



Entrega 3: Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí

Abril/2025

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. CONTEXTO DEL PUERTO DE ITAQUI	11
2.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES	11
2.2. SITUACIÓN ACTUAL	15
2.3. MOTIVACIONES	19
3. METODOLOGÍA	20
3.1. ALINEACIÓN AL SBTI	21
3.2. METAS DE DESCARBONIZACIÓN	21
3.3. AÑO-META	22
3.4. PRECIO DEL CARBONO	23
4. SITUACIÓN FUTURA	24
4.1. PROYECCIÓN DE BUQUES Y REMOLCADORES	26
4.2. PROYECCIÓN DE LA EMAP Y TERMINALES	27
4.3. PROYECCIÓN DE CAMIONES Y FERROCARRILES	28
4.4. PROYECCIÓN GLOBAL	29
5. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES	30
5.1. BUQUES	30
5.2. REMOLCADORES	33
5.3. TERMINALES	35
5.4. CAMIONES	40
5.5. FERROCARRILES	42
5.6. ESTUDIO DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO Y ALMACENAMIENTO	43
5.6.1. POTENCIAL SOLAR	43
5.6.2. NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO	47
5.7. HIDRÓGENO REMOVABLE	51
5.8. COMPENSACIÓN	52
6. PLAN DE ACCIÓN	54
6.1. ACCIONES IDENTIFICADAS EMAP	54
6.2. BUQUES	55
6.3. REMOLCADORES	59
6.4. TERMINALES	60
6.5. CAMIONES	62

6.6.	FERROCARRILES	64
6.7.	ESCENARIOS	65
6.7.1.	ESCENARIO CONSERVADOR	66
6.7.2.	ESCENARIO OPTIMISTA	68
6.7.3.	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS	70
6.7.4.	VAN	71
6.8.	COMPENSACIÓN	74
7.	CONSIDERACIONES FINALES	75
	REFERENCIAS	77
	ANEXO I – DETALLE DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS	79
8.	ANEXO II – ESTUDIO DEL POTENCIAL SOLAR, NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO Y PRODUCCIÓN LOCAL DE HIDRÓGENO EN EL PUERTO DE ITAQUÍ	90
1.	INTRODUCCIÓN	90
2.	SUBTAREA 1: POTENCIAL	92
2.1.	METODOLOGÍA	92
2.2.	DENTIFICACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES PARA PANELES FOTOVOLTAICOS	93
2.3.	PLANTEAMIENTO INICIAL: ZONAS INTERNAS	93
2.4.	PLANTEAMIENTO AMPLIADO: ÁREAS EXTERIORES A LA POLIGONAL PORTUARIA	96
2.5.	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	99
2.6.	INVERSIÓN INICIAL	99
2.7.	AHORRO ECONÓMICO ANUAL	100
2.8.	PERIODO DE RETORNO DE INVERSIÓN (ROI)	101
2.9.	COSTES DE MANTENIMIENTO	101
2.10.	PERFILES ANUALES DE GENERACIÓN CON GRANULARIDAD HORARIA	101
3.	SUBTAREA 2: NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO	104
3.1.	EVALUACIÓN DE NECESIDADES DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO	104
3.2.	ESTUDIO TÉCNICO SOBRE EL POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO (ESCENARIOS)	106
4.	SUBTAREFA 3: PRODUÇÃO LOCAL DE HIDROGÊNIO	111
4.1.	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN EL PUERTO	111
4.2.	CAPACIDAD PROPUESTA PARA LA PLANTA DE ELECTRÓLISIS	112
4.3.	TECNOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO	114
4.4.	DIMENSIONAMIENTO ECONÓMICO	115
4.5.	CÁLCULO DEL LCOH – COSTE NIVELADO DEL HIDRÓGENO EN EL PUERTO DE ITAQUÍ	116
4.6.	INTEGRACIÓN CON LA GENERACIÓN RENOVABLE DEL PUERTO	117
5.	CONCLUSIONES	118
6.	REFERÊNCIAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localización del Puerto de Itaquí.	12
Figura 2 - Accesos intermodales en el Puerto de Itaquí.	12
Figura 3 - Conexiones viales y ferroviarias del Puerto de Itaquí con el hinterland.	13
Figura 4 - Ubicación de las subestaciones eléctricas dentro del puerto.....	14
Figura 5 - Distribución del volumen de cargas movilizadas en el Puerto de Itaquí en 2022, por tipo y producto.	15
Figura 6 - Emisiones incluidas en el Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí.	16
Figura 7 - Registro de escalas en 2022, por tipo de carga, muelles de atraque y eslora de las embarcaciones.	16
Figura 8 - Emisiones de los buques en atraque, por tipo de carga y muelle.	17
Figura 9 - Emisiones de la carga transportada por camión.....	18
Figura 10 - Emisiones de la carga transportada por ferrocarril.	18
Figura 11 - Beneficios estratégicos de la descarbonización para la competitividad portuaria.	19
Figura 12 - Metodología adoptada para la elaboración del Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí.	20
Figura 13 - Elementos para la definición de objetivos basados en la ciencia.	21
Figura 14 - Trayectorias de emisiones para el sector marítimo	22
Figura 15 - Definición del año-meta para el Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí.	22
Figura 16 - Estimación futura USD tCO ₂	23
Figura 17 - Previsiones de carga (toneladas)	24
Figura 18 - Ampliación de la infraestructura portuaria del Puerto de Itaquí: previsión de nuevos muelles hasta 2035.	25
Figura 19 - Áreas arrendadas y plan de expansión de Santos Brasil para terminales de combustibles en el Puerto de Itaquí.	26
Figura 20 - Sección de Buques y Remolcadores.....	27
Figura 21 - Proyecciones anuales de emisiones de la EMAP y de los terminales hasta 2050.	28
Figura 22 - Proyecciones anuales de emisiones de camiones y ferrocarriles hasta 2050.	29
Figura 23 - Proyecciones anuales de emisiones del Puerto de Itaquí hasta 2050.	29
Figura 24 - Instalación de sistema OPS en media tensión para buques de crucero, Terminal de Altona, Hamburgo.	31
Figura 25 - Ejemplo de combustible alternativo de baja emisión (amoníaco) (a), y propulsión híbrida con baterías (Ro-Ro, Grimaldi) (b).	31
Figura 26 - Imagen conceptual de la solución BlueBARGE.	32
Figura 27 - Solución Elemanta (Hydrogen power Barge).	32
Figura 28 - Solución Stillstrom.	33
Figura 29 - Grúas móviles eléctricas de muelle.	36
Figura 30 - Carretilla elevadora eléctrica Hyster.....	37
Figura 31 - Reach Stacker eléctrica de Kalmar.....	37
Figura 32 - Pala cargadora eléctrica de Volvo.....	38
Figura 33 - Minirretroexcavadora de hidrógeno de JCB.	38

Figura 34 - Camión eléctrico de Terberg.....	39
Figura 35 - Camión de biometano de Scania.	40
Figura 36 - Programa francés Objectif CO ₂	41
Figura 37 - Iniciativas de descarbonización con GNL	42
Figura 38 - Irradiación considerada para el Puerto de Itaquí.	44
Figura 39 - Área disponible en zonas bajo control.....	45
Figura 40 - Balance energético con almacenamiento (Escenario 1).	49
Figura 41 - Balance energético con almacenamiento (Escenario 2).	51
Figura 42 - Hidrogeneradora del proyecto H2Ports ubicada en el Puerto de Valencia.	52
Figura 43 - Principales acciones sugeridas para la descarbonización del Puerto de Itaquí.	54
Figura 44 - Esquema general de conexión OPS en media tensión.	55
Figura 45 - Esquema simplificado de infraestructura eléctrica para suministro de OPS a los muelles 104, 106 y 108.	56
Figura 46 - Ejemplo de instalación OPS para buques tanque: Proyecto The Green Cable para buques tanque en el Puerto de Gotemburgo.	57
Figura 47 - Comunidad portuaria colaborativa para la descarbonización del puerto.	61
Figura 48 - Mapa de la Hinterland del Puerto de Itaquí.	63
Figura 49 - Camión a GNL de Virtu GNL en operación en el Puerto de Itaquí.	63
Figura 50 - Mapa de electrificación de ferrocarriles en Brasil.	64
Figura 51 - Locomotivas híbridas ZTR.	65
Figura 52 - Emisiones evitadas por medida en el escenario conservador.	67
Figura 53 - Inversiones previstas por medida en el escenario conservador.	67
Figura 54 - Emisiones anuales del Puerto de Itaquí en el escenario conservador.	68
Figura 55 - Emisiones evitadas por medida en el escenario optimista.	68
Figura 56 - Inversiones previstas por medida en el escenario optimista.	69
Figura 57 - Emisiones anuales del Puerto de Itaquí en el escenario optimista.	69
Figura 58 - Emisiones del Puerto de Itaquí hasta 2050 según el escenario.	70
Figura 59 - Emisiones específicas del Puerto de Itaquí hasta 2050 según el escenario.	71
Figura 60 - VAN Conservador.	73
Figura 61 - VAN Optimista.....	74
Figura 62 - Irradiación considerada para el Puerto de Itaquí.	93
Figura 63 - Áreas disponibles para la instalación de paneles fotovoltaicos en zonas controladas por EMAP.	94
Figura 64 - Panel de media tensión de la EMAP [6]	97
Figura 65 - Producción e irradiación solar mensual calculadas por el software PVGIS	102
Figura 66 - Perfil horario de generación diario (enero).	103
Figura 67 - Perfil horario de generación semanal (agosto).....	103
Figura 68 - Generación horaria anual año de referencia.	103
Figura 69 - Balance energético con almacenamiento Caso 1	109
Figura 70 - Balance energético con almacenamiento. Caso 2.	111
Figura 71 - Atmospheric Alkaline Electrolyser Nel Hydrogen	113
Figura 72 - 1MW ITM PEM electrolyser	113
Figura 73 - HRS del Puerto de Valencia.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Resultados de la huella de carbono del Puerto de Itaquí en 2022.	15
Tabla 2 - Características técnicas de las instalaciones propuestas.	47
Tabla 3 - Parámetros Técnicos de la Producción de Hidrógeno.	52
Tabla 4 - Papeles de una autoridad portuaria en la compensación de emisiones.	53
Tabla 5 - Datos de los buques de granel líquido que hicieron escala en los muelles 104, 106 y 108 en el año 2022.	55
Tabla 6 - Lista de acciones para buques.....	57
Tabla 7 - Acción propuesta para buques en el área de fondeo.	58
Tabla 8 - Estimación de Maniobras/Remolcador.	60
Tabla 9 - Estimación de Consumo con Remolcadores Eléctricos.	60
Tabla 10 - Acciones Propuestas para la Descarbonización del Sector	60
Tabla 11 - Acciones propuestas para operadores portuarios.	62
Tabla 12 - Acciones propuestas para la descarbonización del transporte terrestre asociado al Puerto de Itaquí	64
Tabla 13 - Acción propuesta para la descarbonización de las operaciones ferroviarias en el Puerto de Itaquí.	65
Tabla 14 - Medidas de descarbonización propuestas para el Puerto de Itaquí con sus escenarios.....	66
Tabla 15 - Reducción de emisiones del Puerto de Itaquí por escenario.....	70
Tabla 16 - VAN Positivo.	71
Tabla 17 - Superficies identificadas en terreno EMAP.....	94
Tabla 18 - Superficies necesarias para la generación fotovoltaica.	98
Tabla 19 - Características técnicas de las instalaciones planteadas	98
Tabla 20 - Componentes del coste de la electricidad estimables para el Puerto de Itaquí.....	99
Tabla 21 - Coste por tipo de instalación.....	100
Tabla 22 - Parámetros de entrada a PVGIS	102
Tabla 23 - Parámetros técnico-económicos de la optimización de la capacidad de almacenamiento. Caso 1.....	108
Tabla 24 - Parámetros técnico-económicos de la optimización de la capacidad de almacenamiento. Caso 2.....	110
Tabla 25 - Estimación de costos por bloque funcional para el sistema de hidrógeno verde.	116

LISTA DE TÉRMINOS

SIGLA	DESCRIPCIÓN
BaU	Tendencial, o Sin Acciones de Mitigación (Business as Usual)
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
Bio-GNL	Biogás Natural Licuado (Liquefied Natural Gas)
BlueBARGE	Unidad flotante de suministro de energía (Energy Barge Solution)
BT	Baja Tensión
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Equivalente de Dióxido de Carbono
Drop-in	Combustible alternativo compatible con motores existentes
EIA/RIMA	Estudio de Impacto Ambiental / Informe de Impacto Ambiental
EMAP	Empresa Maranense de Administración Portuaria
Fuel Cells	Celdas de combustible
GEE	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GNC	Gas Natural Comprimido
H ₂	Hidrógeno
H ₂ PORTS	Proyecto de uso de hidrógeno en los puertos
HVO	Aceite Vegetal Hidrotratado (Hydrotreated Vegetable Oil)
Hz	Unidad de frecuencia (Hertz)
IFC	Corporación Financiera Internacional (Banco Mundial) (International Finance Corporation (World Bank Group))
IMO	Organización Marítima Internacional (International Maritime Organization)
ISP	Índice de Sostenibilidad Portuaria
kg	Kilogramo
kgCO ₂ /t	Kilogramo de CO ₂ por tonelada transportada
kVA	Kilovolt-Amperio (potencia aparente)
kW	Kilovatio (potencia activa)
kWh	Kilovatio-hora (energía eléctrica consumida)
kWp	Kilovatio-pico (potencia solar instalada)
k€	Mil Euros
M€	Millón de Euros
MW	Megavatio
MWh	Megavatio-hora
MVA	Megavolt-Amperio (potencia eléctrica aparente)
m ²	Metro cuadrado
OPS	Suministro de Energía en Tierra (Onshore Power Supply)

SIGLA	DESCRIPCIÓN
RTG	Pórtico sobre Neumáticos (Rubber-Tired Gantry)
SBTi	Iniciativa de Metas Basadas en la Ciencia (Science Based Targets initiative)
SCC	Costo Social del Carbono (Social Cost of Carbon)
Stillstrom	Solución flotante para suministro de energía a buques anclados
TGL	Terminal de Graneles de Maranhão
TEQUIMAR	Terminal Químico de Aratu
tCO ₂ eq	Tonelada de Equivalente de Dióxido de Carbono
US\$	Dólares Americanos
V	Voltio
VPL	Valor Presente Neto
VTMIS	Sistema de Gestión del Tráfico Marítimo (Vessel Traffic Management Information System)
W	Watt
°C	Grados Celsius

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento presenta el Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí, una ruta estratégica elaborada para reducir progresivamente las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a sus actividades. El plan está inserto en el contexto del compromiso global de enfrentamiento de los cambios climáticos y está alineado con iniciativas internacionales, proponiendo acciones concretas para la descarbonización del Puerto de Itaquí hasta 2050.

El Plan de Descarbonización tiene como base el cálculo de la huella de carbono realizado para el Puerto de Itaquí, con año base 2022. Para ello, se analizó el contexto específico del puerto actual y futuro, considerando las características operacionales, expansiones previstas y las tendencias de transición energética en el sector portuario. La metodología adoptada combina un enfoque técnico con un proceso participativo, contando con la colaboración directa de la EMAP. El plan fue construido con base en análisis cuantitativos que permiten estimar el impacto de diversas medidas en la reducción de emisiones, apoyadas por modelos específicos y en datos de tráfico portuario actuales y proyectados.

Esa información, junto con la definición del año-meta del plan y el precio estimado del carbono, permitió la evaluación de escenarios futuros para el Puerto de Itaquí, con el objetivo de orientar la toma de decisiones hacia una transición energética realista y eficaz.

El Plan establece metas de descarbonización con base en el perfil actual y proyectado de emisiones, y presenta un análisis detallado de las tecnologías disponibles para los diferentes modos y actores del ecosistema portuario: embarcaciones, remolcadores, terminales portuarios, camiones, ferrocarriles, además de soluciones energéticas como generación fotovoltaica e hidrógeno renovable. A partir de esa base, se propone un plan de acción estructurado, con medidas específicas para cada actor involucrado, presentando su respectivo potencial de reducción de emisiones y el costo estimado de implementación. Se analizan dos escenarios de implementación — conservador y optimista— que permiten evaluar diferentes trayectorias de descarbonización conforme al grado de adopción de las medidas propuestas. La comparación entre los dos escenarios demuestra que es posible alcanzar una reducción significativa de las emisiones, llegando a solo 12 kt o incluso 9 kt de CO₂eq emitidos en 2050, dependiendo del nivel de ambición adoptado.

Por último, el documento incluye estimaciones de costos asociados a la compensación de las emisiones residuales que no puedan ser eliminadas, dadas las actividades portuarias, así como un análisis económico general del plan.

1. Introducción

El cambio climático es uno de los principales desafíos del siglo XXI. De acuerdo con los registros climáticos, cada una de las últimas cuatro décadas ha sido progresivamente más cálida que cualquier década anterior desde 1850. El calentamiento global causado por la actividad humana es innegable, y cada tonelada de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) contribuye a este fenómeno, provocando cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, los océanos, la criosfera y la biosfera.

A escala global, los esfuerzos por la descarbonización se han intensificado en respuesta a la creciente urgencia de mitigar los impactos del cambio climático. Acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París, establecieron metas claras para alcanzar el pico global de emisiones de GEI lo antes posible, con reducciones rápidas basadas en las mejores evidencias científicas disponibles. En Brasil, las políticas de cambio climático han incentivado la transición hacia fuentes energéticas renovables, la electrificación de sectores estratégicos y la descarbonización de la logística y del transporte. En particular, el país busca fortalecer iniciativas en los puertos, promoviendo prácticas más sostenibles para reducir las emisiones asociadas a las operaciones marítimas y terrestres.

Los puertos son infraestructuras esenciales para el comercio global, viabilizando el transporte de mercancías. Sin embargo, sus actividades también generan una cantidad significativa de emisiones de GEI. Las operaciones de carga y descarga, el transporte terrestre, la navegación y el uso de equipos y maquinarias en el entorno portuario, junto con la propia infraestructura y la creciente demanda de servicios logísticos, aún dependen en gran medida de los combustibles fósiles, contribuyendo de forma relevante al cambio climático y elevando la huella de carbono del sector.

En ese contexto, calcular la huella de carbono de un puerto es el primer paso para identificar y cuantificar las fuentes de emisiones de GEI asociadas a sus operaciones. Este levantamiento permite que la autoridad portuaria comprenda el alcance de su impacto ambiental y establezca estrategias específicas para reducirlo. Con base en esa información, la implementación de planes de descarbonización se convierte en una herramienta fundamental para promover la transición hacia un modelo operacional más sostenible.

Al reducir las emisiones de GEI y optimizar el uso de los recursos, los puertos contribuyen efectivamente al enfrentamiento de la crisis climática, al mismo tiempo que aumentan su eficiencia operacional y competitividad en el mercado global.

Este informe parte del cálculo de la huella de carbono del Puerto de Itaqui, realizado con año base 2022, y define un plan de descarbonización con el objetivo de promover una transición hacia operaciones más sostenibles, alineadas con los compromisos globales de reducción de emisiones y con la mejora de la eficiencia portuaria.

2. Contexto del Puerto de Itaqui

2.1. Localización y características generales

El Puerto de Itaqui está ubicado en São Luís, Maranhão, Brasil, y es uno de los principales puertos del país para la movimentación de graneles sólidos y líquidos. Su posición estratégica en la costa atlántica facilita la conexión con mercados nacionales e internacionales, convirtiéndose en un hub logístico esencial para el agronegocio, la minería y los combustibles.

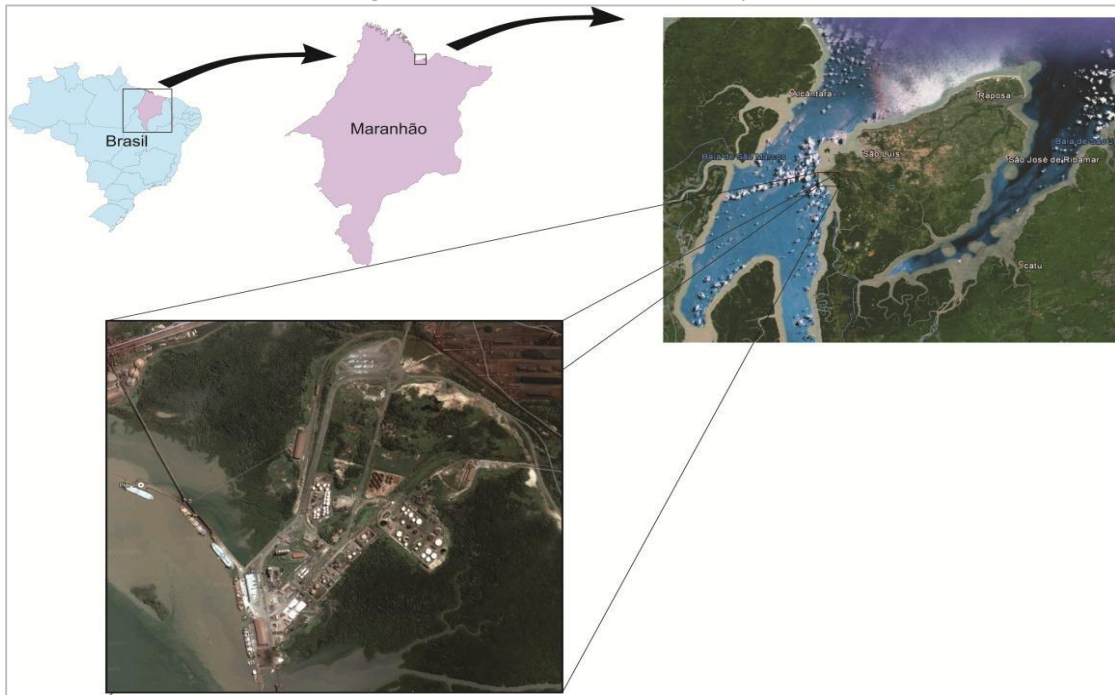
1. Muelles y Terminales

El puerto cuenta con nueve atracaderos operacionales, diseñados para la movimentación de diversos tipos de carga, incluyendo:

- Granel Sólido Vegetal (grano de soja, maíz y harina de soja, trigo, arroz);
- Granel Sólido Mineral (fertilizantes, arrabio, carbón mineral, escoria, clínker y caliza, concentrado de cobre);
- Granel Líquido – combustibles y químicos (derivados del petróleo – combustible y GLP);
- Carga general (celulosa).

