fonte: Autora

A Tabela 3 apresenta a corrente de projeto, a seção do condutor e sua capacidade de condução.

Tabela 3 – Dimensionamento dos condutores para as diferentes taxas de ocupação

Local	Parâmetro	Taxa de ocupação tomadas reefer			
		100%	70%	50%	30%
Conexão SE	$I_{proj}$ [A]	928,15	649,71	464,07	278,44
	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	1000	400	240	95
	Cap. Cond. [A]	996	658	509	294
SE-Doca	$I_{proj}$ [A]	309,38	216,57	157,69	92,81
	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	120	70	35	16
	Cap. Cond. [A]	338	243	164	104
Conexão Navio	$I_{proj}$ [A]	646,89	452,83	323,45	194,07
	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	400	240	120	50
	Cap. Cond. [A]	658	509	338	196

Fonte: Autora.

O sistema pode ser dividido em três principais pontos: a conexão com a subestação GIS do TCP, em 13,8 kV, cujos cabos devem ser dimensionados para suportar a demanda das três docas; a distribuição de energia da subestação para cada uma das docas, também realizada em 13,8 kV; a conexão final com o navio, em 6,6 kV. O ponto crítico da queda de tensão está entre a subestação e o transformador que antecede a conexão com o navio, por ser a maior distância a ser percorrida pelos cabos. Como mostra a Tabela (4), para uma distância de 1000 m, os valores estão dentro do limite de 3,5% exigido pela norma ISO 80005-1.

Tabela 4 – Queda de tensão da subestação até o ponto de conexão (d =1000m).

	Percentual de ocupação das tomadas reefer			
	100%	70%	50%	30%
Queda de tensão	0,82%	0,86%	1,11%	1,37%

Fonte: Autora.

Cabe salientar que, mesmo para o caso em que uma taxa de ocupação de 30% é considerada, os valores estão de acordo com a literatura. Como citado por [Ericsson e Fazlagic \(2008\)](#) as demandas médias para navios porta-contêineres de 300 m de comprimento estão na faixa de 1,5 a 2 MW, podendo chegar a 8 MW apenas em casos isolados. Além

disso, em uma pesquisa realizada pelo Porto de Roterdã, apenas um dos porta-contêineres avaliados apresentou demanda superior a 6 MW (DOVES, 2006). Por isso, optou-se por seguir as análises considerando uma taxa de ocupação de 30%, resultando em uma estrutura composta pelos seguintes equipamentos:

- um transformador (138/13,8 kV) e um conversor central (60/50 Hz) de 8 MVA<sup>1</sup>;
- um transformador (13,8/6,6 kV) de 3 MVA em cada doca;
- sistema de gerenciamento de cabos;
- quadros de distribuição e proteção.

Ressalta-se que a configuração acima apresentada é compatível com a capacidade da nova subestação GIS, a qual permitirá realizar o incremento na demanda contratada para até 20 MVA.

## 4.2 Cenário 2: Geração Distribuída

Após avaliar a velocidade média anual do vento na região do porto de Paranaguá (4 m/s), concluiu-se que a região não apresenta potencial para desenvolvimento de turbinas eólicas. Desta forma, considerou-se o sistema de geração fotovoltaico, como fonte de GD. A Figura 7 apresenta a curva de carga agregada dos navios para a taxa de ocupação de 30% das tomadas em comparação com a produção de eletricidade pelo sistema fotovoltaico. O pico de produção é de 2930,7 kW, registrado no dia 15 do mês de novembro e o valor médio anual é de 1255,45 kW. A energia produzida pelo sistema durante o período avaliado foi de 5585,5 MWh, e o fator de capacidade registrado de 17,7%.