Su infraestructura moderna permite el atraque de **embarcaciones de gran porte**, optimizando las operaciones portuarias y garantizando alta eficiencia logística.

Figura 1 - Localización del Puerto de Itaqui.



Fuente: EMAP.

2. Accesos y Conectividad

El Puerto de Itaqui cuenta con accesos intermodales que garantizan un transporte eficiente e integrado:

- **Ferrocarril:** conectado al Ferrocarril Norte-Sur, lo que permite el transporte de la producción agrícola y mineral desde el interior de Brasil.
- **Carretera:** interconectado con las principales carreteras federales, facilitando el transporte terrestre de cargas.
- **Marítimo:** canal de acceso con profundidad adecuada para la recepción de buques de gran calado.

Figura 2 - Accesos intermodales en el Puerto de Itaqui.



Fuente: EMAP

3. Conexión con el Hinterland

El Puerto de Itaquí está conectado con su hinterland a través de las carreteras BR-135 y BR-222, además de las vías ferroviarias.

- **Camiones:** con acceso al puerto por la Av. dos Portugueses o por la Av. Ing. Emiliano Macieira, los camiones se dirigen a los terminales Tegram, VLI, Ultracargo, Eneva, Moinhos, DATA, COPI, Pedreiras y Transpetro.
- **Ferrocarriles:** con un ramal de entrada y otro de salida, los trenes atienden a los terminales VALE, Tegram, Granel Química Ltda., Petrobras, Ultracargo e Itacel.

Figura 3 - Conexiones viales y ferroviarias del Puerto de Itaquí con el hinterland.



Fuente: EMAP

La red eléctrica de media tensión (13.800 V) que abastece al Puerto de Itaquí es propiedad de la Concesionaria de Energía local (Equatorial Energia) hasta el límite de propiedad de la Autoridad Portuaria. A partir de ese punto, la red continúa subterránea hasta la subestación receptora, siendo esa sección de propiedad de la Autoridad Portuaria. La demanda contratada del área portuaria (área primaria del puerto) con la concesionaria es de 400 kW.

Los muelles son alimentados con red de Baja Tensión (BT). Existe una red de media tensión hasta las subestaciones existentes: la SE receptora, ubicada cerca del castillo de agua; la SE-01 (electrocentro), en las proximidades de los muelles 101/102; la SE-02 (electrocentro), en las proximidades del muelle 103/104; y la SE-03, en las proximidades del Muelle 105. El valor de la tensión de la red es de **13.800 V**.

Potencias Nominales:

- **Subestación Receptora:** 500 kVA
- **Subestación 01:** 500 kVA (iluminación y fuerza) / 300 kVA (sistema de combate contra incendios)

- **Subestación 02:** 500 kVA
- **Subestación 03:** 500 kVA (iluminación y fuerza) / 300 kVA (sistema de combate contra incendios).

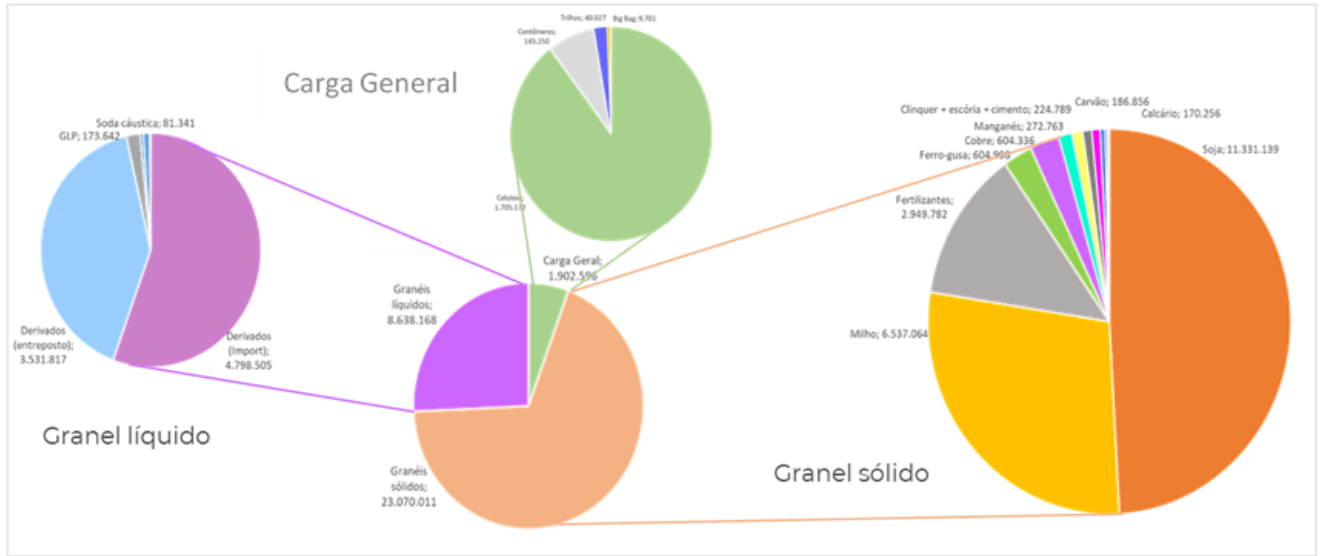
Figura 4 - Ubicación de las subestaciones eléctricas dentro del puerto.



Fuente: EMAP.

En 2022, se movilizaron en el puerto cerca de 34 millones de toneladas, siendo el principal tipo de carga el granel sólido (69%), seguido por el granel líquido (26%) y la carga general (5%). El tráfico de granel sólido está dominado por soja (33% de todo el tráfico del puerto), maíz (20%) y fertilizantes (9%). La principal mercancía de granel líquido son los derivados del petróleo para importación (14%), seguidos por hidrocarburos para trasbordo (10%). El tráfico de celulosa representa el 5% del total movilizado en el puerto.

Figura 5 - Distribución del volumen de cargas movilizadas en el Puerto de Itaqui en 2022, por tipo y producto.



Fuente: Fundación Valenciaport.

2.2. Situación actual

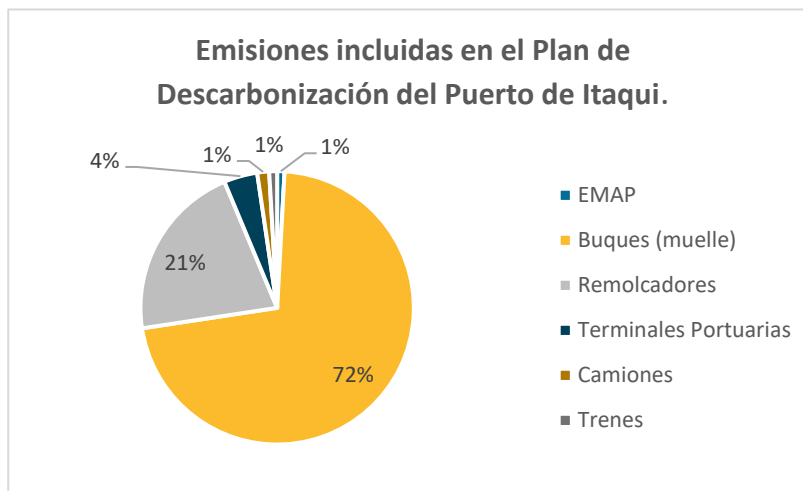
En el Puerto de Itaqui se emitieron 189 ktCO₂ en 2022, de las cuales 82 ktCO₂ se atribuyen a la actividad portuaria propiamente dicha, incluyendo la permanencia de los buques atracados (en muelle), mientras que 107 ktCO₂ corresponden exclusivamente a las operaciones de navegación, fondeo y maniobras de las embarcaciones. En términos relativos, la actividad portuaria presenta una intensidad de emisión de 5,63 kgCO₂ por tonelada de carga movilizada.

Tabla 1 - Resultados de la huella de carbono del Puerto de Itaqui en 2022.

Alcance	Área	Emisiones (tCO ₂ eq)
Alcance 1	Fuentes fijas	67,33
	Fuentes móviles	96,94
	Gases refrigerantes	437,05
	Extintores	0,22
	Total	601,54
Alcance 2	Electricidad en las instalaciones EMAP	110,83
	Total	110,83
Alcance 3	Buques (navegación)	5.948,91
	Buques (maniobra)	5.529,55
	Buques (fondeo)	95.790,91
	Buques (muelle)	58.789,68
	Remolcadores	17.289,50
	Terminales	3.243,92
	Camiones	1.156,57
	Trenes	763,98
Total		188.513,02
Total del Puerto		189.225,39
Total del Puerto (buques solo muelle)		81.956,01

Fuente: Fundación Valenciaport.

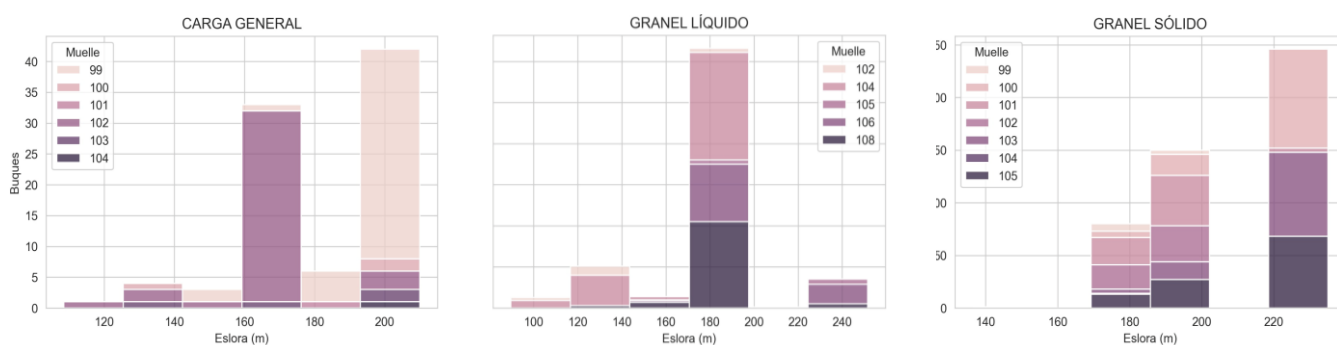
Figura 6 - Emisiones incluidas en el Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí.



Fuente: Fundación Valenciaport.

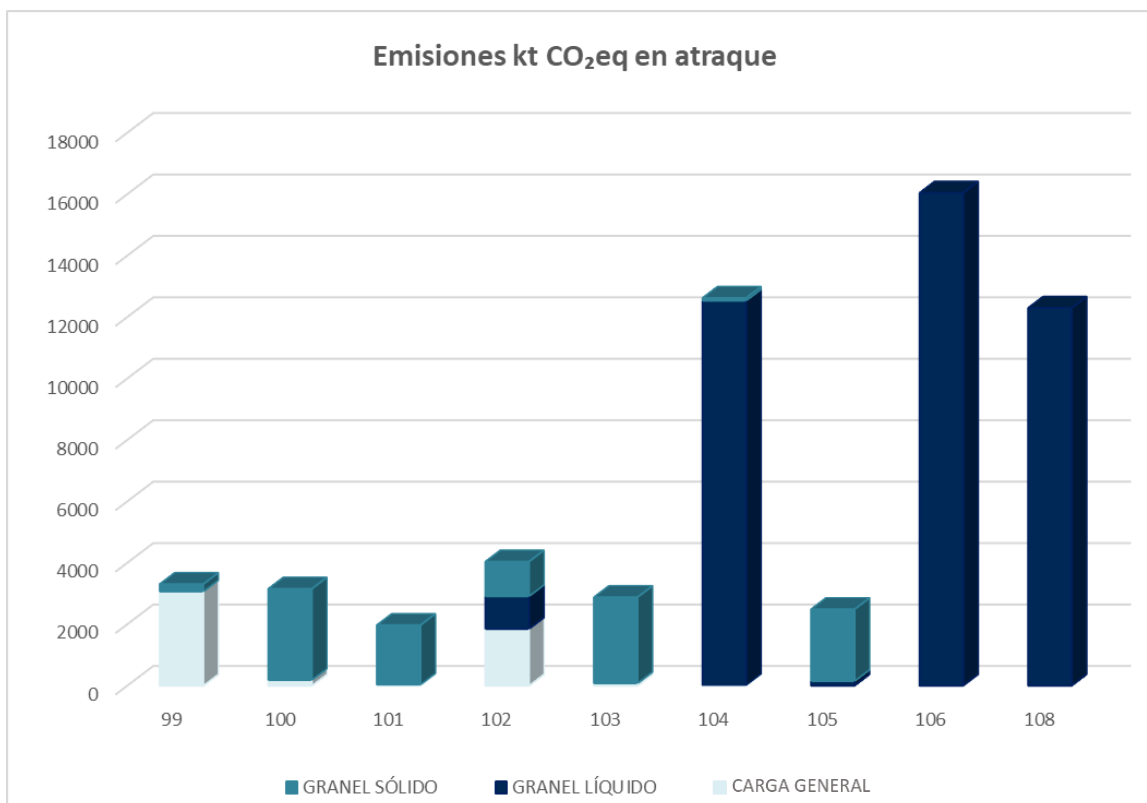
Las mayores emisiones de CO₂ durante el atraque provienen de los buques de granel líquido, que están asignados a los muelles 104, 106 y 108. El mayor número de escalas corresponde al granel sólido, distribuido principalmente en tres rangos de tamaño. En el caso del granel líquido, la mayor parte de los buques se concentra en torno a un único porte. El mayor número de escalas de carga general se refiere a la celulosa, en un rango de tamaño específico, en el muelle 99.

Figura 7 - Registro de escalas en 2022, por tipo de carga, muelles de atraque y eslora de las embarcaciones.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Figura 8 - Emisiones de los buques en atraque, por tipo de carga y muelle.



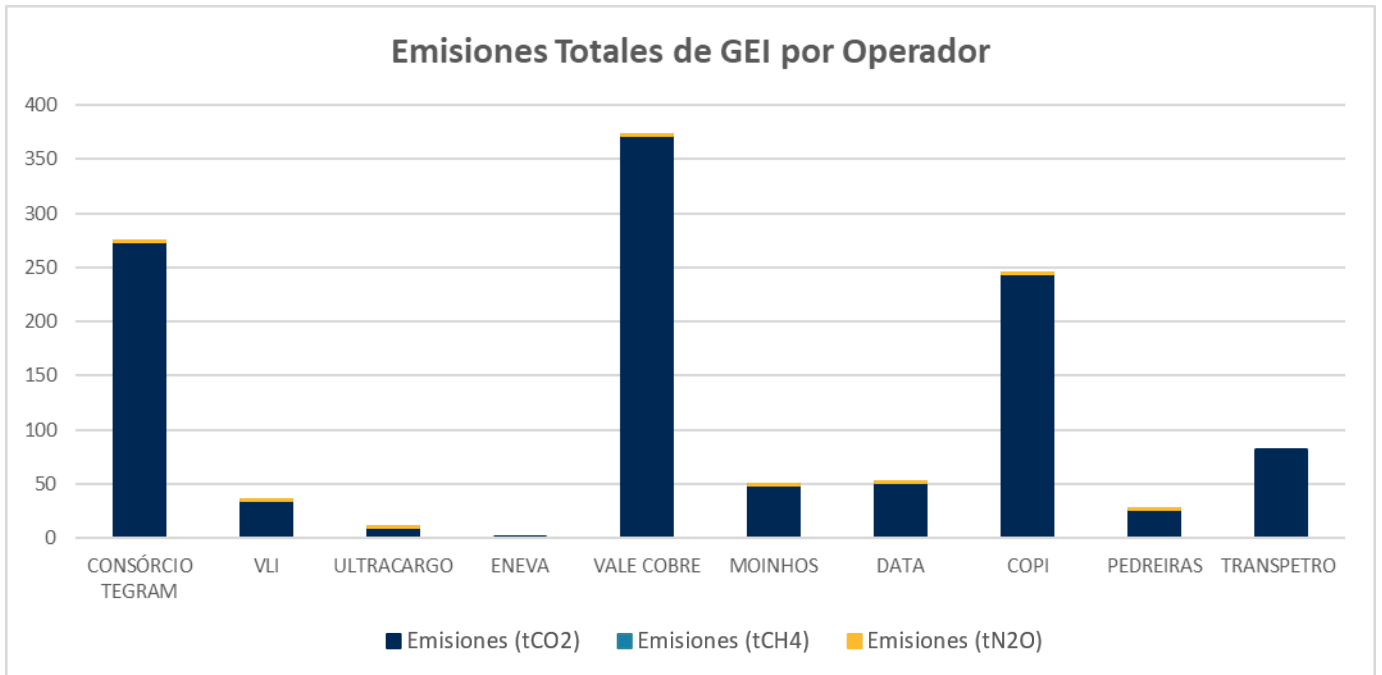
Fuente: Fundación Valenciaport.

En lo que se refiere a la entrada y salida de mercancías por vía terrestre en el Puerto de Itaquí, el modo de transporte utilizado está directamente relacionado con el tipo de carga. La celulosa es predominantemente recibida por ferrocarril, mientras que los graneles sólidos minerales y los graneles líquidos son, en su mayoría, transportados por camiones. El granel sólido vegetal, principal carga movilizada en el puerto, presenta una distribución modal estimada del 60% por carretera y 40% por ferrocarril.

Las operaciones por carretera se concentran, sobre todo, en la Terminal de Granos de Maranhão (TEGRAM) y en el área primaria del puerto. En el modo ferroviario, se destacan también las operaciones en el TEGRAM y en las actividades de recepción de celulosa.

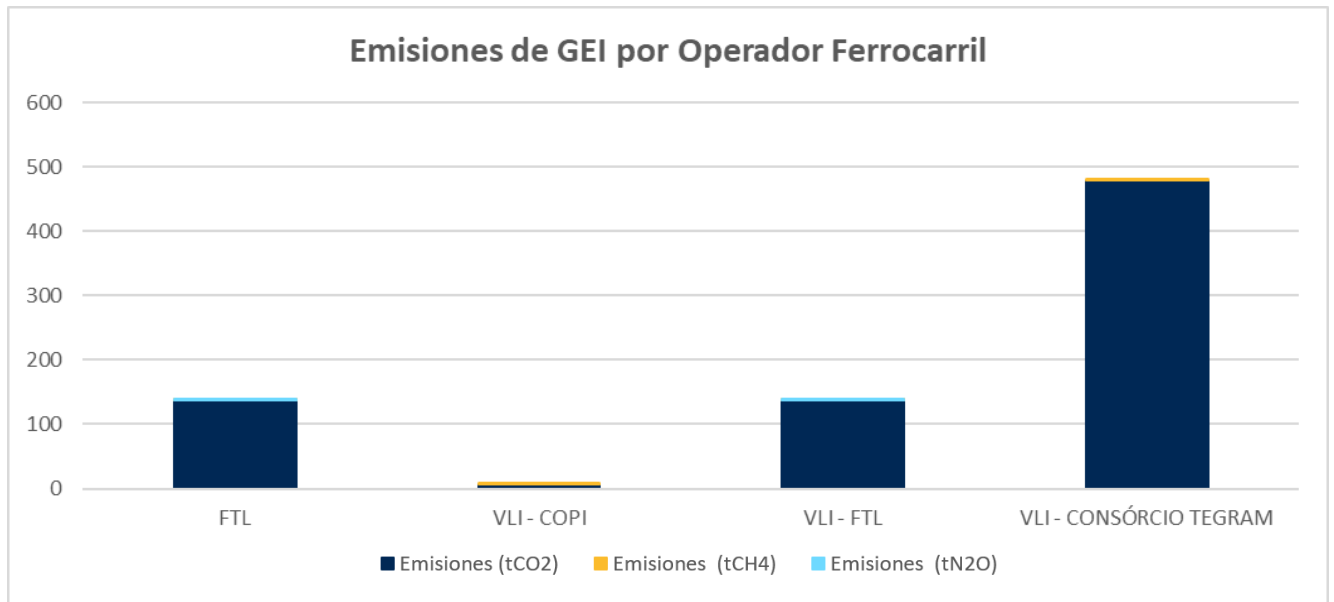
Adicionalmente, merece destacarse la utilización del sistema de oleoductos, que conecta muelles especializados — como los muelles 104, 106 y 108 — a instalaciones de almacenamiento y unidades de procesamiento. Los oleoductos son ampliamente empleados en la movimentación de graneles líquidos, ofreciendo una solución logística segura, eficiente y con menor impacto ambiental. Este modo contribuye significativamente a la optimización operacional, permitiendo transferencias continuas y automatizadas, además de reducir el tiempo de operación y los riesgos asociados al transporte por camiones.

Figura 9 - Emisiones de la carga transportada por camión.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Figura 10 - Emisiones de la carga transportada por ferrocarril.



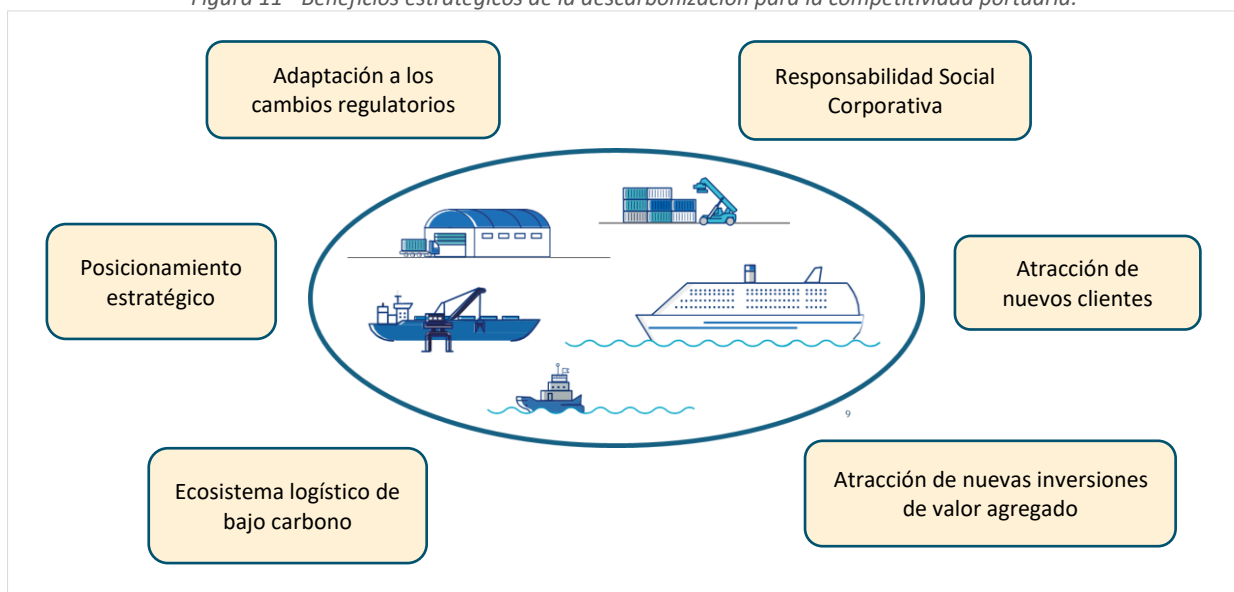
Fuente: Fundación Valenciaport.