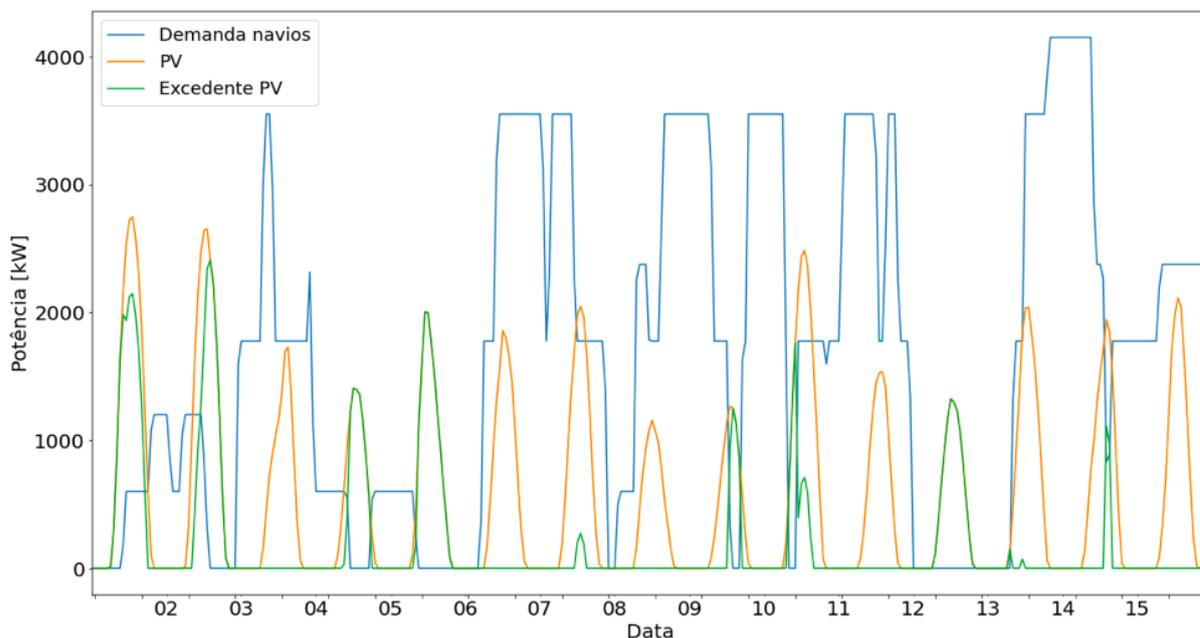
Apesar de não suprir toda a demanda, o sistema dimensionado apresentou um balanço líquido com excedente de produção. Durante 17% do período analisado foram registradas ocorrências de injeção de energia na rede elétrica convencional, totalizando 1439,5 MWh injetados durante o ano.

## 4.3 Cenário 3: Geração distribuída com armazenamento de energia

Dimensionou-se a bateria de maneira a poder estocar todo o excedente gerado pelo sistema fotovoltaico, em um intervalo de 24 horas. O modelo escolhido foi o “R1500 (24 Packs) / M48290P5B” da empresa LG, capaz de armazenar 357,5 kWh, desta forma estima-se que sejam necessários 60 módulos (capacidade total de 21450 kWh). A operação da bateria é regida pelos critérios estabelecidos na Seção 3.5, uma eficiência de carregamento e descarregamento de 95% e descarga máxima de 80% da capacidade de armazenamento.

<sup>1</sup> Uma margem de 20% foi considerada para atender a possíveis flutuações na demanda.

Figura 7 – Demanda dos navios e produção de energia pelos painéis fotovoltaicos para a primeira quinzena de Janeiro.