2.3. Motivaciones

Aunque los resultados del proceso de descarbonización de un puerto tengan un impacto positivo en la sociedad y, por lo tanto, estén alineados con la estrategia de responsabilidad social corporativa de la autoridad portuaria, los principales beneficios son la preparación y el posicionamiento y, por lo tanto, están directamente relacionados con la competitividad del puerto a escala global.

La implementación de prácticas de bajo carbono fortalece la capacidad del puerto para cumplir con las exigencias regulatorias internacionales, amplía su acceso a mercados más exigentes y lo hace más atractivo para nuevos clientes e inversores comprometidos con criterios de sostenibilidad. Además, consolida el papel estratégico del puerto como plataforma logística de referencia en excelencia ambiental, integrando innovación tecnológica, eficiencia operacional y responsabilidad socioambiental como diferenciales competitivos.

Figura 11 - Beneficios estratégicos de la descarbonización para la competitividad portuaria.



Fuente: Fundación Valenciaport.

3. Metodología

La metodología utilizada para la elaboración del plan de descarbonización se basa en un enfoque técnico y participativo, que combina análisis cuantitativos con la colaboración directa de la EMAP.

En primer lugar, se desarrollan modelos específicos para cuantificar el impacto potencial en la reducción de las emisiones de CO₂ resultante de la implementación de diferentes tecnologías u otras medidas de mitigación. Estos modelos permiten simular, con base en datos reales y proyecciones, cómo cada acción puede contribuir a la descarbonización del puerto a lo largo del tiempo. Para cada medida considerada, también se estima un presupuesto preliminar, lo que posibilita evaluar su viabilidad técnica y económica. Estas dos herramientas — estimación de reducción de emisiones y costo aproximado — se integran con previsiones de crecimiento del tráfico y operan dentro del contexto local del puerto, considerando particularidades como los patrones operacionales actuales y las previsiones de crecimiento. Con ello, es posible construir escenarios futuros realistas y consistentes.

La definición final de las acciones a ser incluidas en el plan se realiza de forma colaborativa con la EMAP, garantizando la alineación con las estrategias institucionales, los objetivos de sostenibilidad del puerto y las posibilidades reales de implementación.

Figura 12 - Metodología adoptada para la elaboración del Plan de Descarbonización del Puerto de Itaqi.



Fuente: Fundación Valenciaport.

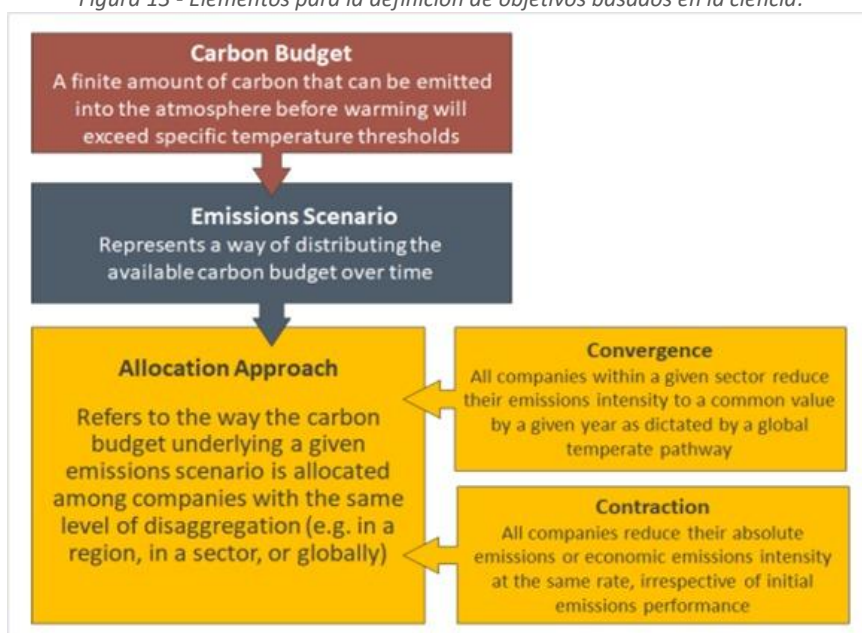
3.1. Alineación al SBTi

Los objetivos basados en la ciencia (SBTi) exigen que la meta esté alineada con un aumento de la temperatura global inferior a 2 °C, con esfuerzos para no superar 1,5 °C. Para definir objetivos concretos, la iniciativa requiere tres elementos:

- Definir un presupuesto de carbono específico,
- Desarrollar escenarios, y
- Aplicar un enfoque de asignación.

La metodología propuesta en este trabajo proporciona herramientas (escenarios) para alcanzar ese objetivo, aunque se considera que, en la selección de acciones concretas, prevalecer un objetivo realista es más importante que simplemente alcanzar el presupuesto de CO₂ definido por el SBTi.

Figura 13 - Elementos para la definición de objetivos basados en la ciencia.



Fuente: SBTi.

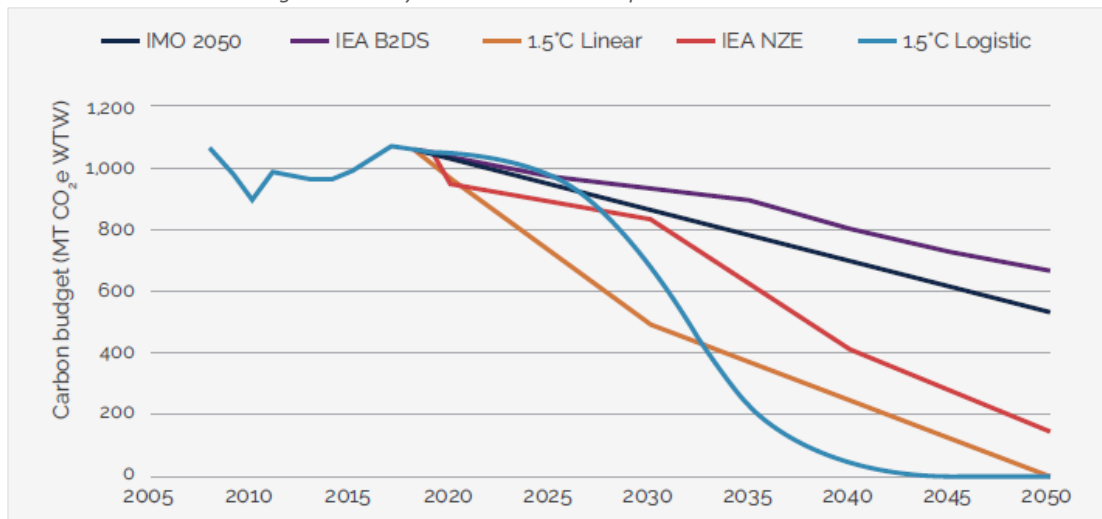
3.2. Metas de Descarbonización

El objetivo inicial de descarbonización es el establecido por la metodología SBTi.

En el caso del Puerto de Itaquí, considerando que más del 93% de las emisiones provienen de fuentes marítimas (buques de carga y remolcadores), se utilizó la guía Science Based Target Setting for the Maritime Sector, que indica que la reducción hasta 2040 debe alcanzar el 96%.

En caso de adoptarse la estrategia de la OMI, la reducción prevista sería del 70% hasta 2040. De todos modos, el plan definido debe ser realista y aplicable.

Figura 14 - Trayectorias de emisiones para el sector marítimo

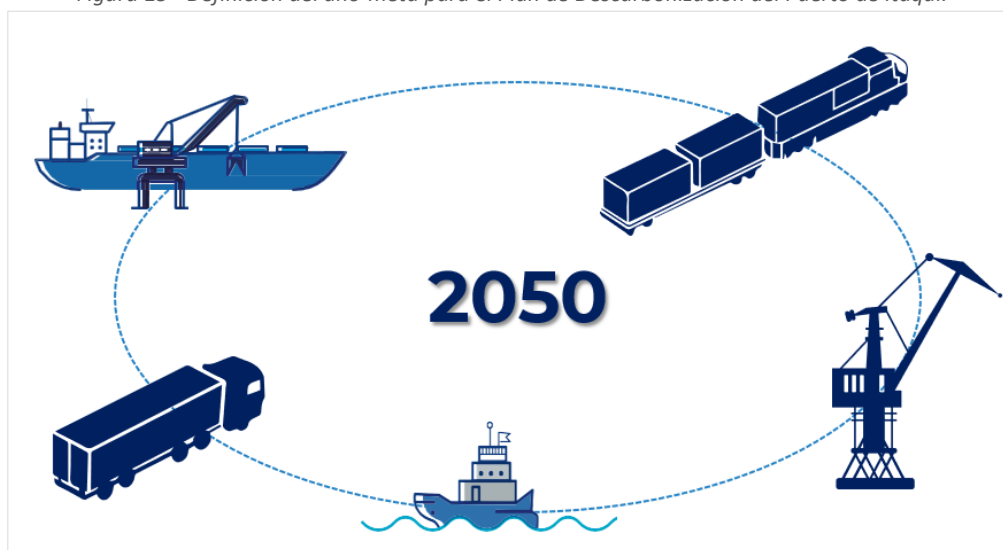


Fuente: Science Based Targets initiative.

3.3. Año-meta

Considerando que las principales fuentes de emisiones son las embarcaciones de carga y de servicio, es aconsejable tener un año-meta para la descarbonización de acuerdo con la estrategia de la OMI, es decir, 2050. El alcance de la acción incluye el mismo alcance de la huella media, es decir: buques atracados, remolcadores, arrendatarios, concesionarias y operadores, transporte terrestre por camión y tren. En el caso de los buques, se considera únicamente la fase de atraque, pues es la única en la cual la EMAP puede realizar intervenciones.

Figura 15 - Definición del año-meta para el Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí.

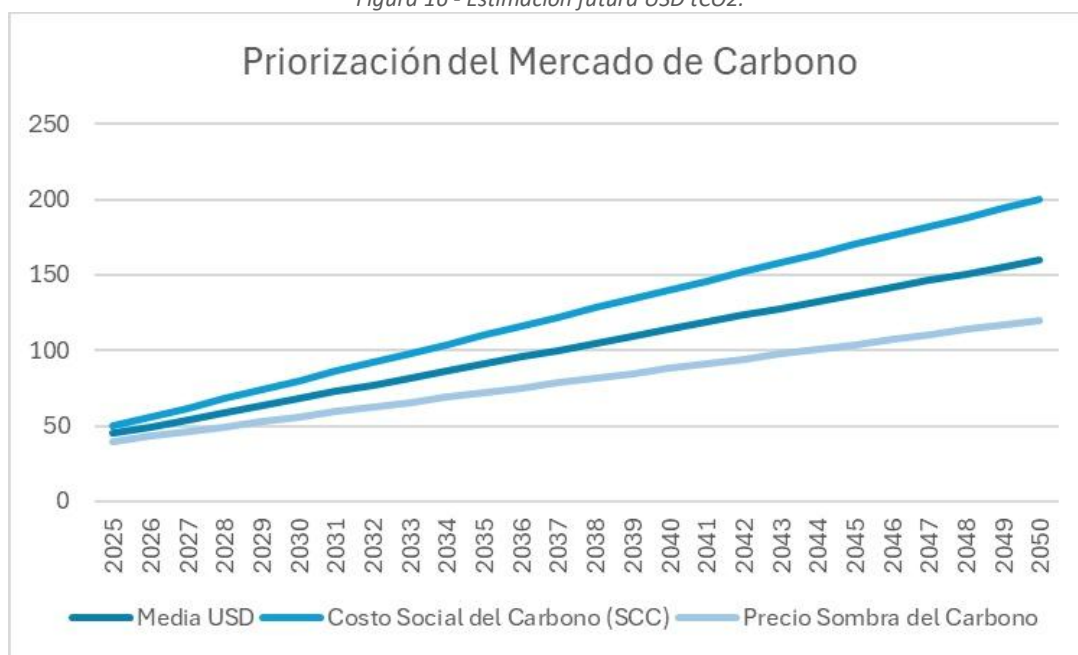


Fuente: Fundación Valenciaport.

3.4. Precio del carbono

Para los análisis de beneficio económico y evaluación de la inversión, se consideró el promedio entre los valores futuros esperados para el Costo Social del Carbono y el Precio Sombra del Carbono.

Figura 16 - Estimación futura USD tCO₂.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Costo Social del Carbono (SCC - Social Cost of Carbon)

- Representa el impacto económico y ambiental real de emitir una tonelada de CO₂.

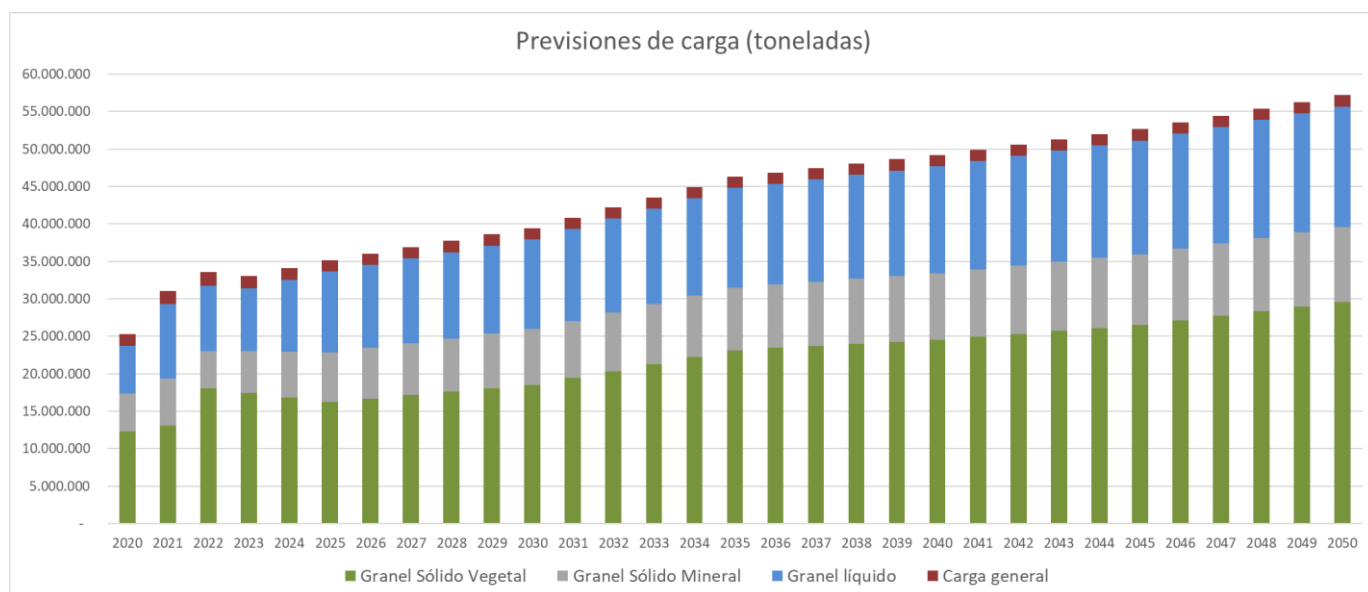
Precio Sombra del Carbono (Carbon Shadow Price)

- Utilizado por organismos multilaterales (BID, Banco Mundial, IFC) y grandes empresas para simular escenarios regulatorios futuros.

4. Situación futura

En el año 2050, se estima que la demanda para el Puerto de Itaquí alcance un volumen de 57,2 millones de toneladas en el escenario tendencial. La naturaleza de la carga de granel sólido vegetal corresponderá al principal volumen movilizado con 29,6 millones de toneladas, 16,1 millones de toneladas corresponderán a granel líquido; 10 millones de toneladas a granel sólido mineral y 1,5 millones de toneladas a carga general.

Figura 17 - Previsiones de carga (toneladas)



Fuente: Fundación Valenciaport.

El Muelle-98 estará listo hasta finales de 2026. Los Muelles 97 y 96 ya tienen demanda y serán viables en, como máximo, 5 años. Los Muelles 95 y 94 están previstos para un plazo máximo de 10 años.

En los próximos 10 años, se construirán cinco nuevos muelles que, junto con los nueve ya existentes, totalizarán 14 muelles. El detalle sobre la planificación portuaria y los estudios ambientales asociados está descrito en la versión completa del EIA/RIMA, disponible en el sitio web oficial del puerto.

Figura 18 - Ampliación de la infraestructura portuaria del Puerto de Itaqui: previsión de nuevos muelles hasta 2035.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Un nuevo terminal operado por Santos Brasil, empresa especializada en operaciones portuarias y logística, está en operación en el Puerto de Itaqui desde finales de 2022. La empresa inició su plan de expansión para los terminales de combustibles TGL 1 y TGL 3 en el puerto público de Maranhão. Las obras en curso incluyen la construcción de nuevos tanques para la recepción, expedición y almacenamiento de diésel, gasolina y biocombustibles.

Figura 19 - Áreas arrendadas y plan de expansión de Santos Brasil para terminales de combustibles en el Puerto de Itaqui.



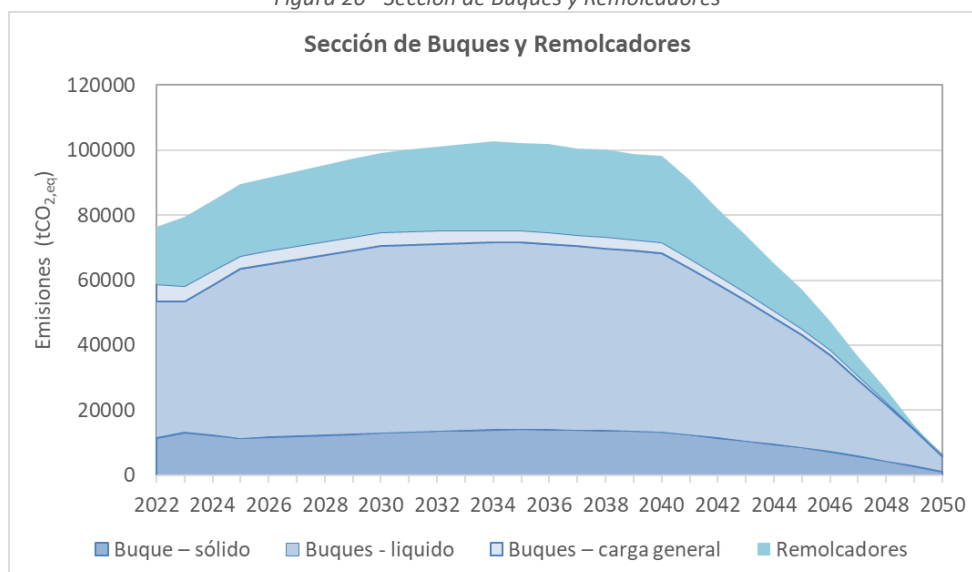
Fuente: Fundación Valenciaport.

La empresa Santos Brasil arrendó las siguientes áreas: IQI-03, IQI-11 e IQI-12. El área IQI-13 fue arrendada por el Terminal Químico de Aratú (TEQUIMAR)¹.

4.1. Proyección de buques y remolcadores

En el período de 2022 a 2050, en el escenario sin las acciones de descarbonización de la EMAP, habrá dos tendencias. Hasta 2040, hay un ligero aumento en el cual parte del incremento de la actividad se compensa con algunas acciones de descarbonización en el sector. A partir de 2040, se espera que el sector marítimo se alinee con la estrategia de la OMI, lo que implicará una reducción significativa en las emisiones generales. En 2050, las emisiones totales se estiman en 6 kt CO₂, un valor que representa el 8% de las emisiones de 2022. Sin embargo, en 2050, seguirán siendo la principal fuente de emisiones en el Puerto de Itaqui, representando el 41% de las emisiones globales totales.

Figura 20 - Sección de Buques y Remolcadores



Fuente: Fundación Valenciaport.

4.2. Proyección de la EMAP y terminales

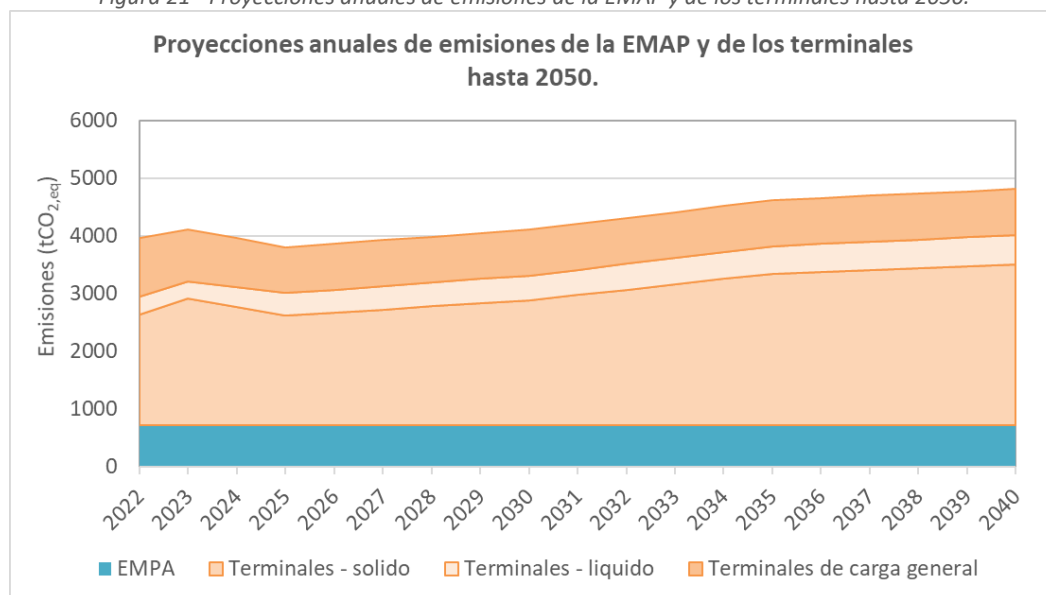
En el período entre 2022 y 2050, con relación a los terminales, se presumió que, sin cambios tecnológicos, las emisiones por unidad de carga movilizada permanecerán constantes. Las proyecciones de emisiones hasta 2050 para operadores y terminales fueron calculadas considerando las proyecciones de tráfico por tipo de carga (granel sólido, granel líquido y carga general) y el índice de emisiones por tonelada de mercancía de cada tipo (kgCO₂eq/tonelada para graneles sólidos, para graneles líquidos y para carga general).