Fonte: Autora

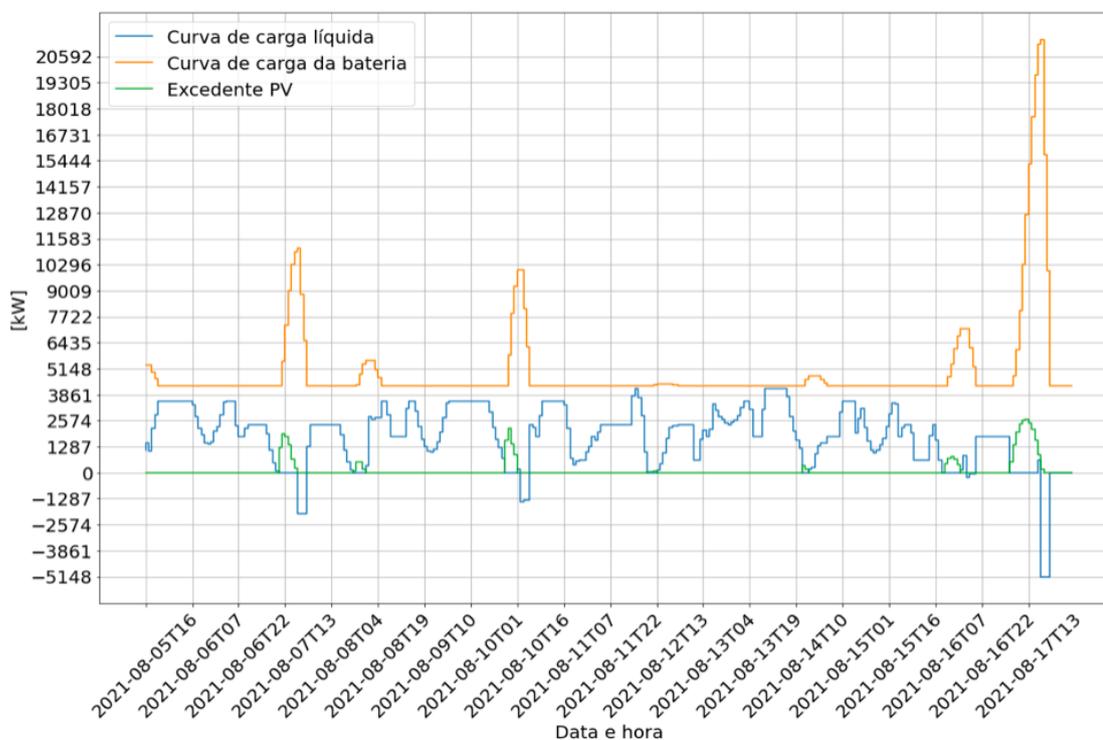
Dada a premissa de que o TCP é um consumidor do subgrupo A2, com enquadramento tarifário Azul o valor da tarifa não varia de acordo com o horário, apenas com a demanda contratada. Este modo de operação, portanto, pode permitir uma redução na demanda contratada, gerando economias na fatura elétrica. Todavia, é preciso ressaltar que os critérios de operação necessitam ser afinados, visando atenuar curva de carga dos navios e os picos que ocorrem em períodos fora da ponta. Ressalta-se o caso do mês de agosto, quando praticamente não houve excedente de energia e a bateria permaneceu descarregada (Figura 8).

#### 4.4 Avaliação Financeira e Quantificação das Emissões

O investimento necessário à instalação da estrutura de OPS é de R\$12.801.877,5, já o do custo sistema fotovoltaico foi estimado em R\$8.986.734,6. O investimento associada às baterias e sua instalação totalizou R\$ 46.900.854,00. Considera-se que o investimento para cada um dos cenários (Cenário 1: R\$ 12.801.877,00, Cenário 2: R\$ 21.788.611,00, Cenário 3: R\$ 68.689.465,00 ) foi financiado em 70%, sujeito a uma taxa de juros de 5,5% a.a. e atualização monetária pelo índice IPCA (4,5%), o período de pagamentos e de carência são de 14 e 2 anos, respectivamente. Em todos os casos considera-se que as despesas de operação e manutenção representam 10% do investimento, as quais são contabilizados a partir do primeiro ano de funcionamento. Os demais custos dizem respeito à depreciação dos equipamentos e à fatura de energia elétrica do porto.

A receita bruta é composta pela venda de energia aos navios e pela venda de créditos

Figura 8 – Comportamento da bateria e da demanda dos navios entre os dias 05 a 18 de agosto.