La Figura 21 presenta la proyección de las emisiones anuales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a las actividades de la EMAP y de los terminales arrendados, en el período de 2022 a 2050. Al igual que en el inventario de la huella de carbono, la proyección considera las emisiones provenientes de fuentes fijas, móviles, gases refrigerantes, extintores y consumo de energía eléctrica generadas tanto por las instalaciones de la EMAP como por los terminales ubicados dentro de los límites geográficos del puerto.

Se observa que la mayor parte de las emisiones proviene de los terminales de graneles sólidos, que mantienen una trayectoria de crecimiento gradual a lo largo de los años. Este segmento concentra la mayor intensidad de emisiones, reflejando el perfil operacional dominante en el complejo portuario. Los terminales de graneles líquidos y de carga general presentan emisiones más modestas, aunque estables, con una leve tendencia al alza hasta 2050. En cuanto a las emisiones atribuidas directamente a la EMAP, se mantienen prácticamente constantes durante todo el período, considerando que el crecimiento que pueda generarse en los próximos años podrá ser contrarrestado por las acciones de descarbonización ya previstas actualmente (sustitución de la flota por vehículos híbridos y eléctricos, sustitución de combustibles con priorización de etanol y biodiésel, instalación de paneles solares). De

esta forma, sus emisiones se sitúan por debajo de 1.000 tCO₂eq por año, lo que indica un menor impacto relativo de la administración portuaria en comparación con las operaciones privadas.

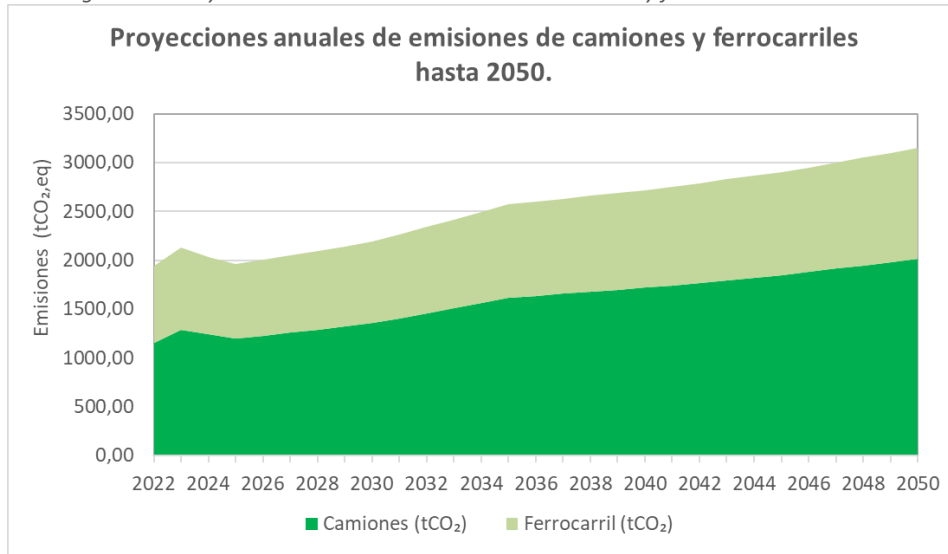
Figura 21 - Proyecciones anuales de emisiones de la EMAP y de los terminales hasta 2050.



4.3. Proyección de camiones y ferrocarriles

En el período entre 2022 y 2050, en el escenario sin acciones de descarbonización, se espera que las emisiones de camiones y trenes aumenten en un 62%, un incremento que está de acuerdo con el aumento del tráfico. La distribución de las emisiones por modo permanece razonablemente constante, con un leve aumento en la contribución del camión, llegando al 64% de esta sección.

Figura 22 - Proyecciones anuales de emisiones de camiones y ferrocarriles hasta 2050.



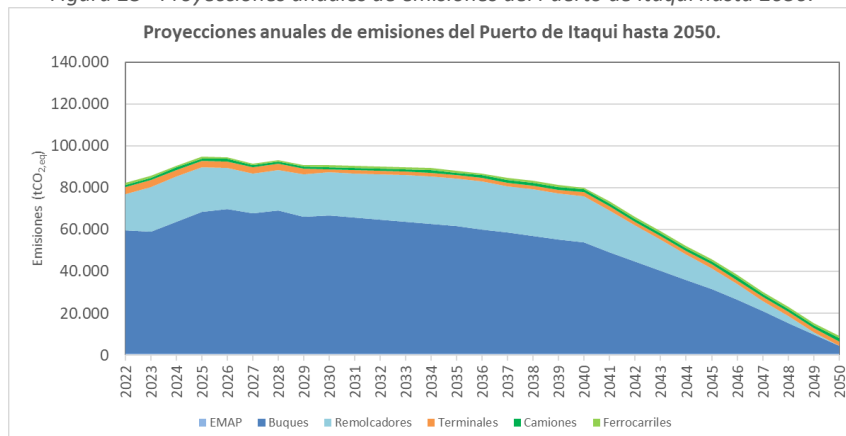
Fuente: Fundación Valenciaport.

4.4. Proyección Global

Considerando las proyecciones de tráfico y partiendo del supuesto de que ninguna medida de descarbonización sea implementada por parte de la EMAP (escenario BAU – Business as Usual), se estima un crecimiento progresivo de las emisiones hasta 2040. A partir de ese año, se espera que el sector marítimo comience a alinearse con la estrategia de la Organización Marítima Internacional (OMI), resultando en una reducción significativa de las emisiones asociadas a buques y remolcadores.

En este escenario, las emisiones totales alcanzarán alrededor de 105 mil toneladas de CO₂ equivalente (ktCO₂eq) en 2040, con una reducción expresiva a 14,6 ktCO₂eq hasta 2050, debido a la renovación tecnológica de la flota. Aun así, las principales fuentes de emisiones residuales permanecerán asociadas a la permanencia de los buques atracados en los muelles, a las operaciones de carga y descarga, y al transporte por carretera de cargas (camiones), exigiendo especial atención en las estrategias de mitigación a largo plazo.

Figura 23 - Proyecciones anuales de emisiones del Puerto de Itaqi hasta 2050.



Fuente: Fundación Valenciaport.

5. Tecnologías disponibles

La descarbonización del sector portuario exige una transformación de los procesos, equipos y fuentes de energía actualmente utilizados. En los últimos años, han surgido diversas tecnologías con potencial para reducir significativamente las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a las operaciones portuarias y logísticas.

Estas soluciones van desde la electrificación de vehículos y equipos de operación, el uso de combustibles alternativos de baja emisión, hasta la implantación de sistemas de gestión y digitalización orientados a la mejora de la eficiencia energética. Aunque muchas de estas tecnologías ya están disponibles en el mercado y han demostrado resultados positivos, su implementación a gran escala todavía enfrenta desafíos técnicos, económicos y regulatorios, que deben analizarse en función de las particularidades de cada puerto, su contexto operacional y territorial.

A continuación, se presentan las principales opciones tecnológicas actualmente disponibles para la descarbonización de los diferentes segmentos del entorno portuario.

5.1. Buques

Las tecnologías que pueden aplicarse son, principalmente, tres:

- **Onshore Power Supply (OPS)** implica el suministro de energía eléctrica a los buques mientras están anclados o atracados, permitiendo que apaguen sus generadores auxiliares.
- Uso de **tecnologías alternativas de propulsión**, como la hibridación con baterías o buques con propulsión totalmente eléctrica.
- Uso de **combustibles** sintéticos, biocombustibles o combustibles de baja emisión.

Figura 24 - Instalación de sistema OPS en media tensión para buques de crucero, Terminal de Altona, Hamburgo.



Fuente: Hamburg Port Authority.

Figura 25 - Ejemplo de combustible alternativo de baja emisión (amoníaco) (a), y propulsión híbrida con baterías (Ro-Ro, Grimaldi) (b).



(a)

Fuente: Bioenergy International¹



(b)

Fuente: Cadena de Suministro².

En el caso de puntos de difícil electrificación, la tecnología convencional de OPS no puede ser utilizada, y las alternativas disponibles son el uso de barcazas de suministro (soluciones como BlueBARGE o Elemanta) o el tendido de cables submarinos de suministro eléctrico (solución Stillstrom).

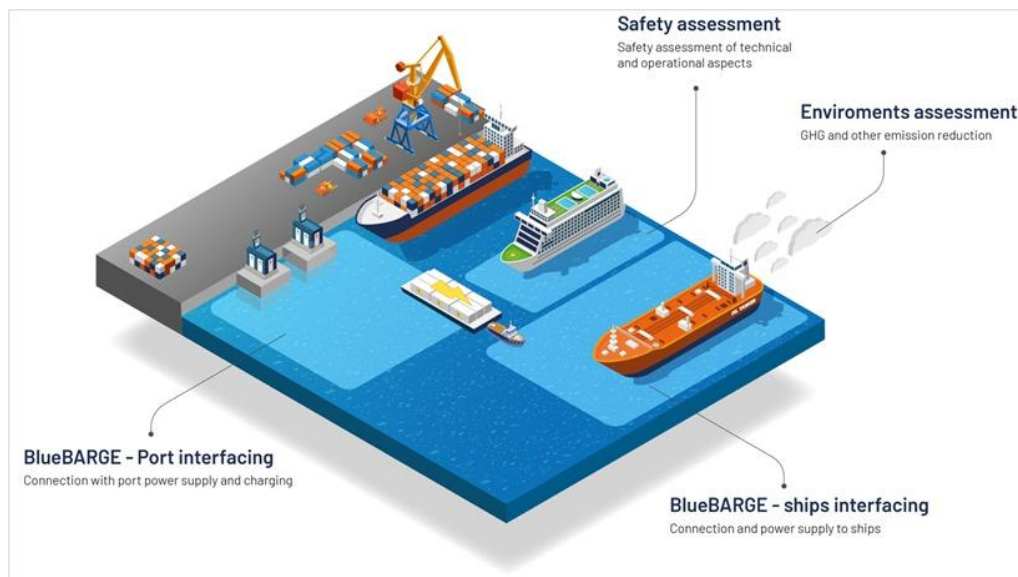
BlueBARGE: solución innovadora optimizada de power-barge con módulos de suministro de energía en contenedores, para alcanzar al menos 3 MW de potencia de descarga y 35 MWh de capacidad de energía.

La tecnología de almacenamiento: Sistemas de almacenamiento de energía por batería, basados en iones de litio y flujo redox de vanadio.

¹ <https://bioenergyinternational.com/ihi-jera-commence-worlds-first-large-scale-ammonia-co-firing-demo/>

² https://www.cadenadesuministro.es/noticias/grimaldi-incorpora-a-su-flota-el-eco-malta_1393546_102.html

Figura 26 - Imagen conceptual de la solución BlueBARGE.



Fuente: Projeto BlueBARGE.³

Elemanta: barcaza de energía basada en pila de hidrógeno para alcanzar de 1 a 5 MW de potencia de descarga y hasta 48 horas de capacidad de energía autónoma. Célula de combustible de 1 MW con 1,5 toneladas de H₂ almacenadas a bordo.

Figura 27 - Solución Elemanta (Hydrogen power Barge).



Fuente: HDF Energy⁴

Stillstrom: conexión a la red terrestre o electrificación directa, garantizando una fuente de energía confiable, sostenible y constante para las embarcaciones fondeadas. Puede ser llevado a las áreas de fondeo 2 y 3 y proporcionar abastecimiento simultáneo a todas las embarcaciones fondeadas.

³ <https://bluebargo.eu/>

⁴ <https://hdf-energy.com/>

Figura 28 - Solución Stillstrom.



Fuente: Stillstrom.⁵

5.2. Remolcadores

Una de las principales estrategias para avanzar en la descarbonización del servicio de remolcadores marítimos es mejorar la eficiencia energética de las embarcaciones existentes. Esto puede lograrse mediante la hibridación de los sistemas de propulsión o mediante la aplicación de recubrimientos antifouling que optimizan el desempeño hidrodinámico. Para alcanzar niveles más elevados de reducción de emisiones, es necesario considerar el uso de combustibles alternativos o incluso una transformación completa en los sistemas de propulsión.

- **Reducción de consumo:** La optimización de las operaciones y el mantenimiento eficiente contribuyen directamente a la disminución del consumo de combustible.
 - **Hibridación:** la integración de sistemas híbridos, combinando motores diésel con baterías o motores eléctricos, permite reducir el consumo de energía en hasta un 18%, especialmente en operaciones de baja demanda energética o durante maniobras de corta duración.
 - **Recubrimientos antifouling:** estos tratamientos aplicados al casco evitan la incrustación de organismos marinos, reduciendo la fricción con el agua. Dependiendo del tipo de recubrimiento utilizado, es posible obtener ganancias de eficiencia entre un 5% y un 15%.

⁵ <https://stillstrom.com/>

- **Uso de combustibles drop-in:** estos combustibles pueden ser utilizados en motores existentes con adaptaciones mínimas, lo que facilita su implementación en el corto plazo.
 - **Biodiésel y HVO:** cuando se producen a partir de aceites residuales, pueden ofrecer reducciones significativas de emisiones, de hasta un 90%. Brasil, con su destacada capacidad agrícola, especialmente en soja y palma, posee un gran potencial en la producción de estas alternativas.
 - **Combustibles pirolíticos:** producidos a partir de biomasa. Aún no están disponibles comercialmente en la actualidad.
- **Nueva propulsión:** la viabilidad de estas tecnologías depende del perfil operacional de cada remolcador y de su patrón de navegación.
 - **Bio-GNL:** puede proporcionar reducciones de emisiones de hasta un 90%. En Brasil, ya existen iniciativas lideradas por empresas como Petrobras y Raízen en esta dirección.
 - **Eléctricos puros:** ideales para operaciones portuarias o en áreas restringidas, donde las distancias recorridas son cortas y existe infraestructura adecuada para la recarga.
 - **Hidrógeno:** puede ser utilizado tanto en motores de combustión como en células de combustible (Fuel Cells), ofreciendo una opción de emisión cero en el punto de uso.
 - **Metanol:** alternativa líquida que permite una implementación relativamente sencilla, además de facilitar el almacenamiento y la manipulación.
 - **Amoníaco:** promete grandes reducciones en las emisiones, aunque exige sistemas específicos de manipulación y seguridad debido a su toxicidad.

Actualmente, no existe un combustible alternativo que supere a los combustibles tradicionales en todos los aspectos, siendo por lo tanto necesario evaluar cada opción de acuerdo con su aplicación específica. El FAME (éster metílico de ácidos grasos) y el HVO (aceite vegetal hidrotratado) ya son opciones comerciales disponibles, aunque su mayor costo exige una justificación técnica y económica para su uso. En el caso del Puerto de Itaqui, el etanol — que ya cuenta con una cadena de distribución consolidada— puede representar una alternativa particularmente atractiva. Para otras iniciativas futuras con potencial de sinergia, como la producción local de amoníaco o biometano, se recomienda la realización de estudios específicos sobre su viabilidad de uso en remolcadores.

5.3. Terminales

En el caso de Itaquí, los operadores de los terminales portuarios utilizan principalmente equipos con motores diésel y, en menor grado, eléctricos, siendo que algunos de estos equipos funcionan con electricidad no renovable. Además, se observa un consumo limitado de gasolina, GLP y etanol. Todas estas fuentes de energía generan emisiones de Gases de Efecto Invernadero, contribuyendo al cambio climático y al deterioro de la calidad del aire en la región.

Las principales estrategias para reducir las emisiones de los equipos portuarios incluyen el uso de electricidad renovable y acciones orientadas a los combustibles. Esto puede lograrse de diversas formas, como mejorando la eficiencia para reducir el consumo, utilizando combustibles drop-in o incluso proponiendo la sustitución completa del sistema de propulsión o del tipo de equipo utilizado.

Algunas opciones son:

- **Electricidad renovable:**
 - Cintas transportadoras eléctricas, contenedores refrigerados (reefers) y grúas operando con electricidad renovable.
 - Grúas de muelle del tipo MHC (Mobile Harbor Cranes) eléctricas.
- **Combustibles drop-in:**
 - Biodiésel y HVO: idealmente producidos a partir de aceites residuales (hasta un 90%). Brasil es un gran productor de soja y palma.
 - Bio-GNL: gas natural licuado de origen renovable.
 - Combustibles pirolíticos: derivados de biomasa, actualmente no disponibles comercialmente.
 - Etanol: utilizado en mezclas como la gasolina E10 (con un 10% de etanol).
- **Mayor eficiencia y nueva propulsión:**
 - Sistemas de certificación energética.
 - Hibridación de los sistemas de propulsión.
 - GLP (Gas Licuado de Petróleo).

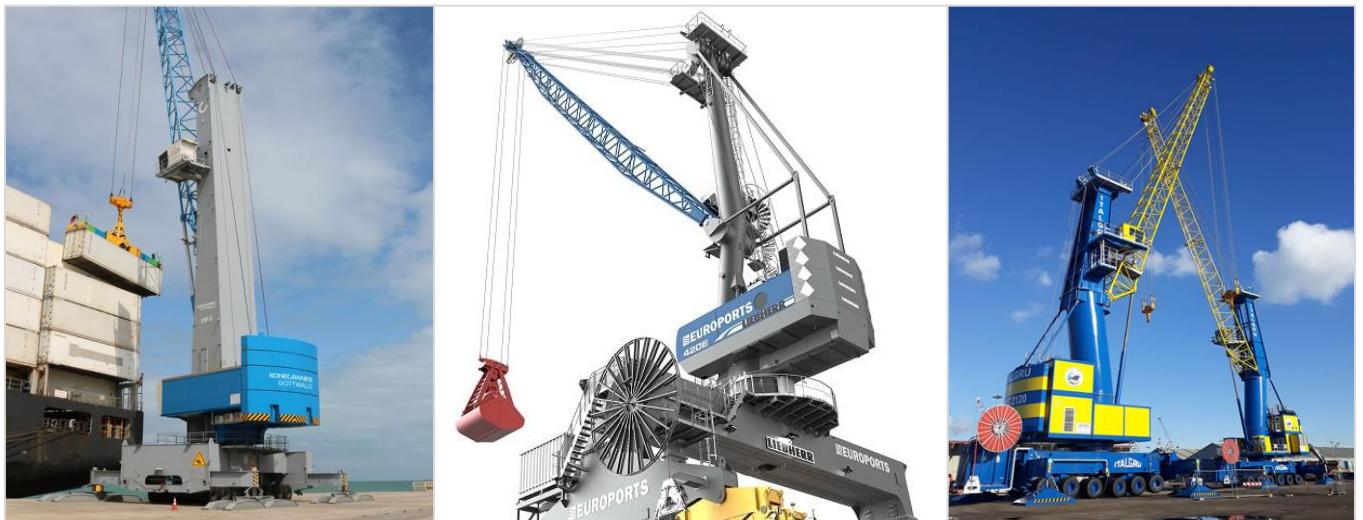
- Sistemas eléctricos puros.
- Hidrógeno (H₂) y células de combustible (Fuel Cells).

A continuación, un análisis de los principales equipos portuarios utilizados en Itaquí desde el punto de vista de alternativas de baja emisión.

Grúas móviles

Desde 2020, comenzaron a estar disponibles grúas móviles de muelle (MHC – Mobile Harbour Cranes) eléctricas por parte de diversos grandes fabricantes y empresas especializadas en este tipo de equipos, como Liebherr, Konecranes, Gottwald, Sennebogen, Italgru, Palfinger Marine, entre otros. Algunos de los puertos que ya utilizan MHC eléctricos son: Los Ángeles (EE.UU.), Amberes (Bélgica), Róterdam (Países Bajos), Durres (Albania), Dar es Salaam (Tanzania) y Mormugao (India).

Figura 29 - Grúas móviles eléctricas de muelle.



Fuente: Konecranes⁶ Liebherr⁷ Italgru.⁸

Carretillas elevadoras

Las carretillas elevadoras se utilizan principalmente para mover y almacenar carga general en almacenes, depósitos y áreas de carga en los puertos, así como para mover equipos o accesorios como generadores o garras.

Algunos modelos alternativos a los propulsados por diésel son:

- **Toyota:** modelo con batería eléctrica (ion de litio o plomo-ácido).
- **Hyster:** modelo eléctrico. Posee versiones impulsadas por hidrógeno (H₂) en desarrollo.

⁶ <https://www.marinelink.com/companies/konecranes-83436>

⁷ <https://www.liebherr.com/es-int/gruas-maritimas/productos/equipamiento-de-puerto/gr%C3%BAas-p%C3%B3rtico/liebherr-portal-slewing-electric/lps-420-e-5391558>

⁸ <https://italgru.it/en/electric-port-cranes/mobile-harbour-cranes/imhc-2120-e>

- **Still GmbH:** modelo eléctrico con batería de litio.
- **BYD:** modelo eléctrico con baterías de fosfato de hierro-litio.

Figura 30 - Carretilla elevadora eléctrica Hyster



Fuente: Hyster.⁹

Reach Stackers (Carretillas apiladoras de contenedores)

Son carretillas elevadoras diseñadas específicamente para manipular contenedores. Tradicionalmente son propulsadas por diésel.

Algunos modelos alternativos a los propulsados por diésel son:

- **Kalmar** (grupo Cargotec): versión eléctrica (baterías). También ofrecen opciones híbridas y HVO.
- **Hyster:** versión eléctrica con baterías de litio o hidrógeno (célula de combustible).
- **Liebherr:** versión eléctrica (plug-in o baterías).