Fonte: Autora

de carbono (Tabela 5). O cálculo da TIR é realizado para o fluxo de caixa livre, ou seja, para a soma simples das entradas positivas (lucro líquido, depreciação dos equipamentos e o montante financiado no ano 0) e negativas (investimento inicial e as parcelas anuais de amortização do financiamento). A Figura 9 a influência do preço de revenda da energia elétrica aos navios na Taxa de Retorno do Investimento. Constatou-se que para uma Taxa Mínima de Atratividade de 7%, os investimentos para o Cenário 1 tornam-se rentáveis para um preço de venda da energia elétrica maior que R\$ 100/MWh, já para o caso com inserção de GD (Cenário 2), este valor passa R\$ 180/MWh. Já para o Cenário 3 apenas a partir de R\$ 670/MWh que o investimento torna-se rentável.

A Tabela 5 apresenta a receita de cada cenário referente aos créditos de carbono, bem como a quantidade de emissões anuais. A linha “Custo”, diz respeito ao prejuízo social e ambiental causado por estes poluentes.

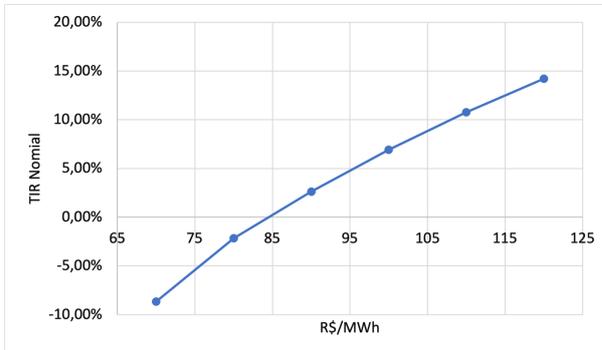
Tabela 5 – Emissões em cada cenário e custo associado (taxa de ocupação de tomadas *reefer* de 30%.)

	Emissões dos Motores dos Navios				Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Quantidade emitida [t/ano]	10 857,76	174,43	37,38	7,12	2 265,2	1 555,7	2 141,9
Custo [R\$/ano]	3 963 082	24 396 642	-	14 438 830	826 808,95	567 830,5	781 793,50
Créditos de carbono [R\$/ano]					3 136 272,38	3 395 251,90	3 181 277,95

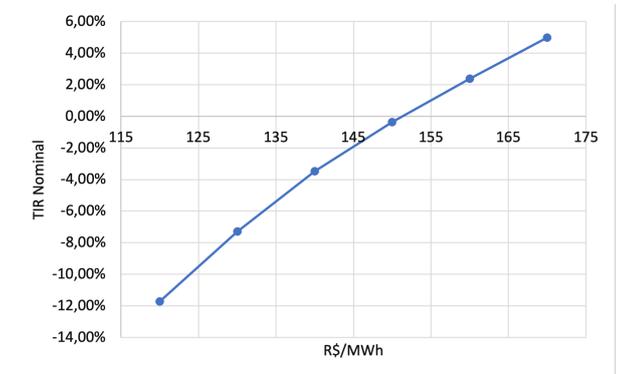
Fonte: Autora.

Figura 9 – Variação da TIR Nominal em função do preço de revenda da energia elétrica aos navios.

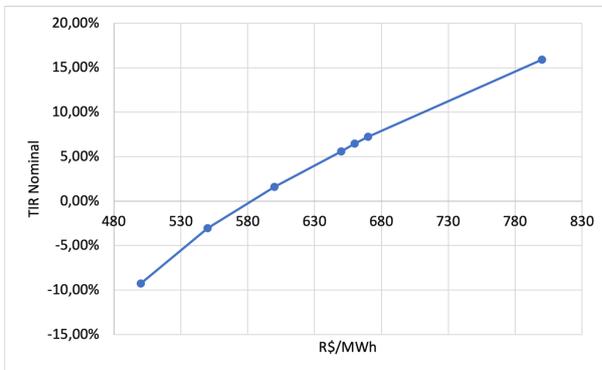
(a) Cenário 1: Caso Base.



(b) Cenário 2: Geração Distribuída.



(c) Cenário 3: Geração Distribuída com armazenamento de energia.



Fonte: Autora.

Percebe-se uma redução de 79% nas emissões de CO<sub>2</sub> apenas adotando o fornecimento de energia elétrica aos navios, quando considerada a inserção do sistema de produção de energia fotovoltaica esta redução passa para 84%. Já com o uso de baterias a redução foi de 80%, esta diferença entre os Cenários 2 e 3 se explica pelo fato de que o excedente que retorna a rede elétrica do porto é contabilizado como uma “emissão negativa”, fato que ocorre com menor frequência no Cenário 3. É pertinente salientar que apenas os créditos de carbono foram considerados uma receita no fluxo de caixa realizado. Todavia, caso os benefícios ambientais e sociais também o fossem, o investimento para os cenários 1 e 2 estaria quitado desde o ano 0, enquanto que para o cenário 3, a partir do segundo ano o balanço passa a ser positivo. Conclui-se que dado o elevado investimento associado às baterias, o Cenário 2 apresenta-se como um bom compromisso entre investimento e redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

## 5 CONCLUSÃO

O transporte marítimo permite realizar o intercâmbio cultural e econômico entre as nações do globo; por isso, cada vez mais atenta-se ao seu impacto ambiental. Com o intuito de reduzir os prejuízos à qualidade do ar nas cidades portuárias, este trabalho analisou

a implementação de uma estrutura de fornecimento de energia elétrica aos navios, sua viabilidade econômica e o potencial de redução nas emissões locais. Um segundo cenário foi considerado, no qual unidades de geração distribuída foram inseridas.

O objetivo inicial do estudo era de obter uma curva de carga anual, referente à demanda de energia dos navios enquanto estão atracados no porto. No caso do Terminal de Contêineres de Paranaguá, a metodologia proposta definiu a demanda elétrica dos navios porta-contêineres a partir da capacidade de tomadas de contêineres refrigerados de cada um deles. A carga elétrica de cada navio foi determinada com base nas características do TCP, tais como o número de tomadas disponíveis no pátio do terminal e o padrão das exportações. Em seguida os principais parâmetros necessários ao dimensionamento da infraestrutura de *cold-ironing* foram definidos para 4 taxas de ocupação das tomadas de *reefer* (30%, 50%, 70%, 30%). Finalmente, optou-se pelo caso em que 30% das tomadas estavam ocupadas ( $P_{max} = 5324,4$  kWh), pois esta situação se assemelha com casos encontrados na literatura e assegurava a viabilidade técnica da estrutura proposta, uma vez que a nova subestação suportará o aumento na demanda. Durante a análise do Cenário 2, verificou-se que o potencial eólico da região é baixo, por isso a estratégia adotada foi a implementação de um sistema fotovoltaico. A energia produzida durante o ano de 2021 foi de 5585,5 MWh, deste montante, 1439,4 MWh foram injetados de volta no sistema elétrico interligado (SIN).

Por fim, este estudo se propôs a contabilizar o efeito do fornecimento de energia elétrica aos navios no balanço de emissões de gases poluentes. Por intermédio desta estimativa, pode-se monetizar os benefícios sociais gerados pela melhoria na qualidade do ar. Além de reduzir em 79%, Cenário 1, e 84%, Cenário 2, as emissões de CO<sub>2</sub>, o sistema também reduziu as emissões locais de gases NO<sub>x</sub> e partículas finas. Provou-se que o investimento (Cenário 1: R\$ 12.801.877,00, Cenário 2: R\$ 21.788.611,00, Cenário 3: R\$ 68.689.465,00), é rentável quando ocorre a venda da energia elétrica para os navios, assim como a venda dos créditos de carbono gerados.