Figura 31 - Reach Stacker eléctrica de Kalmar.



Fuente: Kalmar.¹⁰

Front-End Loaders (Pala cargadora)

Se utilizan en operaciones de sólidos a granel para cereales y minerales. Tradicionalmente, tienen motores diésel.

Algunas alternativas de bajas emisiones son:

- **Volvo CE:** modelo eléctrico (baterías).

⁹ <https://www.hyster.com/es-es/emea/carretillas-elevadoras-electricas-de-4-ruedas/j10-18xd/>

¹⁰ https://www.kalmarglobal.com/news--insights/press_releases/2023/kalmar-hands-over-its-first-fully/

- **Caterpillar (CAT):** batería eléctrica (CAT también está probando hidrógeno en otros equipos).
- **Komatsu:** modelo eléctrico (baterías).
- **John Deere:** modelo eléctrico (baterías).

Figura 32 - Pala cargadora eléctrica de Volvo



Fuente: Volvo.¹¹

Backhoe Loaders (Retroexcavadora)

Las retroexcavadoras son equipos versátiles utilizados en obras de construcción civil, movimiento de tierra y manipulación de graneles sólidos. Tradicionalmente, operan con motores diésel, pero existen alternativas con menores emisiones disponibles.

- **JCB:** modelo eléctrico. También cuenta con un modelo de hidrógeno.
- **CASE Construction:** modelo eléctrico.
- **Volvo CE:** modelo eléctrico en desarrollo.

Figura 33 - Minirretroexcavadora de hidrógeno de JCB.



Fuente: JCB.¹²

¹¹ <https://www.volvoce.com/espana/es-es/products/electric-machines/l120-electric/>

¹² <https://tinyurl.com/58baaphj>

Otros equipos portuarios

Los operadores necesitan realizar otros trabajos y utilizar otros tipos de equipos que también cuentan con alternativas de bajas emisiones.

- **Konecranes:** RTG (Rubber-Tired Gantry) eléctrico y HVO/biodiésel.
- **Terberg:** tractor de terminal eléctrico.
- **MAN Truck & Bus:** camiones eléctricos para puertos.
- **Scania:** camiones con motores a biogás (Bio-GNL) o HVO.

Figura 34 - Camión eléctrico de Terberg



Fuente: Terberg.¹³

Finalmente, como resumen, los combustibles alternativos que pueden ser utilizados en la manipulación de mercancías en los puertos incluyen biodiésel, gas natural licuado (GNL), hidrógeno, combustibles pirolíticos y electricidad renovable. Estos combustibles contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la mejora de la sostenibilidad en las operaciones portuarias. Algunos de los fabricantes que ya cuentan con equipos desarrollados comercialmente para estos combustibles incluyen Liebherr, Konecranes, Kalmar, Scania y otros.

- **Eléctrico (baterías):** opción más común (ej. Kalmar, Volvo, CAT).
- **Hidrógeno (H₂):** en desarrollo (Hyster, JCB).
- **Con HVO/Biodiésel:** utilizado en equipos diésel modificados (Kalmar, Konecranes).
- **Bio-GNL:** para camiones y maquinaria pesada (Scania, IVECO).
- **GLP/GNC:** menos común en puertos, pero utilizado en algunas carretillas elevadoras.

¹³ https://www.terbergtaylor.com/assets/TTA_PRODUCT_LINE.pdf

Figura 35 - Camión de biometano de Scania.



Fuente: Interchange UK¹⁴

5.4. Camiones

A corto plazo, es estratégico priorizar acciones orientadas a la mejora de la caracterización de la flota y al aumento de la eficiencia operacional del sector. A continuación, se recomienda avanzar en la sustitución progresiva de combustibles y, por último, evaluar la adopción de tecnologías de camiones de baja o cero emisión.

Reducción de consumo

- Mejor caracterización del sector.
- Programa de Asistencia Empresarial.
- Sistemas de Certificación de Camiones.
- Remolque triple.

Combustibles drop-in

- Biodiésel y HVO.
- Idealmente de aceites usados (hasta un 90%).
- Brasil es una potencia en soja y palma

Nueva propulsión

- Bio-GNL. Requiere red de abastecimiento. IVECO S-Way Natural Power y Scania CNG/GNL. (20%).
- Eléctrico puro. Distancias cortas. Volvo, Mercedes-Benz y Scania.

¹⁴ <https://www.interchange-uk.com/news/stbs-launch-alternative-fuels-strategy-for-the-south-west>

- Redes de abastecimiento.

Los servicios de asistencia son una opción que permite reducciones interesantes sin grandes inversiones por parte de las empresas de transporte. Tiende a tener buena aceptación social y resultados interesantes: programa francés Objectif CO₂.

Figura 36 - Programa francés Objectif CO₂

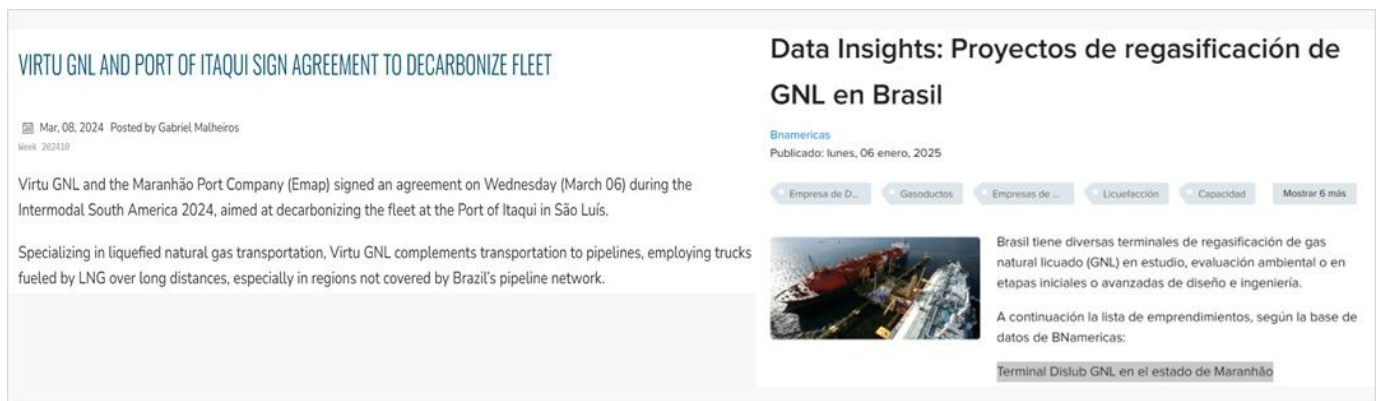


Fuente: Objectif CO₂

Actualmente, la infraestructura de estaciones de abastecimiento de Gas Natural Licuado (GNL) para camiones en Brasil se encuentra en desarrollo y es limitada. No existe un número exacto de estaciones de GNL en operación en el país, ya que la información pública es escasa y los proyectos se encuentran en diferentes fases de implementación.

En el estado de Maranhão, específicamente, no existen actualmente estaciones de abastecimiento de GNL para camiones en funcionamiento. Sin embargo, hay iniciativas en curso que pueden cambiar este escenario en el futuro. Por ejemplo, la empresa Virtu GNL adquirió 30 camiones propulsados por GNL para operar en el estado, lo que indica una posible expansión de la infraestructura de abastecimiento en la región.

Figura 37 - Iniciativas de descarbonización con GNL



Fuente: World Cargo News; BNamericas.

5.5. Ferrocarriles

Las acciones relacionadas con la descarbonización de los trenes tienen tres ejes: mejora operacional, combustible y eficiencia, y electrificación. Considerando el bajo grado de electrificación de la red externa, la electrificación de la red ferroviaria no presenta mucho interés. Las opciones con mayor potencial serían la mejora operacional, la hibridación y el uso de combustibles renovables.

Operación Operação

- Optimización del tráfico ferroviario con inteligencia artificial.
- Reducción del tiempo ocioso de las locomotoras.
- Caracterización del consumo y de las emisiones en tiempo real de las locomotoras.

Combustibles y eficiencia

- Implementación de locomotoras híbridas con baterías de litio para operaciones dentro del área portuaria.
- Aprovechamiento del frenado regenerativo para la recarga de las baterías.
- Biodiésel y HVO, idealmente a partir de aceites residuales (hasta un 90%). Brasil es una potencia en soja y palma.

Nueva propulsión

- Electrificación de la red ferroviaria en el puerto, con asociaciones público-privadas para el financiamiento de la electrificación.
- Utilización de Bio-GNL.
- Pruebas con locomotoras impulsadas por hidrógeno verde, integrando la producción de H₂ a la matriz energética del Puerto de Itaquí.

5.6. Estudio de potencial fotovoltaico y almacenamiento

Los objetivos específicos de este estudio son identificar las áreas dentro del puerto con mayor potencial para la instalación de paneles solares, cuantificar la capacidad de generación de energía solar y definir los parámetros técnicos para su implementación. Además, se evaluarán las necesidades de almacenamiento energético a corto y largo plazo para optimizar el uso de la energía generada.

Por último, se analizará el potencial de producción local de hidrógeno y se propondrán soluciones tecnológicas y de infraestructura para su almacenamiento y uso, en consonancia con las necesidades energéticas de este vector energético previstas en el presente Plan de Descarbonización del Puerto de Itaquí.

5.6.1. Potencial solar

El presente estudio tiene como objetivo analizar el potencial de generación solar fotovoltaica en el Puerto de Itaquí y en sus áreas de influencia, considerando específicamente la viabilidad de instalar sistemas solares en cubiertas de edificios administrativos, estacionamientos en proceso de reforma y otras áreas gestionadas por la Empresa Maranhense de Administración Portuaria (EMAP) fuera del perímetro portuario, como la terminal de pasajeros o terrenos adyacentes.

Dada la elevada irradiación solar característica del estado de Maranhão y el compromiso del puerto con la descarbonización y la sostenibilidad energética, este análisis busca identificar oportunidades concretas para el aprovechamiento de la energía solar como fuente limpia y estratégica para el abastecimiento de sus operaciones.

Para estimar el potencial de generación solar en las áreas identificadas del Puerto de Itaquí, se siguió una metodología basada en el análisis de la superficie disponible, datos de irradiación solar media anual y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. En primer lugar, se realizó una estimación preliminar de las superficies útiles en cubiertas de edificios administrativos, estructuras de estacionamiento y terrenos externos viables, a partir de imágenes satelitales y planos del puerto. Posteriormente, se consideró la irradiancia solar media anual en São Luís, que varía entre 3,03 (marzo) y 5,49 (agosto) kWh/m²/día, con una media anual de 4,366 kWh/m²/día [1], así como un rendimiento medio del sistema entre 15 % y 18 % [2], teniendo en cuenta pérdidas por temperatura, orientación,

sombreado y conversión. Estos parámetros permiten calcular la producción teórica anual de energía para cada tipo de área y evaluar su contribución potencial al consumo eléctrico del puerto.

Figura 38 - Irradiación considerada para el Puerto de Itaqui.

Daily Total Averages of the Direct Normal Irradiation for the State of MARANHÃO

(Wh/m².day)

Show 10 entries Search: 61200 Insert ID

ID	Lon	Lat	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
61200	-44.249	-2.5005	4355	3902	3487	3032	3105	3804	4679	4990	5496	5378	4722	4804	4863
ID	Lon	Lat	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec

Fuente: Fundación Valenciaport.

Identificación de Áreas Susceptibles para la Instalación de Paneles Fotovoltaicos

Se consideraron tres categorías principales de espacios:

- **Cubiertas de edificios administrativos:** superficies planas o ligeramente inclinadas, generalmente libres de obstrucciones y con infraestructura eléctrica cercana. Se priorizaron las cubiertas de los edificios administrativos centrales, salas técnicas y almacenes logísticos.
- **Estacionamientos en reforma:** la instalación de estructuras fotovoltaicas tipo carport en estacionamientos es doblemente eficiente, ya que genera energía renovable y además proporciona sombra y confort térmico a los vehículos. Las áreas seleccionadas incluyen estacionamientos de personal operativo, visitantes y flotas de servicio, actualmente en proceso de renovación o expansión.
- **Áreas externas a la poligonal portuaria:** terrenos fuera del perímetro inmediato del puerto, pero bajo gestión de la EMAP o del Gobierno del Estado de Maranhão, como áreas logísticas desactivadas, patios ferroviarios o terrenos adyacentes. Estos lugares representan una oportunidad para la implementación de plantas solares de mayor escala.

Planificación Inicial: Áreas Internas

El procedimiento de dimensionamiento de las áreas siguió un proceso secuencial. En primer lugar, se determinó el área disponible en zonas bajo control directo de la EMAP. Estas zonas fueron clasificadas como tipologías 1 y 2 y definen el espacio disponible para la instalación de generación fotovoltaica a corto plazo.

Figura 39 - Área disponible en zonas bajo control.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Tras el análisis detallado de las infraestructuras y superficies disponibles en el recinto del Puerto de Itaqui, se determinó que el área potencialmente aprovechable para la instalación de paneles fotovoltaicos es de **14.810 m²**. Esta superficie se distribuye entre **7.320 m²** correspondientes a cubiertas de edificios administrativos y logísticos, y **7.490 m²** en áreas de estacionamiento, actualmente en proceso de renovación.

Para reflejar con mayor precisión la fracción útil realmente disponible, se aplicaron factores de adecuación del 80 % para las cubiertas (considerando obstáculos, inclinaciones o zonas inaccesibles) y del 90 % para los estacionamientos (debido a la disposición estructural y al espaciamiento entre filas).

Como resultado, la superficie útil neta estimada para la instalación de paneles solares es de **12.597 m²**, lo que constituye la base para el dimensionamiento de la planta fotovoltaica dentro del perímetro portuario.

Planificación Ampliada: Áreas Externas Fuera del Polígono Portuario

Tras el análisis de la superficie disponible dentro del recinto del Puerto de Itaqui, se estimó que es posible instalar un sistema fotovoltaico de aproximadamente 6,7 MWp sobre un total de 12.597 m² útiles, distribuidos entre cubiertas de edificios y áreas de estacionamiento.

Sin embargo, esta capacidad representa solo una fracción del potencial técnico de inyección permitido por la infraestructura eléctrica existente, en particular por la subestación equipada con una celda modular de media tensión Schneider Electric SM6, configurada para operar a 13,8 kV con una corriente nominal de 630 A.

Por ello, este estudio propone, como primer paso, maximizar la generación fotovoltaica hasta agotar la capacidad de la red interna de distribución del Puerto de Itaqui.

Al combinar las superficies internas ya identificadas con nuevas áreas externas complementarias, es posible alcanzar esta capacidad sin necesidad de modificar la infraestructura de media tensión existente. Esta estrategia de diseño no solo permite maximizar el uso de los activos ya disponibles, sino que también optimiza el retorno energético y económico del sistema, al distribuir la inversión fija en infraestructura sobre un volumen mayor de generación renovable, evitando inversiones superiores en upgrades de la red eléctrica interna.

Requisitos para las Áreas Externas

Estas áreas externas deberán cumplir con una serie de requisitos técnicos, operativos y jurídicos, entre los cuales se destacan:

- **Titularidad pública o disponibilidad de uso:** Priorizar terrenos pertenecientes al Gobierno del Estado de Maranhão o gestionados por la EMAP, como antiguas áreas logísticas, patios ferroviarios desactivados o zonas próximas a la terminal de pasajeros.
- **Proximidad a la infraestructura eléctrica del puerto:** Para minimizar pérdidas y facilitar la conexión al punto común de entrega en la subestación SM6, se recomienda que la planta externa se encuentre a una distancia máxima de 1,5 a 2 km del centro de carga.
- **Condiciones topográficas y de irradiación:** Los terrenos deben poseer baja pendiente, orientación libre de sombras, accesibilidad para maquinaria de instalación y baja exposición a inundaciones, comunes en algunas áreas cercanas al puerto.
- **Viabilidad de conexión:** Será necesario proyectar una conexión de media tensión, preferiblemente aérea o subterránea según viabilidad técnica, hasta la celda disponible de la subestación existente, dimensionando adecuadamente protecciones y seccionamientos conforme a la norma NBR 14039 (instalaciones eléctricas en media tensión).

La siguiente tabla presenta un resumen de las características técnicas de las instalaciones propuestas.

Tabla 2 - Características técnicas de las instalaciones propuestas.

Parámetro	Instalación interna	Instalación externa
Superficie efectiva disponible (m²)	12.597	14.340
Potencia máxima instalada (kWp)	6.676	7.600
Número de módulos (550 W)	12.138	13.818
Producción anual mínima estimada (kWh)	3.011.168	3.427.812
Producción anual máxima estimada (kWh)	3.613.402	4.113.375

Fuente: Fundación Valenciaport.

La producción máxima estimada es de **7.726.777 kWh por año**.

5.6.2. Necesidad de Almacenamiento

Durante el año 2022, la EMAP registró un consumo energético **total de 2,6 GWh**, según datos proporcionados por la administración portuaria. Este valor corresponde al conjunto de instalaciones operativas y administrativas del recinto atendidas por la EMAP.

Este volumen de consumo permite establecer una primera aproximación de la magnitud energética del complejo, que puede considerarse moderada en términos industriales, lo que abre camino a una estrategia de cobertura parcial o incluso total mediante fuentes de generación renovable.

El sistema fotovoltaico propuesto para su instalación en el puerto, con una potencia total de 14,3 MWp, fue modelado con datos climáticos específicos del lugar utilizando el software PVGIS. Con base en este modelo, se estimó una producción anual entre 6.438.848 y 7.726.618 kWh, dependiendo del rendimiento efectivo del sistema (intervalo estimado entre 15 % y 18 %).

La comparación directa entre la producción estimada y el consumo registrado permite extraer algunas conclusiones clave:

- La planta proyectada generaría entre 2,47 y 2,97 veces el consumo actual del puerto.
- Esto implica un superávit energético significativo, lo que exigirá evaluar cuidadosamente los escenarios de gestión de los excedentes.
- Bajo un esquema de autoconsumo directo, la instalación podría cubrir el 100 % de la demanda actual gestionada por la EMAP, incluso en los meses de menor irradiación solar.

Estudio técnico sobre el potencial de almacenamiento (Escenarios)

Con el objetivo de evaluar de forma rigurosa y realista la viabilidad técnico-económica del aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en el Puerto de Itaqui, el presente estudio se estructuró en dos casos de análisis diferenciados.

Esta división responde a la necesidad de comparar el desempeño, el impacto y la rentabilidad de diferentes estrategias de implementación de generación renovable, teniendo en cuenta tanto las limitaciones físicas del entorno portuario como el escenario tarifario y tecnológico vigente.

Con base en los perfiles de generación y considerando la demanda de referencia (distribuida uniformemente como suposición inicial), se realizará la optimización económica del dimensionamiento de las baterías, considerando los siguientes supuestos:

- La generación proyectada en este caso permite cubrir una parte sustancial del consumo eléctrico actual del puerto a través de autoconsumo directo, reduciendo significativamente la factura de energía, con un costo de energía evitada estimado en R\$ 0,711 por kWh, conforme a las tarifas industriales vigentes en el Estado de Maranhão.
- Sin embargo, debido a la limitación de la superficie disponible, esta solución no permite el aprovechamiento total del potencial fotovoltaico del enclave, ni la cobertura completa de la demanda portuaria en determinados períodos. Adicionalmente, la curva horaria de generación no siempre coincide con la curva de consumo, lo que evidencia la necesidad de considerar opciones de almacenamiento eléctrico complementario para mejorar el índice de autosuficiencia.
- Dado el costo actual de almacenamiento en baterías estacionarias, estimado en R\$ 2.000 por kWh instalado [13], se analizó en este caso la capacidad óptima de baterías que permita desplazar la energía solar de las horas de máxima generación a las horas de mayor demanda, sin incurrir en sobredimensionamientos injustificados.
- El equilibrio entre el costo de inversión en almacenamiento y el ahorro generado por la reducción del consumo de energía de la red es crucial para determinar la viabilidad final de este escenario.
- El objetivo de la optimización es la maximización del Valor Presente Neto (VPN) de la inversión, considerando una tasa interna de descuento del 4 %.

Para realizar la optimización, se utilizó una herramienta de optimización de baterías desarrollada por la Fundación Valenciaport.

Caso de Estudio 1: instalación fotovoltaica en edificios y estacionamientos propios de la EMAP

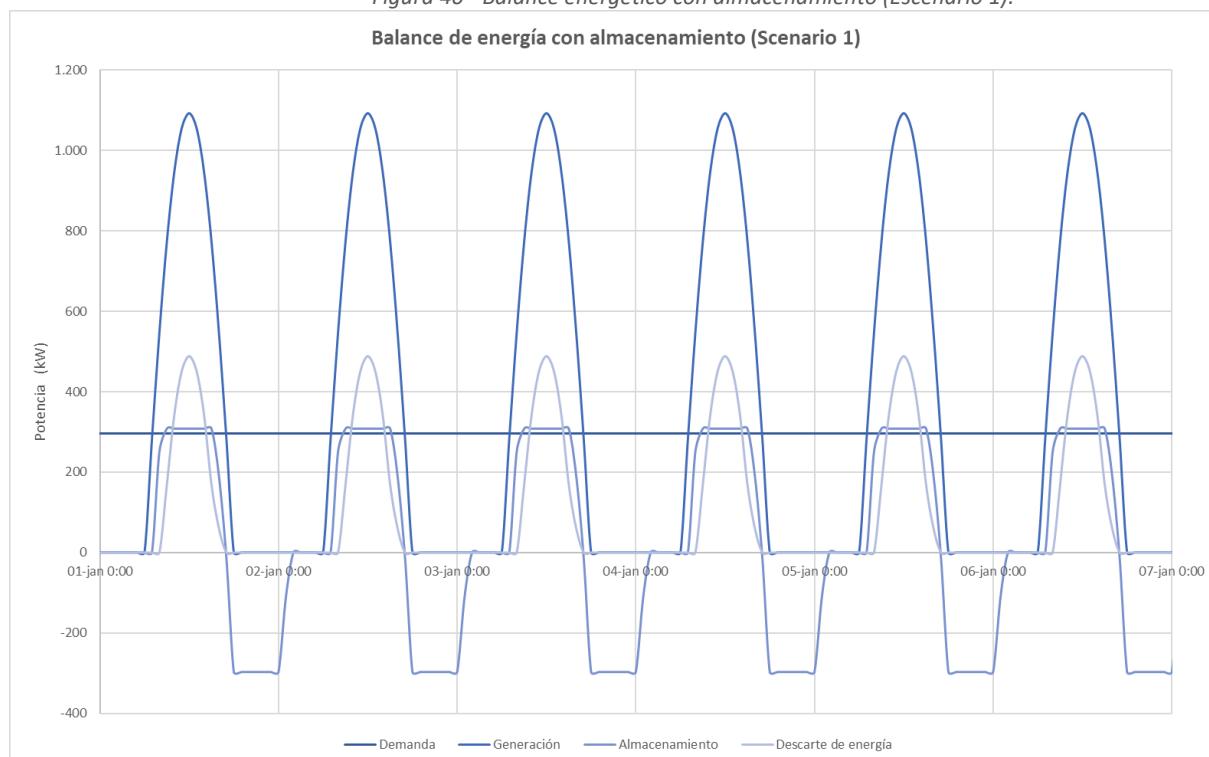
En este primer escenario, se considera únicamente la instalación de sistemas fotovoltaicos sobre las cubiertas de los edificios administrativos y en las áreas de estacionamiento previamente identificadas como técnicamente viables dentro del recinto portuario. Esta opción representa una estrategia de aprovechamiento de áreas ya urbanizadas, con mínimo impacto sobre el suelo, menor complejidad de licenciamiento y máxima integración arquitectónica.