Como foi ressaltado na Seção 2.4, este trabalho é o primeiro a dimensionar detalhadamente um sistema de OPS considerando estratégias de geração distribuída para um porto brasileiro. Além disso, realizou-se uma análise econômica e ambiental, complementando os trabalhos realizados por Maciel (2018), Wang et al. (2019), Ericsson e Fazlagic (2008), Kanellos, Volanis e Hatzargyriou (2017), entre outros. Finalmente, embora este trabalho tenha abordado alguns aspectos que compõem uma micro-rede portuária, como a eletrificação dos navios e o uso de geração distribuída, ainda existem muitas lacunas a serem estudadas. Como por exemplo, a relação entre a demanda elétrica do porto e a dos navios atracados: acredita-se que o carregamento/descarregamento dos contêineres refrigerados possa ser percebido através de uma análise comparativa das duas curvas. Além disso, sugere-se realizar um estudo mais aprofundado do cenário com armazenamento de energia, incluindo estratégias de resposta da demanda e integrando a previsão de produção fotovoltaica com a previsão de demanda dos navios atracados.

## REFERÊNCIAS

- ABDMOULEH, Z. et al. *Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources*. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2017. 266-280 p. Citado na página 10.
- ANEEL. *Biblioteca Virtual*. Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/biblioteca>>. Citado na página 22.
- BAKAR, N. N. A. et al. A review of the conceptualization and operational management of seaport microgrids on the shore and seaside. *Energies*, v. 14, n. 23, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/7941>>. Citado na página 10.
- BAKAR, N. N. A. et al. Optimal configuration and sizing of seaport microgrids including renewable energy and cold ironing—the port of aalborg case study. *Energies*, MDPI, v. 15, 1 2022. ISSN 19961073. Citado 3 vezes nas páginas 10, 14 e 17.
- CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. de. Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano. In: *XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 14.
- COPEL, E. P. de E. *Atlas do Potencial Eólico do Paraná*. [S.l.]: Companhia Paranaense de Energia - Copel, 2007. Citado na página 21.
- CREDCARBONO. *Qual o valor de 1 crédito de carbono (Tonelada de CO<sub>2</sub>) no mercado internacional hoje?* 2022. Disponível em: <<https://credcarbo.com/carbono/qual-o-valor-de-1-credito-de-carbono-tonelada-de-co2-no-mercado-internacional-hoje/>>. Citado na página 22.
- DALSØREN, S. B. et al. *Atmospheric Chemistry and Physics Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships: the contribution from major ship types and ports*. 2009. 2171-2194 p. Disponível em: <[www.atmos-chem-phys.net/9/2171/2009/](http://www.atmos-chem-phys.net/9/2171/2009/)>. Citado na página 10.
- DOVES, S. Alternative maritime power in the port of rotterdam; a feasibility study into the use of shore-side electricity for containerships moored at the euromax terminal in rotterdam. *Port of Rotterdam Authority*, 2006. Citado na página 25.
- DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Techno-economic analysis of grid-connected battery storage. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 91, p. 394–404, 2015. Citado na página 15.
- DUMONT, G. B. *Análise do potencial eólico de um terreno complexo empregando modelagem numérica da camada limite atmosférica via OpenFOAM*. 2019. Monografia (Bacharel em Engenharia de Energia), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, Brasil. Citado na página 15.
- ERICSSON, P.; FAZLAGIC, I. Shore-side power supply. *Department of Energy and Environment*, v. 180, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 9, 12, 13, 17, 20, 24 e 29.
- EUROPEU, P. *DIRECTIVE 2014/94/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 22 octobre 2014 sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs*. 2014. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094&from=PT>>. Citado na página 9.

- GUTIERREZ-ROMERO, J. E.; ESTEVE-PÉREZ, J.; ZAMORA, B. Implementing onshore power supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth. *Applied energy*, Elsevier, v. 255, p. 113883, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 10, 13 e 17.
- IEC/IEEE. Iec/ieee international standard - utility connections in port – part 1: High voltage shore connection (hvsc) systems – general requirements. *IEC/IEEE 80005-1:2019*, p. 1–78, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- INNES, A.; MONIOS, J. Identifying the unique challenges of installing cold ironing at small and medium ports – the case of aberdeen. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier Ltd, v. 62, p. 298–313, 7 2018. ISSN 13619209. Citado 3 vezes nas páginas 10, 16 e 17.
- JUNIOR, A. V. P. et al. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro : Simulações 2013*. [S.l.]: CEPEL, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.
- KANELLOS, F. D.; VOLANIS, E.-S. M.; HATZIARGYRIOU, N. D. Power management method for large ports with multi-agent systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 1259–1268, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 29.
- KINNON, M. M.; RAZEGHI, G.; SAMUELSEN, S. The role of fuel cells in port microgrids to support sustainable goods movement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 147, p. 111226, 2021. Citado na página 13.
- KUMAR, J.; KUMPULAINEN, L.; KAUHANIEMI, K. Technical design aspects of harbour area grid for shore to ship power: State of the art and future solutions. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier Ltd, v. 104, p. 840–852, 1 2019. ISSN 01420615. Citado 3 vezes nas páginas 9, 11 e 13.
- KUMAR, J. et al. Sizing and allocation of battery energy storage systems in Åland islands for large-scale integration of renewables and electric ferry charging stations. *Energies*, v. 13, n. 2, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/317>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- MACIEL, F. C. *Sistema Alternativo de Fornecimento de Energia Elétrica para Navios Mercantes Atracados*. 2018. Monografia (Engenharia Elétrica), UFPR (Universidade Federal do Paraná), Curitiba, Brasil. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 29.
- MAPS, G. *TCP-Terminal de Contêineres de Paranaguá*. [S.l.]: Google Maps, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.
- MCARTHUR, D. P.; OSLAND, L. Ships in a city harbour: An economic valuation of atmospheric emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 21, p. 47–52, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 10, 16 e 22.
- MCTI, M. d. C. T. e. I. *Fatores de Emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Citado na página 22.
- MENEGAT, R. Estimation de l'impact des émissions portuaires sur le centre-ville de bastia. 2017. [Http://www.qualitaircorse.org/admin/files/598/20180226\\_portBastia2017.pdf](http://www.qualitaircorse.org/admin/files/598/20180226_portBastia2017.pdf). Citado na página 9.

- MERK, O. *Reducing shipping greenhouse gas emissions*. OECD, 2018. Disponível em: <<https://www.itf-oecd.org/reducing-shipping-ghg-emissions>>. Citado na página 9.
- MÉVEL, C. et al. Impacto do ângulo de geração solar fotovoltaica no desempenho de uma rede de distribuição. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1. Citado na página 14.
- MONGIRD, K. et al. 2020 grid energy storage technology cost and performance assessment. *Energy*, v. 2020, 2020. Citado na página 22.
- MORENO, H. et al. Nbr 14039: instalações elétricas de media tensão. *Guia do setor elétrico de normas brasileiras NBR 5410-NBR 14039-NBR 5419-NR 10*, 2011. Citado na página 20.
- NABER, G. et al. *Refrigerated Container and CA technology*. 2003. Disponível em: <<https://www.containerhandbuch.de/>>. Citado na página 20.
- NINGBO OSDA SOLAR CO., LTDA. *OSDA ODA465-36V-MH*. [S.l.], 2020. Citado na página 21.
- ORGANIZATION, I. M. Imo 2020 – cutting sulphur oxide emissions. *IMO Website*, 2020. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>. Citado na página 16.
- PAPOUTSOGLU, T. G. *A cold ironing study on modern ports, implementation and benefits thriving for worldwide ports*. Dissertação (B.S. thesis), 2012. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 21.
- PARTNERSHIPS, G. M. E. E. *Shore Power*. 2022. Global Maritime Energy Efficiency Partnerships - Information Portal. Disponível em: <<https://glomeep.imo.org/technology/shore-power/>>. Acesso em: 04 abr 2022. Citado na página 13.
- PENG, Y. et al. A method for determining the allocation strategy of on-shore power supply from a green container terminal perspective. *Ocean and Coastal Management*, Elsevier Ltd, v. 167, p. 158–175, 1 2019. ISSN 09645691. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 17.
- PFENNINGER, S.; STAFFELL, I. Long-term patterns of european pv output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy*, Elsevier, v. 114, p. 1251–1265, 2016. Citado na página 21.
- PORTOS, D. P. *Plano mestre do complexo portuário de Paranaguá e Antonina, 2018*. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- SÁENZ, J. G. Energy analysis and costs estimation of an on-shore power supply system in the port of Gävle. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- SCIBERRAS, E. A.; ZAHAWI, B.; ATKINSON, D. J. Electrical characteristics of cold ironing energy supply for berthed ships. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 39, p. 31–43, 2015. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915000796>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 17.