Obtenemos, para el primer caso de estudio, un valor de optimización de 307 kW de potencia de almacenamiento necesaria, lo que implica una inversión de R\$ 614.559 para la adquisición de las baterías. Con ello, se genera un ahorro anual en la compra de electricidad de R\$ 565.458.

Además, se observa una reducción de los vertidos de energía renovable (debido a la incapacidad de absorción por parte de la red), pasando de 2.030 MWh (equivalente al 63 % de la generación) a 1.094 MWh (34 %). Los costos de mantenimiento de la instalación se estiman en R\$ 21.249.

A continuación, se presenta el gráfico con el balance energético proyectado para la primera semana del año considerado como base:

Figura 40 - Balance energético con almacenamiento (Escenario 1).



Fuente: Fundación Valenciaport.

Caso de Estudio 2: instalación fotovoltaica considerando la instalación completa

En el segundo escenario, se amplía el alcance de la instalación fotovoltaica con la inclusión de una planta adicional en suelo, ubicada en áreas externas al recinto inmediato, pero aún dentro del área de gestión portuaria o del Gobierno del Estado, como explanadas adyacentes o zonas de expansión logística.

Esta alternativa permite alcanzar una capacidad instalada significativamente mayor, lo que no solo garantiza la cobertura total del consumo actual del puerto, sino que también viabiliza nuevos vectores de consumo energético, como:

- Producción de hidrógeno verde.
- Electrificación de equipos portuarios.
- Suministro de energía a terceros.

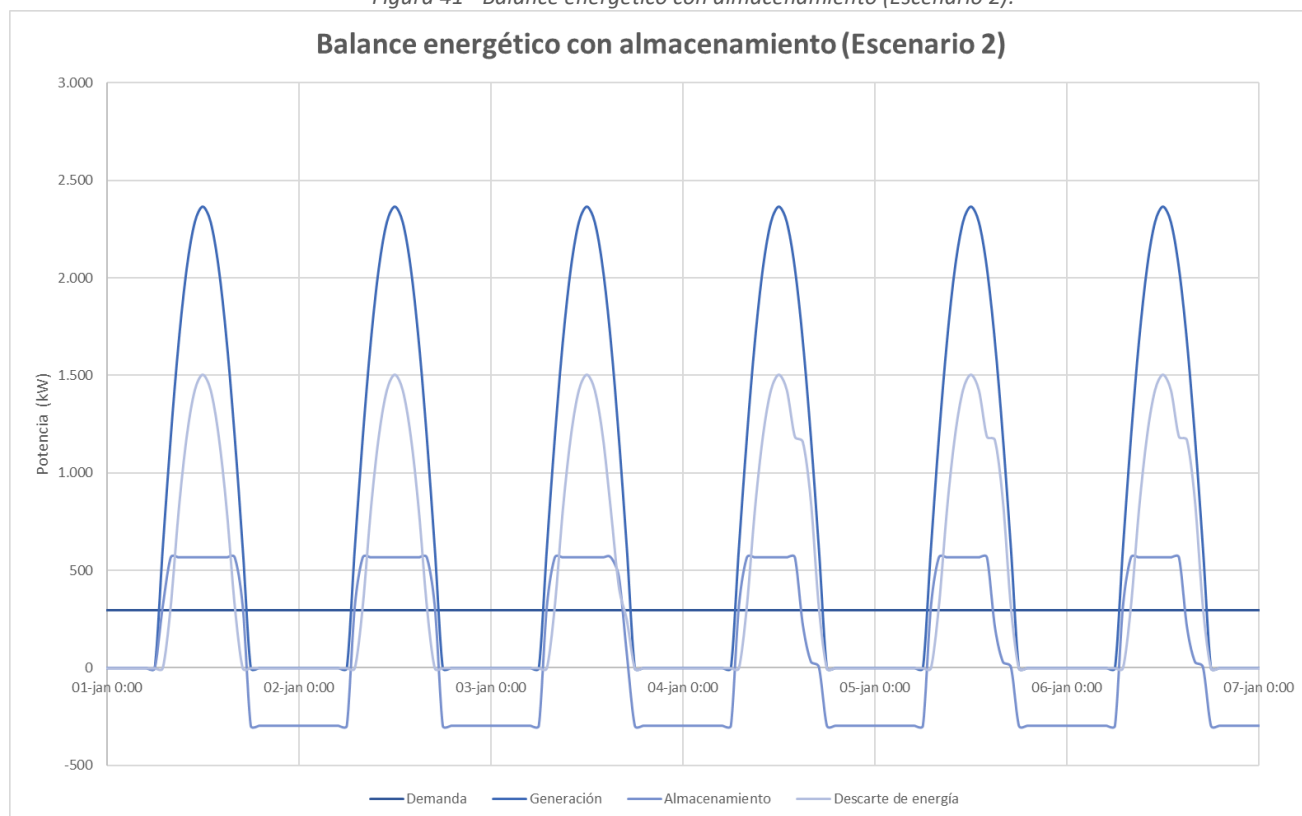
Esta mayor capacidad de generación inevitablemente genera un volumen superior de excedentes solares diarios, haciendo más relevante la necesidad de almacenamiento eléctrico. Sin embargo, también se abre la posibilidad de emplear parte de esa energía adicional en usos flexibles, como la producción de hidrógeno, carga nocturna o sistemas de refrigeración, lo que reduce la presión sobre el sistema de baterías.

De esta forma, este caso permite no solo evaluar una estrategia de aprovechamiento energético a mayor escala, sino también avanzar hacia un modelo de autosuficiencia energética integral y de generación distribuida con valor agregado.

Se obtiene, para el segundo caso de estudio, un valor de optimización de 568 kW de potencia de almacenamiento necesaria, lo que implica una inversión de R\$ 1.136.227 para la adquisición de las baterías. Con ello, se genera un ahorro anual en la compra de electricidad de R\$ 996.755. Los vertimientos de energía renovable (debido a la incapacidad de absorción por la red) se reducen de 5.757 MWh (equivalente al 82 % de la generación) a 4.105 MWh (59 %). Los costos de mantenimiento de la instalación se estiman en R\$ 46.041, proporcionales a la escala de la solución propuesta.

Este resultado evidencia que, aun con almacenamiento optimizado, una parte significativa de la energía renovable generada no puede ser aprovechada sin la adopción de nuevas medidas de flexibilización del sistema. A continuación, se presenta el gráfico con el balance energético proyectado para la primera semana del año considerado como base:

Figura 41 - Balance energético con almacenamiento (Escenario 2).



Fuente: Fundación Valenciaport.

En términos comparativos, el primer caso presenta una mejor eficiencia relativa en el aprovechamiento energético, con una inversión menor y una mayor proporción de autoconsumo.

Por otro lado, el segundo caso, aunque menos eficiente desde el punto de vista del uso relativo de la energía, permite alcanzar mayores volúmenes absolutos de energía aprovechada y un mayor ahorro total, gracias a la mayor escala de la generación solar instalada.

Ambos escenarios demuestran la viabilidad técnica y económica de la combinación entre generación solar y almacenamiento eléctrico en el entorno portuario. Sin embargo, también evidencian la necesidad de desarrollar estrategias complementarias, como el uso de hidrógeno verde, la electrificación de equipos o la implementación de microrredes, para aprovechar la energía renovable excedente que no puede ser absorbida por la red ni almacenada de forma eficiente.

5.7. Hidrógeno removable

El estudio sobre la producción local de hidrógeno renovable en el Puerto de Itaquí posibilitó el dimensionamiento de una planta de electrólisis de 1 MW parcialmente alimentada por energía solar, capaz de producir hasta 450 kg de hidrógeno verde por día. Esta producción se propone como una solución estratégica para descarbonizar las

operaciones logísticas, abastecer las máquinas portuarias y generar un nuevo vector de energía complementario, aprovechando los excedentes fotovoltaicos no consumidos directamente por la red.

Figura 42 - Hidrogeneradora del proyecto H2Ports ubicada en el Puerto de Valencia.



Fuente: Fundación Valenciaport.

El sistema incluye almacenamiento de baja presión para cubrir un día completo de operación, así como una estación de repostaje replicable basada en el modelo **H₂PORTS**. El análisis económico, considerando los precios locales de la electricidad y la inversión estimada, sitúa el costo nivelado del hidrógeno (**LCOH**) entre R\$ 48 y R\$ 60 por kg.

Tabla 3 - Parámetros Técnicos de la Producción de Hidrógeno.

Parámetro	Valor
Potencia del electrolizador	1 MW
Producción máxima de hidrógeno	450 kg/día
Consumo eléctrico específico	12.138
Mejora de la utilización de la electricidad	+14.9% / +21.4%
LCOH estimado	R\$ 48 – R\$ 60

Fuente: Fundación Valenciaport.

5.8. Compensación

Una vez aplicadas las medidas de mitigación, puede permanecer un volumen residual de emisiones que, debido a las características propias de la actividad portuaria, es de difícil eliminación. En esos casos, pueden considerarse mecanismos de compensación.

La compensación de emisiones se refiere al proceso de adquisición de créditos de carbono, generados por proyectos que absorben o evitan la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), con el objetivo de compensar las emisiones que una organización no consigue reducir.

Cada crédito de carbono representa 1 tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂eq) que fue evitada o absorbida por medio de un proyecto certificado. En caso de que una organización compense la totalidad de su huella de carbono correspondiente a un determinado año, puede ser considerada carbono neutro en ese período.

Existen diferentes niveles de compromiso que una autoridad portuaria puede asumir en relación con la compensación de emisiones, de acuerdo con el papel que ejerza, desde facilitar el acceso a créditos de carbono para las diversas organizaciones que actúan en el puerto, hasta generar sus propios créditos de compensación.

Tabla 4 - Papeles de una autoridad portuaria en la compensación de emisiones.

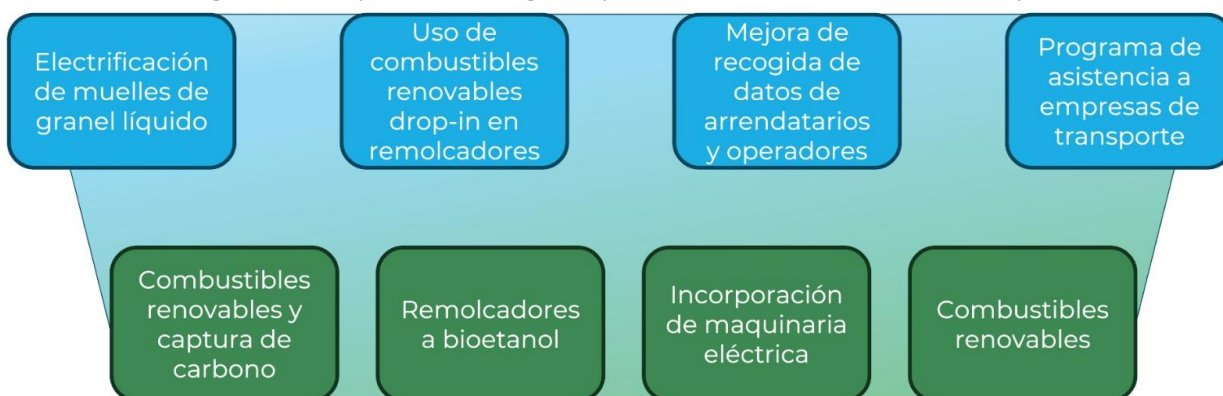
Papel	Promotor	Aglutinador	Facilitador
Descripción	Inversión en proyectos de absorción fuera del entorno portuario	Intermediario entre promotores/corredoras y la comunidad portuaria	Mantenimiento de un portal de compra de créditos de CO ₂ para los usuarios portuarios
Actividades	- Identificación de proyectos - Inversión y mantenimiento - Certificación - Cesión/venta de créditos - Creación y mantenimiento de plataforma de compra y venta	- Identificación de proyectos - Cesión/venta de créditos - Creación y mantenimiento de plataforma de compra y venta	- Creación y mantenimiento de plataforma de compra y venta
Recursos	- Equipo de la autoridad portuaria a tiempo completo - Licitaciones: • Auditorías • Plataforma	- Equipo de la autoridad portuaria a tiempo parcial - Licitaciones: • Promotor/corredora • Plataforma	- Licitación para el desarrollo del mercado

Fuente: Fundación Valenciaport.

6. Plan de acción

El plan de descarbonización del Puerto de Itaquí prevé un objetivo estratégico de actuación para cada uno de los segmentos de corto (2025-2035) y largo plazo (2035-2050). En el corto plazo, se proponen acciones que tengan en cuenta tecnologías ya disponibles para buques y remolcadores, combinadas con acciones suaves en terminales y transporte terrestre. A largo plazo, se propone aumentar la presencia de combustibles renovables y electrificación.

Figura 43 - Principales acciones sugeridas para la descarbonización del Puerto de Itaquí.



Fuente: Fundación Valenciaport.

6.1. Acciones identificadas EMAP

Las posibles acciones fueron discutidas en colaboración con varios departamentos de la EMAP y fueron tenidas en cuenta en las acciones del plan.

- Descuento (Bonificación)
 - Relacionado con el ISP (Índice de Sostenibilidad Portuaria).
 - Bonificación vía concesión u tarifa.
- Abordar criterios de sostenibilidad en las próximas licitaciones.
- Implementación de sistemas para suministro de energía a embarcaciones atracadas (OPS).
- Definir puntos de desempeño y actuación con vistas a mejoras sostenibles en el puerto.
- Implementación de un sistema de gestión de escalas.
 - Reglas claras para atraque y operación.
 - VTMISS.
- Inclusión de los ferrys boats en los sistemas de gestión y sostenibilidad.
- Ampliación de la flota sostenible EMAP.

6.2. Buques

OPS en terminales de granel líquido

Se recomienda la electrificación de los muelles de granel líquido. El estándar OPS (IEC/IEEE 80005-1) recomienda infraestructura de suministro eléctrico en media tensión para demandas de potencia superiores a 1 MVA. Sin embargo, para demandas superiores a 500 kW, considerando el aumento en el porte de los buques y la posible conversión de las calderas a sistemas eléctricos, este estudio recomienda la infraestructura de suministro OPS en media tensión (6,6 kV). La siguiente tabla presenta los valores de potencia estimados para cada muelle, junto con los datos de arqueo bruto (Gross Tonnage) y eslora de los buques que hicieron escala en el año 2022.

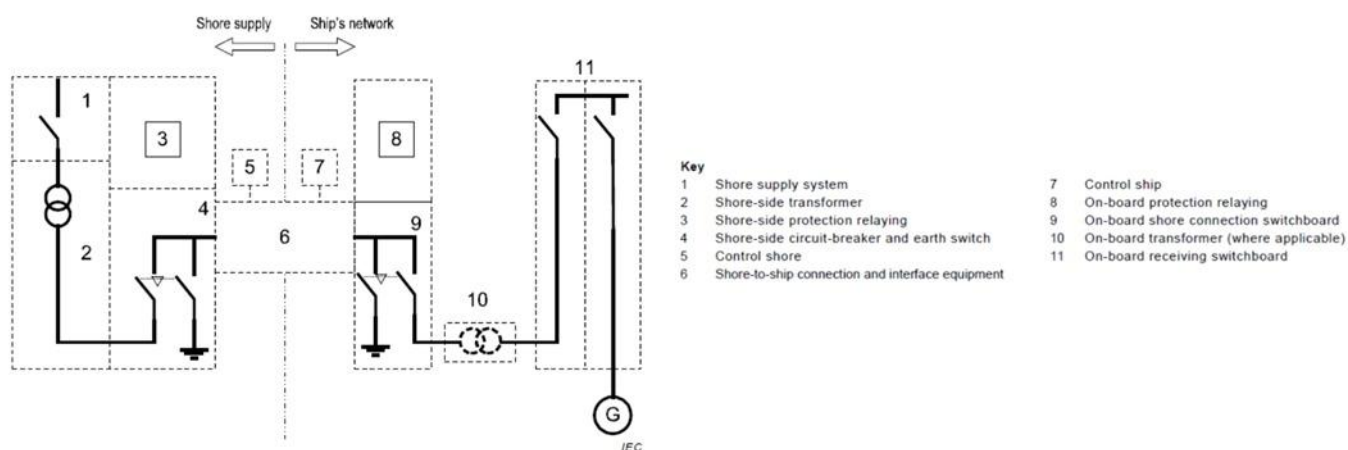
Tabla 5 - Datos de los buques de granel líquido que hicieron escala en los muelles 104, 106 y 108 en el año 2022.

Muelle	Escalas	P_{aux} (kW)	$P_{boilers}$ (kW)	P_{total} (kW)	GT	Eslora (m)
104	181	790	1350	2140	14900-36200	162-184
106	97	800	4000	4800	57000-66000	243-252
108	120	790	1350	2140	12700-54100	164-230

Fuente: Fundación Valenciaport

La capacidad total mínima requerida es de 9,08 MW, lo que, considerando el componente de potencia reactiva, alcanza un valor de $9,08/0,8 =$ aproximadamente 11,35 MVA.

Figura 44 - Esquema general de conexión OPS en media tensión.



Fuente: IEC 80005-1. High Voltage Shore Connection. General Requirements.

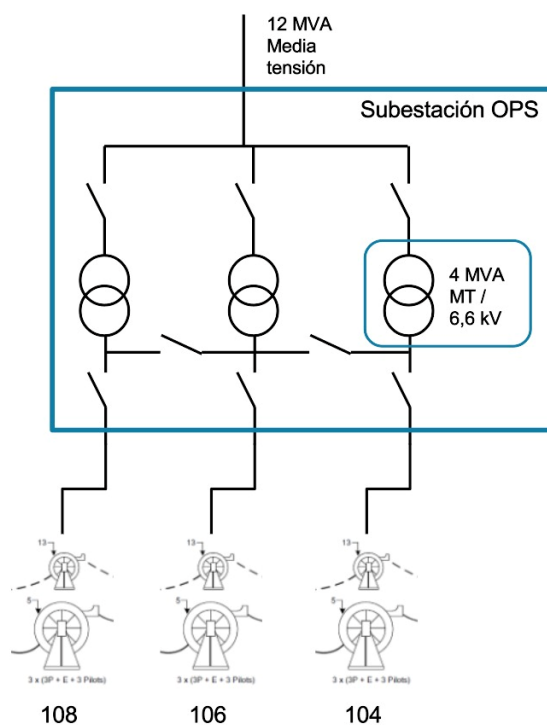
La norma IEC/IEEE 80005-1 HVSC (High Voltage Shore Connection) indica, en su Anexo F de requisitos adicionales para buques tanque, que la conexión al buque debe realizarse con tres cables. Cada cable debe tener tres fases, tierra y tres líneas piloto. Cada cable también debe tener una capacidad nominal de 3,6 MVA. A montante de la conexión, la subestación transformadora para la alimentación de 6,6 kV debe tener una capacidad nominal mínima de 11,35 MVA en total.

Infraestructura OPS necesaria para la electrificación de muelles de graneles líquidos. Se propone la instalación de una única subestación OPS, con capacidad nominal de 12 MVA, para abastecer OPS en los tres muelles (104, 106 y 108). La instalación requiere una línea de alimentación de media tensión con 12 MVA de potencia contratada.

Se recomiendan las siguientes características para la subestación OPS:

- La subestación debe incluir al menos tres transformadores, puestos a tierra, para garantizar el aislamiento galvánico en las tres líneas de alimentación para los muelles.
- Además, debe incluir un cuadro de distribución para operación y protecciones.
- Si la red eléctrica de los buques está a 60 Hz, no es necesario un convertidor de frecuencia.
- Opción de incluir direccionamiento para permitir que la potencia total sea utilizada en uno, dos o tres muelles simultáneamente.

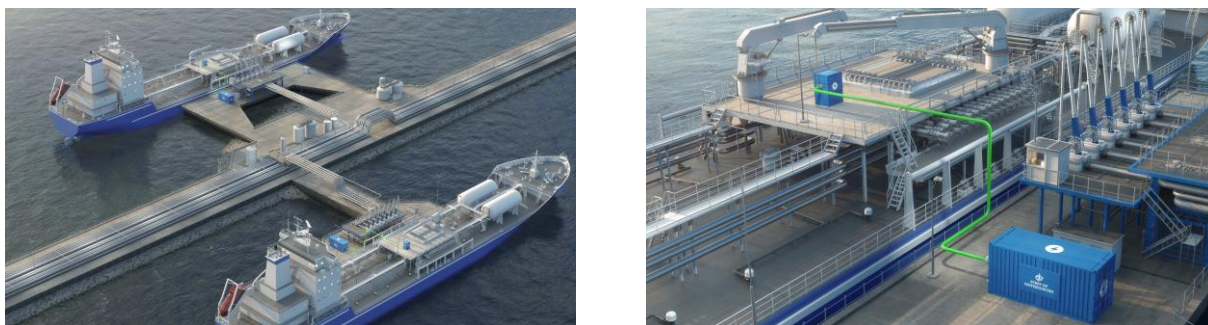
Figura 45 - Esquema simplificado de infraestructura eléctrica para suministro de OPS a los muelles 104, 106 y 108.