- SOLARGIS. *Global solar atlas*. World Bank Group, 2021. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/>>. Citado na página 21.
- SONG, T. et al. Integrated port energy system considering integrated demand response and energy interconnection. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier Ltd, v. 117, 5 2020. ISSN 01420615. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 17.
- TCP. *Terminal de Contêineres de Paranaguá*. 2022. Disponível em: <<https://www.tcp.com.br/>>. Citado na página 19.
- TOLEDO, O. M.; FILHO, D. O.; DINIZ, A. S. A. C. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 14, n. 1, p. 506–511, 2010. Citado na página 14.
- TORRES, R. *MATEMÁTICA FINANCEIRA E ENGENHARIA ECONÔMICA: a teoria e a prática*. 2004. Monografia (Licenciatura em Matemática), UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, Brasil. Citado na página 16.
- WANG, H.; MAO, X.; RUTHERFORD, D. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 22.
- WANG, W. et al. A two-stage framework for the optimal design of a hybrid renewable energy system for port application. *Ocean Engineering*, v. 191, p. 106555, 2019. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801819306894>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 15, 17 e 29.

**APÊNDICE A – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES  
CATEGORIAS DE NAVIOS.**

Classe de navio	Características
Porta-contêineres	Navios que realizam o transporte de mercadorias alocadas em contêineres. Existem duas sub-categorias: porta-contêineres alimentadores, que realizam o transporte em distâncias menores, normalmente dentro de um mesmo continente ou país; já os porta-contêineres de alto-mar realizam trajetos intercontinentais, percorrendo, por conseguinte, maiores distâncias.
Ro-Ro	Seu nome deriva do inglês <i>Roll-on Roll-off</i> , o qual faz referência ao sistema de carga e descarga deste navio, por meio de uma rampa. Este tipo de navio realiza sobretudo transporte de veículos.
Graneleiros e Petroleiros	Navios graneleiros realizam o transporte de mercadorias à granel, como cereais, areia ou carvão mineral. Já navios petroleiros transportam combustíveis, como petróleo e outros produtos químicos armazenados em cisternas fixas à sua estrutura. Cabe salientar que o transporte de gás natural liquefeito, é feito por navios especiais que respondem a normas específicas dadas pela natureza do combustível.
Navios de cruzeiro	Navios de transporte de passageiros, normalmente operam em rotas que permitem de voltar ao porto de origem. Possuem forte demanda de energia enquanto estão atracados.

**APÊNDICE B – ÁREA DISPONÍVEL PARA A INSTALAÇÃO DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS.**

Galpão	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	PV unidades
1	9937,43	436,66	4545
2	1907,78	237,38	872
3	771,03	142,92	352
4	458,88	86,61	209
5	442,16	85,08	202
6	317,35	72,61	145
7a	127,26	50,92	58
7b	133,17	47,49	60
7c	66,47	33,21	30
8a	500,63	102,9	229
8b	70,85	39,51	32
8c	69,4	33,42	31
9	587,92	99,45	268
10	305,05	76,53	139
11	394,36	92,16	180
12	100,88	43,47	46
13	127,94	51,45	58
14	151,24	49,91	69
15	537,27	120,49	245
Total (unidades)			7770
Potência Pico (MWp)			3,61305