Fuente: Fundación Valenciaport.

El potencial de reducción de emisiones de la electrificación de los muelles 104, 106 y 108 depende del porcentaje de instalación de OPS en buques y de la electrificación de calderas. Suponiendo que los muelles en 2022 hayan sido utilizados en todo su potencial, el potencial máximo de reducción llegará a 40,2 kt (8,5 kt de generadores auxiliares y 31,7 kt de calderas).

Figura 46 - Ejemplo de instalación OPS para buques tanque: Proyecto The Green Cable para buques tanque en el Puerto de Gotemburgo.



Fuente: Port of Gothenburg.¹⁵

Presupuesto

En Europa, el costo de la instalación del sistema OPS, desde la subestación OPS hasta el sistema de gestión de cables en el muelle, es de aproximadamente 900 mil euros por MVA instalado, incluyendo convertidor de frecuencia. En caso de que el convertidor no sea necesario, el costo puede reducirse a la mitad: 450 mil euros por MVA instalado. Por lo tanto, para la instalación propuesta, el presupuesto sería:

$$12 \text{ MVA} \times 450 \text{ k€} = 5,4 \text{ M€}$$

Este cálculo no incluye la línea de alimentación de media tensión. La infraestructura incluida es desde la subestación OPS hasta los sistemas de gestión de cables en los tres muelles.

Otras Acciones

Se recomienda comenzar con la mejora de la recolección de datos en la solicitud de escalas (preparación para OPS y combustible consumido) y mejorar la gestión de las escalas. En un segundo momento, será necesario actualizar la red eléctrica con la instalación de una red de media tensión, lo que requerirá un estudio detallado de la red. Finalmente, es necesario buscar beneficios para las navieras que utilicen opciones descarbonizadas o un sistema de prioridad de escala.

Tabla 6 - Lista de acciones para buques.

#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial de reducción/año (kt CO ₂)	Início	Fin	Departamento
N1	Mejora en la recolección de datos de las escalas	0,6	0	1M26	2M26	Operaciones, Digitalización

¹⁵ <https://www.portofgothenburg.com/about/projects/ops-tankers/>

#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial de reducción/año (kt CO ₂)	Início	Fin	Departamento
N2	Implementación de un sistema de gestión de las escalas	0,3	0	2M26	1M27	Operaciones, Digitalización
N3	Investigación de preparación de la red eléctrica de Itaqui	2	0	2M26	1M27	Infraestructuras
N4	Red de media tensión (12 MW)	35	0	2M26	2M27	Infraestructuras
N5	Electrificación de muelles de graneles líquidos	33,2	15,6	1M27	2M28	Infraestructuras
N6	Descuento de tarifa para buques que usan combustibles renovables	14	3,5	1M27	2M40	Operaciones
N7	Sistema de prioridad de escala para buques de bajo carbono	0,24	1,3	1M27	2M50	Operaciones

Fuente: Fundación Valenciaport.

Las acciones N5 y N6 deben considerarse con dos niveles de ambición en la definición de escenarios. En el escenario conservador, la acción N5 considerará solo la electrificación del muelle 104, mientras que en el escenario optimista tanto el muelle 104 como el 106 serán electrificados. Para la acción N6, se consideran diferentes resultados obtenidos por la reducción de tarifas. En el escenario conservador, las reducciones alcanzadas son del 2,5%, mientras que en el escenario optimista son del 5%.

Una parte significativa de las emisiones de los buques proviene de la zona de fondeo (en 2022 fueron de 95,8 kt CO₂eq, principalmente debido a los graneles sólidos). Aunque es discutible si es un área donde se recomiendan acciones, se presentan dos opciones que pueden ser de interés y se identifica el potencial de ahorro. En el caso de las zonas de anclaje 4, 5 y 7, seleccionando buques con calado inferior a 11 m, las emisiones totales son de 9,05 kt CO₂eq.

Tabla 7 - Acción propuesta para buques en el área de fondeo.

#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial de reducción/año (kt CO ₂)	Início	Fin	Departamento
N0	OPS para buques fondeados	18/30	2,8	1M40	2M50	Infraestructuras

Fuente: Fundación Valenciaport.

Para estas áreas de fondeo más próximas al puerto, se proponen soluciones basadas en “power-barge”:

Solución BlueBARGE:

- Suministro máximo por escala: energía utilizada por generadores auxiliares fondeados – capacidad máxima de suministro (35 MWh).
- Una barcaza solo puede atender a una embarcación a la vez, luego recargar o cambiar la batería.
- Las emisiones resultantes del consumo de auxiliares para buques con calado inferior a 11 m son de 2,34 kt CO₂. El máximo que podría reducirse es 2,79 kt CO₂. Esto equivale al 2,95% del total de emisiones de CO₂eq en la zona de fondeo por año.

Solución Elemental:

- Suministro máximo por escala: energía utilizada por generadores auxiliares fondeados – capacidad máxima de suministro (48 MWh).
- Una barcaza solo puede atender a una embarcación a la vez y, posteriormente, reabastecerse de H₂.
- Las emisiones resultantes del consumo de auxiliares para buques con calado inferior a 11 m son de 1,73 kt CO₂. El máximo que podría reducirse es 3,46 kt CO₂eq. Esto equivale al 3,61% del total de emisiones de la zona de fondeo por año.

6.3. Remolcadores

Al promover sistemas antifouling, es posible mejorar el rendimiento de los remolcadores. Esto requiere la implementación de un sistema de inspección y certificación para validar el ahorro obtenido.

- **Monitoreo**
 - Uso de sensores en el casco para medir la acumulación de organismos marinos.
 - Análisis de históricos
- **Reducción de Emisiones**
 - Depende de la tecnología: 5% (básico) y 12% (silicona de baja fricción).
 - Ahorros de hasta 3700 t anuales (12% del consumo).
- **Costos Asociados**
 - Cámaras de inspección (R\$ 58 mil).
 - Personal, para inspección.
 - Descuentos en las tasas portuarias.
- **Evaluación**
 - Certificación *antifouling* con histórico de consumos por maniobra.

Se estima que será necesario que 6 nuevos remolcadores estén en operación hasta 2040. Aunque la flota actual es bastante numerosa, lo que implica un bajo número de maniobras por remolcador, es preciso considerar la posibilidad de que los remolcadores también operen en la terminal de Ponta da Madeira y en Alumar, lo que reduce la jornada disponible. Si es posible aplicar criterios de sostenibilidad en los nuevos concursos de servicios portuarios, se puede proponer que las nuevas adquisiciones sean de cero emisiones. Con base en datos de costo de remolcadores eléctricos adquiridos en 2022 por la empresa Saam Towage, entre US\$ 8,8 millones y US\$ 12 millones,

se supone un valor de US\$ 10 millones por remolcador, lo que puede implicar un sobre costo del 100%. El potencial de reducción de emisiones sería de aproximadamente 1000 toneladas por remolcador.

Tabla 8 - Estimación de Maniobras/Remolcador.

Año	Escalas	Maniobras reb.	#Reb.	Man./Reb.
2022	997	4543	24	190
2040	1445	6584	30	220

Fuente: Fundación Valenciaport.

Tabla 9 - Estimación de Consumo con Remolcadores Eléctricos.

MDO (tn)	CO ₂ (tn)	
9153,113	29344,88	Sin electrificación
7322,49	23475,90	6 Remolcadores eléctricos

Fuente: Fundación Valenciaport.

A corto plazo, se propone la mejora del rendimiento mediante la promoción del *antifouling* y la electrificación durante la espera. A medio plazo, la actividad será descarbonizada de acuerdo con la estrategia de la OMI.

Tabla 10 - Acciones Propuestas para la Descarbonización del Sector

#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial de reducción/año (kt CO ₂)	Inicio	Fin	Departamento
R8	Grupo de trabajo para la descarbonización de remolcadores	0,78	0,55	2M25	2M40	Medio Ambiente
R9	Potencial de reducción/año	0,26	3,34	2M26	2M27	Medio Ambiente/ Operaciones
R10	Suministro de electricidad durante la espera	3,15	1,59	1M27	2M27	Medio Ambiente

Fuente: Fundación Valenciaport.

6.4. Terminales

Las emisiones de las operaciones de carga y descarga representan una pequeña fracción de las emisiones totales del puerto, pero todavía existe margen para reducir las emisiones de los operadores. Para que un plan de descarbonización sea exitoso y sus acciones efectivas, es fundamental involucrar a toda la comunidad portuaria. Los operadores necesitan comprometerse a desarrollar iniciativas que reduzcan las emisiones de sus actividades. En este sentido, se propone la creación de una comunidad colaborativa dedicada a la mejora de la recolección de datos (como consumo de combustible, emisiones e inventario de equipos, entre otros) y a la divulgación del plan de descarbonización. Esta comunidad también puede trabajar en el desarrollo de acciones de capacitación y en la promoción de alternativas tecnológicas de baja emisión, entre otras iniciativas.

Las primeras fases del proceso deben concentrarse en la formación de esta comunidad cooperativa, siendo la difusión del plan de descarbonización la etapa inicial. Acciones como la capacitación, la identificación de alternativas

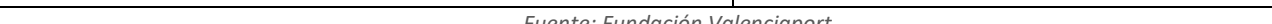


Tabla 11 - Acciones propuestas para operadores portuarios.

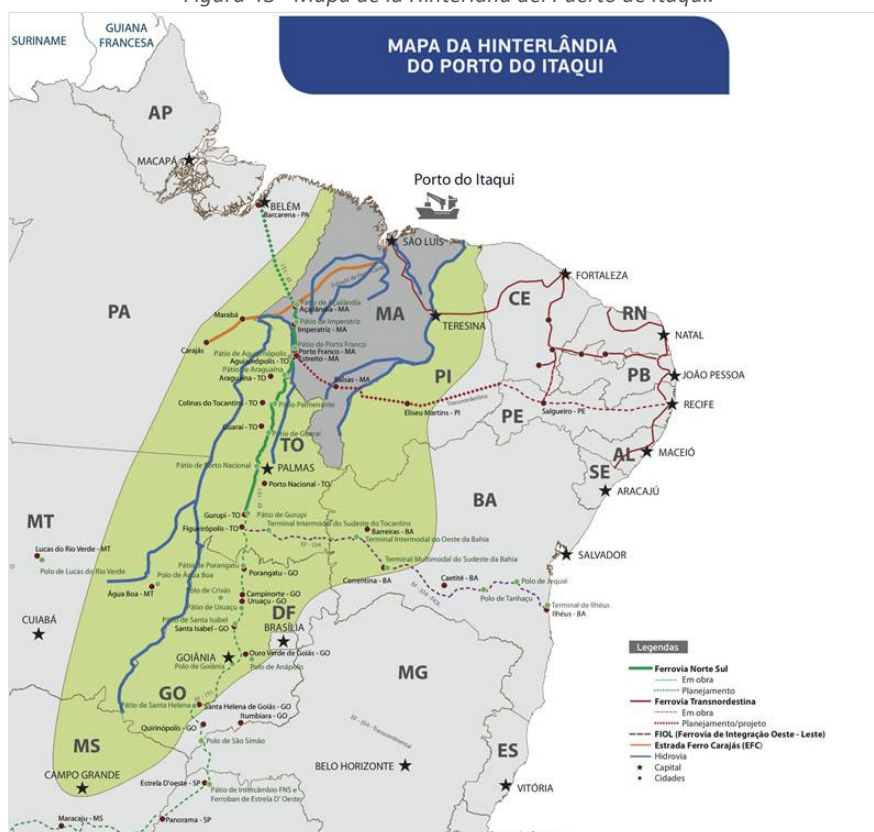
#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial reducción/año (kt CO ₂)	Inicio	Fin	Departamento
T11	Creación de la comunidad de colaboración (Mejora de la recolección de datos, inventario, catálogo y capacitación)	1,3	0,2	1M26	2M50	Medio Ambiente
T12	Separación de los medidores de electricidad de cada terminal/operador de los de EMAP	0,2	0,01	1M26	2M26	Infraestructuras
T13	Incentivo al uso de electricidad renovable (con certificado))	57,5	0,2	1M28	2M50	Medio Ambiente
T14	Incentivos económicos para operadores y terminales (reducción de tasas/tarifas) por el uso de combustibles de baja emisión	42	1,9	1M30	2M50	Medio Ambiente
T15	Instalación de punto de recarga para camiones	3,3	0,2	1M28	2M28	Infraestructura y Energía

Fuente: Fundación Valenciaport.

6.5. Camiones

Dado el impacto relativamente bajo de los camiones en la huella de carbono total, sumado a la falta de caracterización específica del sector y a la complejidad de la transición tecnológica, se recomiendan acciones graduales a corto plazo. En paralelo, se sugiere la experimentación de nuevas tecnologías, considerando las limitaciones actuales de la infraestructura de abastecimiento.

Figura 48 - Mapa de la Hinterland del Puerto de Itaqui.



Fuente: Porto do Itaqui.¹⁶

Figura 49 - Camión a GNL de Virtu GNL en operación en el Puerto de Itaqui.



Fuente: Porto do Itaqui.

Los primeros pasos definidos buscan mejorar el conocimiento sobre el sector y el apoyo brindado por EMAP. A continuación, las acciones se concentrarán en facilitar el acceso a la electricidad y a los combustibles renovables. La electrificación pura será interesante para trayectos cortos, mientras que para otras rutas la mejor opción son los combustibles *drop-in* (diésel).

¹⁶ <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/planejamento-desenvolvimento/novos-negocios>

Tabla 12 - Acciones propuestas para la descarbonización del transporte terrestre asociado al Puerto de Itaquí

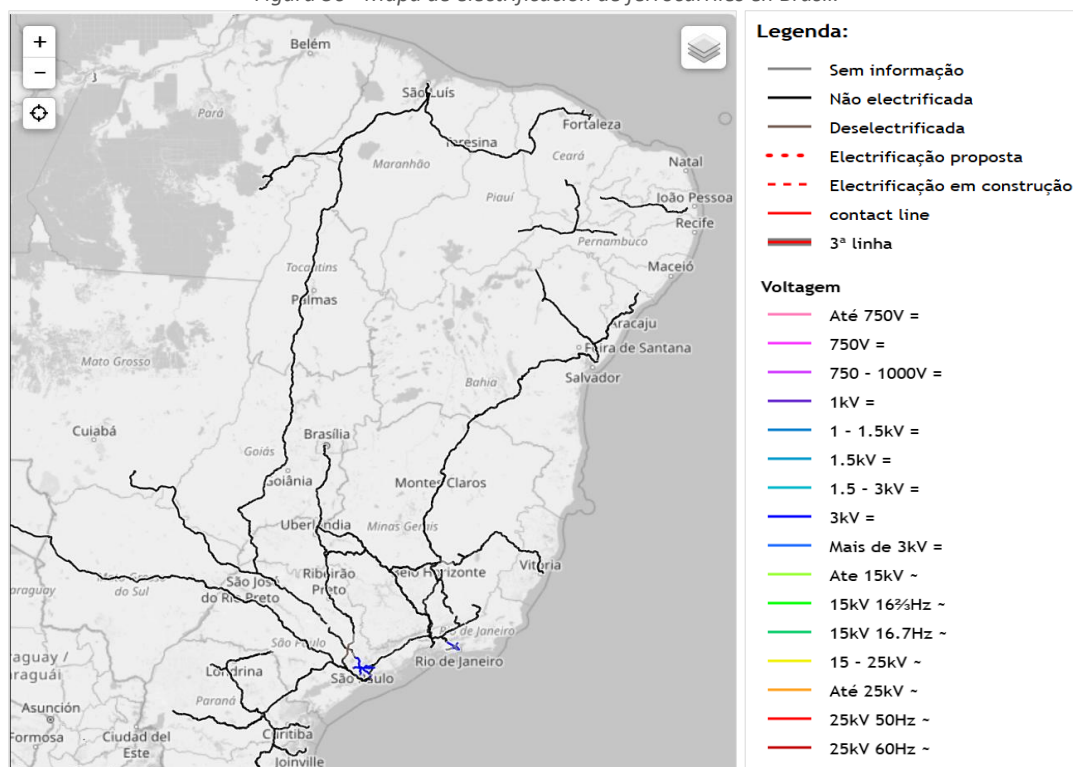
#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial de reducción/año (kt CO ₂)	Início	Fin	Departamento
C16	Grupo de trabajo del transporte terrestre + sector agrícola.	0,78	0,04	2M25	2M40	Logística y Transporte
C17	Estudio de la hinterland y potencial de corredores verdes.	0,5	0	2M26	2M27	Planificación Estratégica
C18	Esquema de categorización y etiquetas verdes para camiones	1,35	0,1	1M27	2M40	Medio Ambiente
C19	Acuerdo con empresa de energía para el suministro de combustible renovable en el entorno portuario	288	0,1	1M27	2M30	Infraestructura y Energía
C20	Oficina de asistencia a las empresas de transporte	5	0,23	1M27	2M30	Medio Ambiente

Fuente: Fundación Valenciaport.

6.6. Ferrocarriles

Considerando el pequeño porte del sector ferroviario, el bajo grado de desarrollo de alternativas tecnológicas y el potencial para aumentar el diálogo entre las operadoras y EMAP, se sugiere concentrar esfuerzos en la comunicación y en la innovación.

Figura 50 - Mapa de electrificación de ferrocarriles en Brasil.



Fuente: OpenRailwayMap.¹⁷

¹⁷ <https://www.openrailwaymap.org/>

Figura 51 - Locomotivas híbridas ZTR.



Fuente: Union Pacific.¹⁸

Se propone trabajar en el perfeccionamiento de las operaciones y en otras acciones de descarbonización por medio de la creación de un grupo de trabajo como un espacio de colaboración.

Tabla 13 - Acción propuesta para la descarbonización de las operaciones ferroviarias en el Puerto de Itaqui.

#	Acción	Presupuesto (MR\$)	Potencial de reducción (kt CO ₂)	Início	Fin	Departamento
F21	Grupo de trabajo de logística y digitalización de las operaciones ferroviarias	0,75	0,06	1M26	2M40	Operaciones

Fuente: Fundación Valenciaport.

6.7. Escenarios

Para evaluar el impacto potencial del plan de descarbonización, se definieron diferentes escenarios de implementación, de acuerdo con el grado de adopción de las medidas propuestas. De las 21 acciones identificadas, se seleccionaron aquellas que presentan un impacto cuantificable en la reducción de emisiones y que permiten modelar dos niveles de ambición: un escenario conservador, que asume una adopción parcial o más gradual de las medidas, resultando en reducciones moderadas de emisiones; y un escenario optimista, que contempla la implementación total de las acciones y las máximas reducciones posibles de las emisiones de GEI.

Además, se incluyen 5 acciones de preparación que, aunque no resultan en reducciones directas de emisiones, son necesarias para viabilizar o facilitar la adopción de medidas más ambiciosas.

La tabla siguiente enumera las diferentes acciones por actividad e indica si ellas fueron consideradas para la fase de preparación (PRE), para el escenario conservador (CON) y/o para el escenario optimista (OPT).

¹⁸ https://www.up.com/aboutup/community/inside_track/ztr-hybrid-locomotives-it-240429.htm

Tabla 14 - Medidas de descarbonización propuestas para el Puerto de Itaquí con sus escenarios.

Actividad	#	Acción	PREP	CON	OPT
Buques	N1	Mejora en la recolección de datos de las escalas			
	N2	Implementación de un sistema de gestión de las escalas			
	N3	Estudio de preparación de la red eléctrica de Itaquí			
	N4	Red de media tensión (12 MW)			
	N5	Electrificación de muelles de graneles líquidos			
	N6	Descuento de tarifa para buques que usan combustibles renovables			
	N7	Sistema de prioridad de escala para buques de bajo carbono			
Remolcadores	R8	Grupo de trabajo para la descarbonización de remolcadores			
	R9	Programas de monitoreo de bioincrustación			
	R10	Suministro de electricidad durante la espera			
Terminales	T11	Creación de la comunidad de colaboración (Mejora de la recolección de datos, inventario, catálogo y capacitación)			
	T12	Separación de los medidores de electricidad de cada terminal/operador de los de EMAP			
	T13	Incentivo al uso de electricidad renovable (con certificado)			
	T14	Incentivos económicos para operadores y terminales por el uso de combustibles de baja emisión			
	T15	Instalación de punto de recarga para camiones			
Camiones	C16	Grupo de trabajo del transporte terrestre + sector agrícola			
	C17	Estudio de la hinterland y potencial de corredores verdes			
	C18	Esquema de categorización y etiquetas verdes para camiones			
	C19	Acuerdo con empresa de energía para el suministro de combustible renovable en el entorno portuario			
	C20	Oficina de asistencia a las empresas de transporte			
Ferrocarriles	F21	Grupo de trabajo de logística y digitalización de las operaciones ferroviarias			

Fuente: Fundación Valenciaport.

6.7.1. Escenario conservador

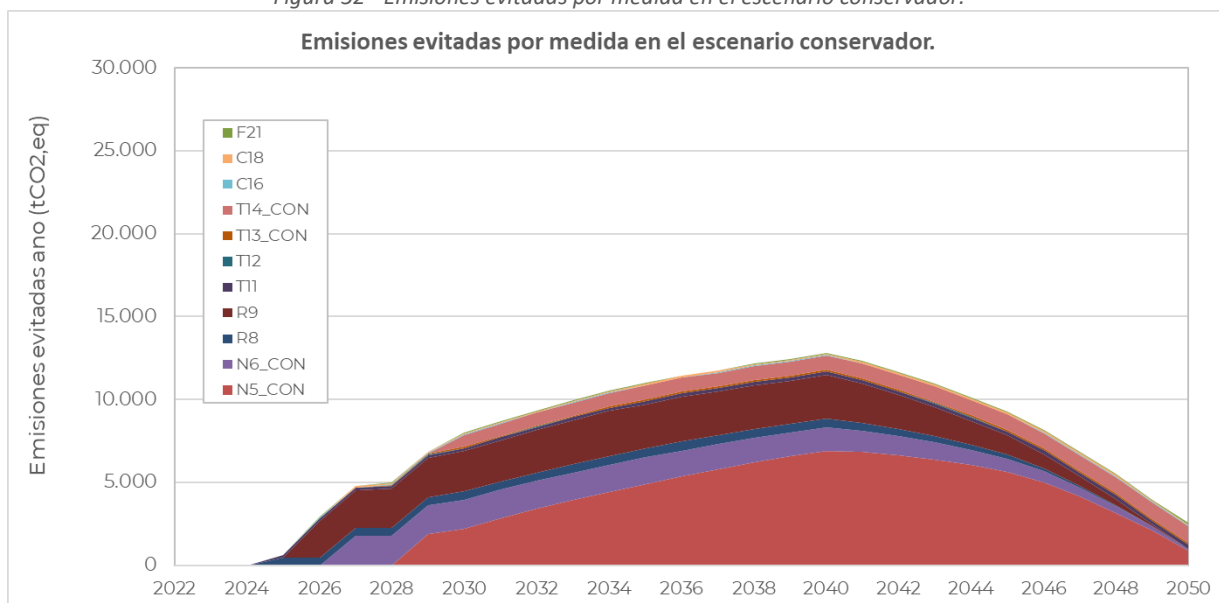
En el escenario conservador, las acciones propuestas resultan en reducciones anuales significativas de emisiones entre 2025 y 2040, alcanzando un pico superior a 25 mil toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂eq) evitadas en 2040, conforme se indica en la Figura 52. A partir de ese hito, el impacto de las medidas dirigidas a buques y remolcadores tiende a disminuir, una vez que gran parte de esas embarcaciones ya habrá adoptado tecnologías de bajo carbono, en línea con las directrices de la Organización Marítima Internacional (OMI).

En este contexto, las acciones dirigidas a los terminales portuarios y al transporte por carretera pasan a ganar relevancia progresiva en la cartera de descarbonización del Puerto de Itaquí, asumiendo un papel estratégico en la continuidad de la trayectoria de mitigación de las emisiones del complejo portuario hasta 2050.

Este escenario representa un avance moderado, pero posiblemente más realista, considerando las limitaciones técnicas, económicas o de gobernanza que pueden retrasar la adopción de determinadas tecnologías o cambios operativos en el Puerto de Itaquí.

El gráfico siguiente presenta las emisiones anuales evitadas por cada medida en el escenario conservador:

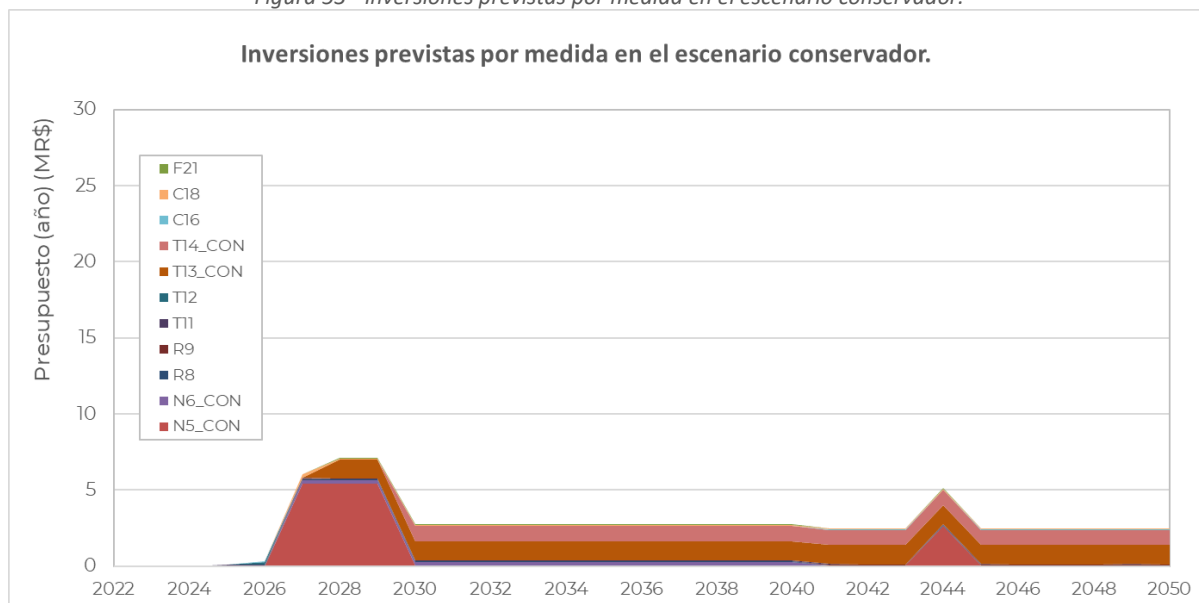
Figura 52 - Emisiones evitadas por medida en el escenario conservador.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Las mayores inversiones están previstas entre 2026 y 2030, alcanzando R\$ 8 millones por año. En 2044, hay un nuevo pico de inversión debido al reacondicionamiento de la instalación de OPS.

Figura 53 - Inversiones previstas por medida en el escenario conservador.

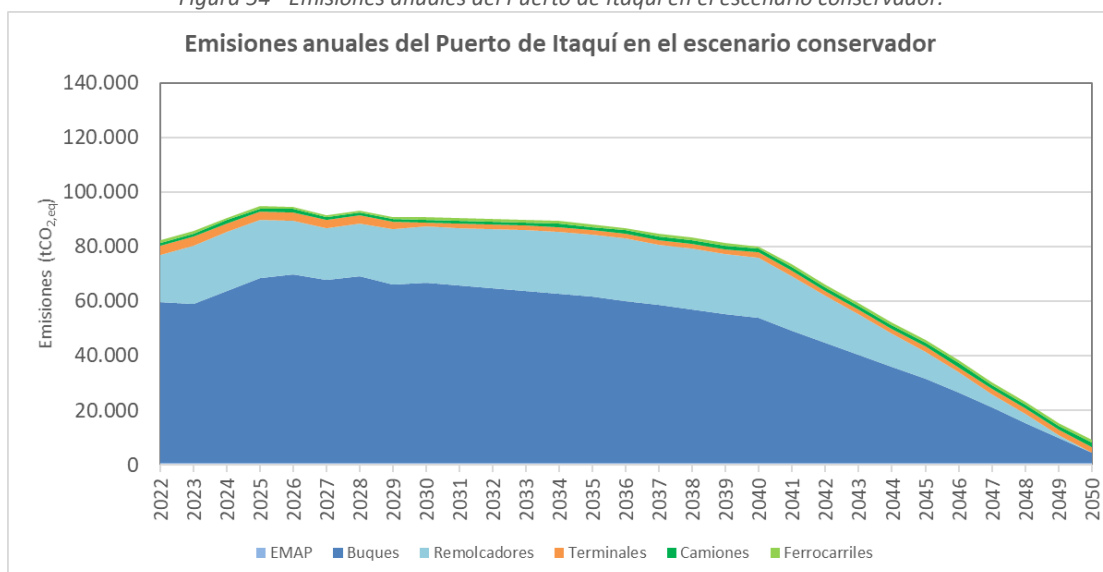


Fuente: Fundación Valenciaport.

Como resultado de la implementación de las medidas de reducción y de las inversiones correspondientes, en el escenario conservador es posible mantener las emisiones anuales del Puerto de Itaqui por debajo de 100 kt de CO₂eq en todo momento, incluso en los años de mayor actividad. Para 2050, las emisiones se reducen a aproximadamente 12 kt, lo que representa una disminución del 17% en comparación con el escenario tendencial (Business as Usual).

Aunque este escenario implique una implementación gradual y más limitada de las medidas propuestas, permite avanzar hacia un modelo portuario más sostenible y resiliente, estableciendo las bases para futuras mejoras.

Figura 54 - Emisiones anuales del Puerto de Itaquí en el escenario conservador.

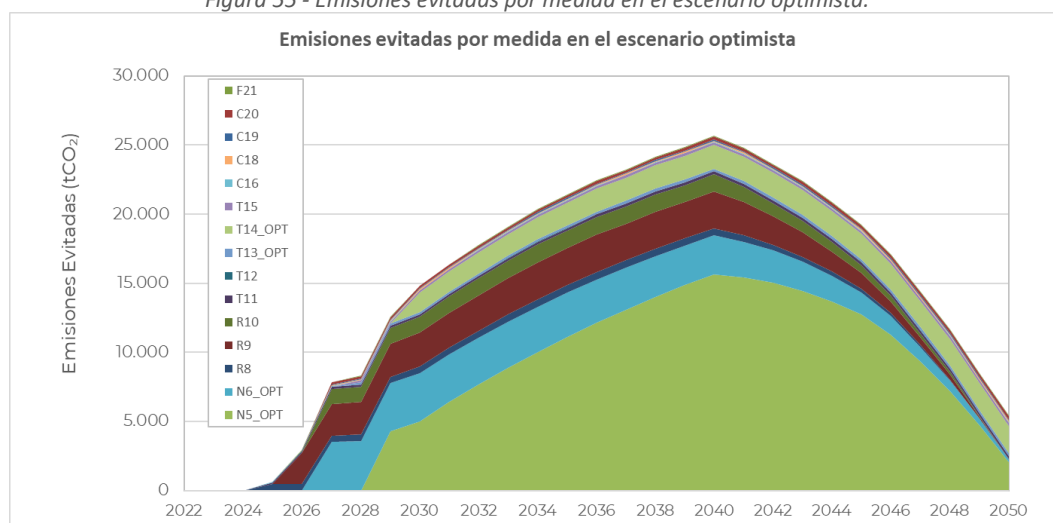


Fuente: Fundación Valenciaport.

6.7.2. Escenario optimista

En el escenario optimista, se considera la adopción amplia y acelerada de las medidas de descarbonización propuestas, con mayor ambición y eficiencia en su implementación. En estas condiciones, la reducción anual de emisiones de GEI alcanza su pico alrededor de 2040, superando las 25 mil toneladas de CO₂ equivalente (ktCO₂eq). A partir de ese punto, se observa una reducción gradual en el ritmo de abatimiento anual, principalmente en función de la transformación progresiva de la flota de buques y remolcadores hacia tecnologías de baja o cero emisión, lo que disminuye el potencial marginal de reducción en esas categorías a medida que las principales fuentes de emisiones son sustituidas u optimizadas.

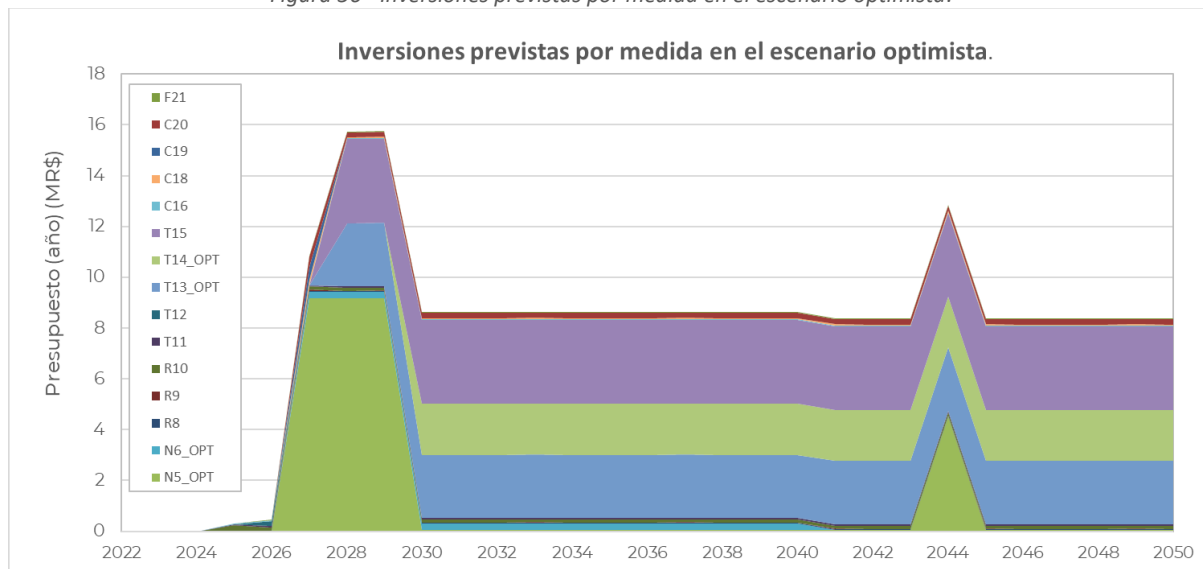
Figura 55 - Emisiones evitadas por medida en el escenario optimista.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Los mayores investimentos están previstos entre 2026 y 2030, superando los R\$ 24 millones anuales. En 2044, hay un nuevo pico de inversión debido al reacondicionamiento de la instalación de OPS. A partir de 2026, la inversión anual necesaria supera los R\$ 11 millones.

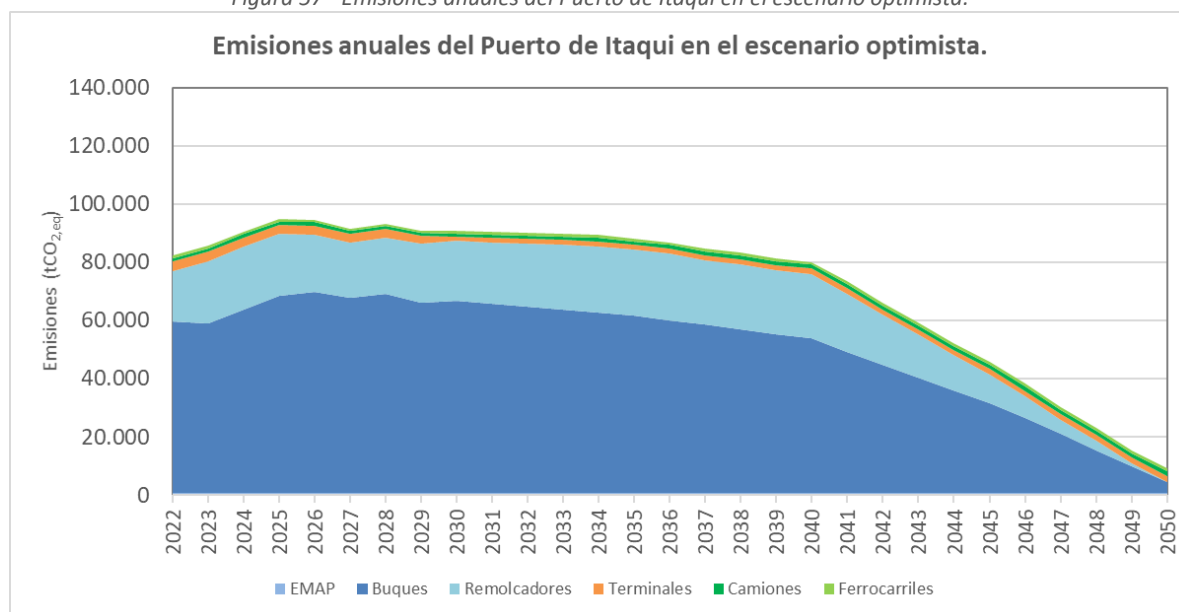
Figura 56 - Inversiones previstas por medida en el escenario optimista.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Como resultado de una implementación más decidida de las medidas de descarbonización propuestas, las emisiones del puerto comienzan a disminuir de forma continua a partir de 2026. En 2050, las emisiones anuales se reducen a aproximadamente 9 kt de CO₂eq, lo que representa una disminución significativa en relación con el escenario tendencial (Business as Usual — BaU) y evidencia el impacto que puede alcanzarse mediante una estrategia ambiciosa de descarbonización.

Figura 57 - Emisiones anuales del Puerto de Itaquí en el escenario optimista.

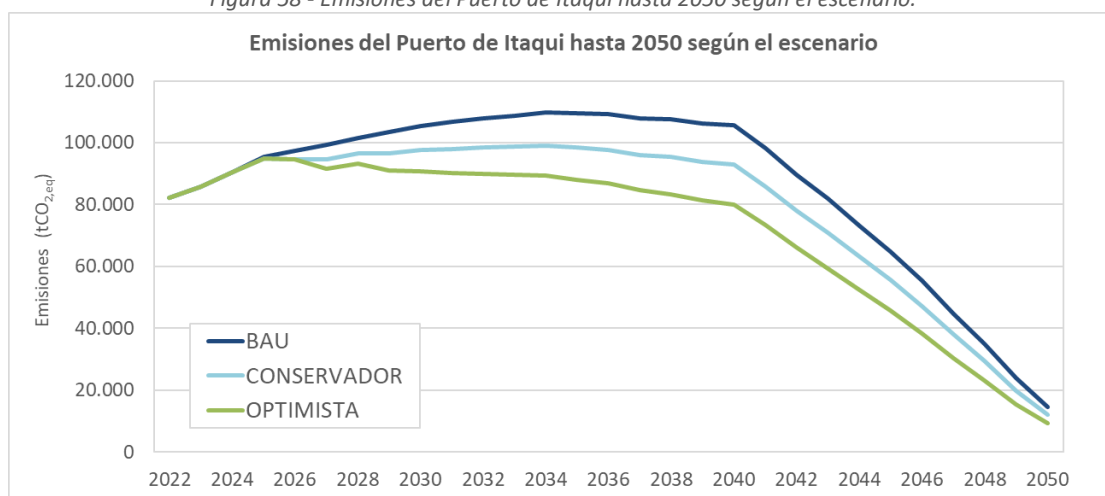


Fuente: Fundación Valenciaport.

6.7.3. Comparación de escenarios

El gráfico a continuación muestra la evolución de la huella de carbono del Puerto de Itaquí conforme al escenario Business as Usual, implementación de medidas en los escenarios conservador y optimista. Se observa que el escenario conservador logra mantener un nivel de emisiones constante, a pesar del aumento de la actividad, hasta 2040, año a partir del cual ocurre una reducción significativa impulsada por la descarbonización del sector marítimo. Por su parte, el escenario optimista prevé reducciones a partir de 2026, que también ganarán velocidad a partir de 2040.

Figura 58 - Emisiones del Puerto de Itaquí hasta 2050 según el escenario.



Fuente: Fundación Valenciaport.

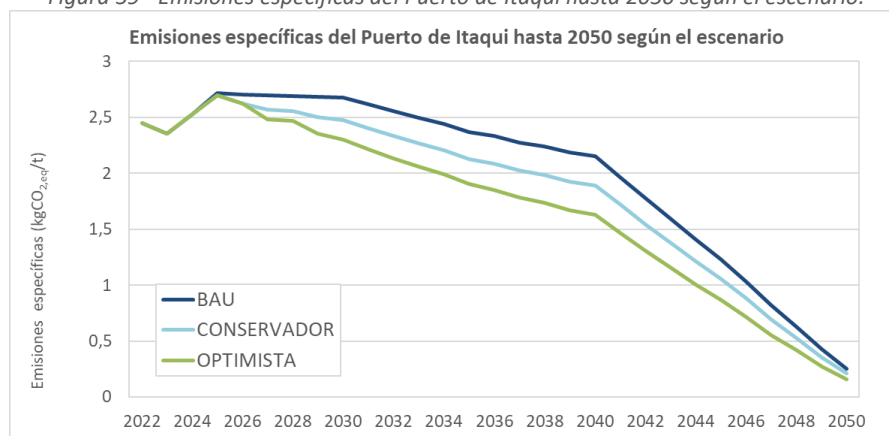
Tabla 15 - Reducción de emisiones del Puerto de Itaquí por escenario.

Año	% ReducciónCO ₂ (2022 referencia)		
	Bau	Conservador	Optimista
2035	-33,2	-19,9	-7,2
2040	-28,7	-13,1	2,5
2045	21,0	32,3	44,4
2050	82,2	85,3	88,8

Fuente: Fundación Valenciaport

En el escenario de mantenimiento de las prácticas actuales (BaU), se observa una tendencia de estabilidad en las emisiones, con inicio de un descenso gradual a partir de 2030. En los escenarios conservador y optimista, los descensos ocurren de forma más acelerada.

Figura 59 - Emisiones específicas del Puerto de Itaquí hasta 2050 según el escenario.



Fuente: Fundación Valenciaport.

6.7.4. VAN

Ocho de las acciones resultan en VAN positivo, destacándose aquellas orientadas a buques y remolcadores como las de mejor desempeño.

El Valor Actual Neto (VAN) es una métrica financiera ampliamente utilizada en análisis de inversión para estimar la rentabilidad de una acción o proyecto a lo largo del tiempo. En el contexto del Plan de Descarbonización, el VAN representa el saldo entre los beneficios económicos esperados (como ahorro de combustible, incentivos fiscales o reducción de costos operativos) y las inversiones necesarias, traídos a valor presente con base en una tasa de descuento definida. Un VAN positivo indica que la acción genera un retorno superior a su costo de capital, siendo, por lo tanto, financieramente viable.

En este estudio, ocho de las acciones evaluadas presentaron VAN positivo, con destaque para aquellas orientadas a buques y remolcadores, que se mostraron las más eficientes desde el punto de vista económico y climático. Estas iniciativas combinan un alto potencial de reducción de emisiones de GEI con viabilidad financiera, lo que las posiciona como elementos clave de la estrategia de descarbonización del Puerto de Itaquí.

Tabla 16 - VAN Positivo.

Ámbito	Acción	Nombre	VAN (MR\$)
Buques	N5 Optimista	Electrificación de muelles de graneles líquidos	R\$ 26,14
Remolcadores	R9	Grupo de trabajo para la descarbonización de remolcadores	R\$ 12,54
Buques	N5 Conservador	Electrificación de muelles de graneles líquidos	R\$ 8,74
Buques	N7	Sistema de prioridad de escala para buques con tecnología de bajo carbono	R\$ 7,29
Remolcadores	R10	Suministro de electricidad durante la espera	R\$ 5,45

Ámbito	Acción	Nombre	VAN (MR\$)
Buques	N6	Descuento de tarifa para buques que usan combustibles renovables	R\$ 5,37
Remolcadores	R8	Programas de monitoreo de bioincrustación	R\$ 2,38
Terminales	T11	Creación de la comunidad de colaboración	R\$ 0,50

Fuente: Fundación Valenciaport.

En el escenario conservador, adoptando una tasa media de descuento del 8% anual, se observa que ocho acciones presentan Valor Actual Neto (VAN) positivo, lo que indica viabilidad económica y una contribución relevante para la estrategia de descarbonización. Estas acciones están representadas en la Curva Marginal de Costo de Abatimiento (MACC) de la Figura 60 y se concentran, en su mayoría, en los ámbitos de buques y remolcadores.

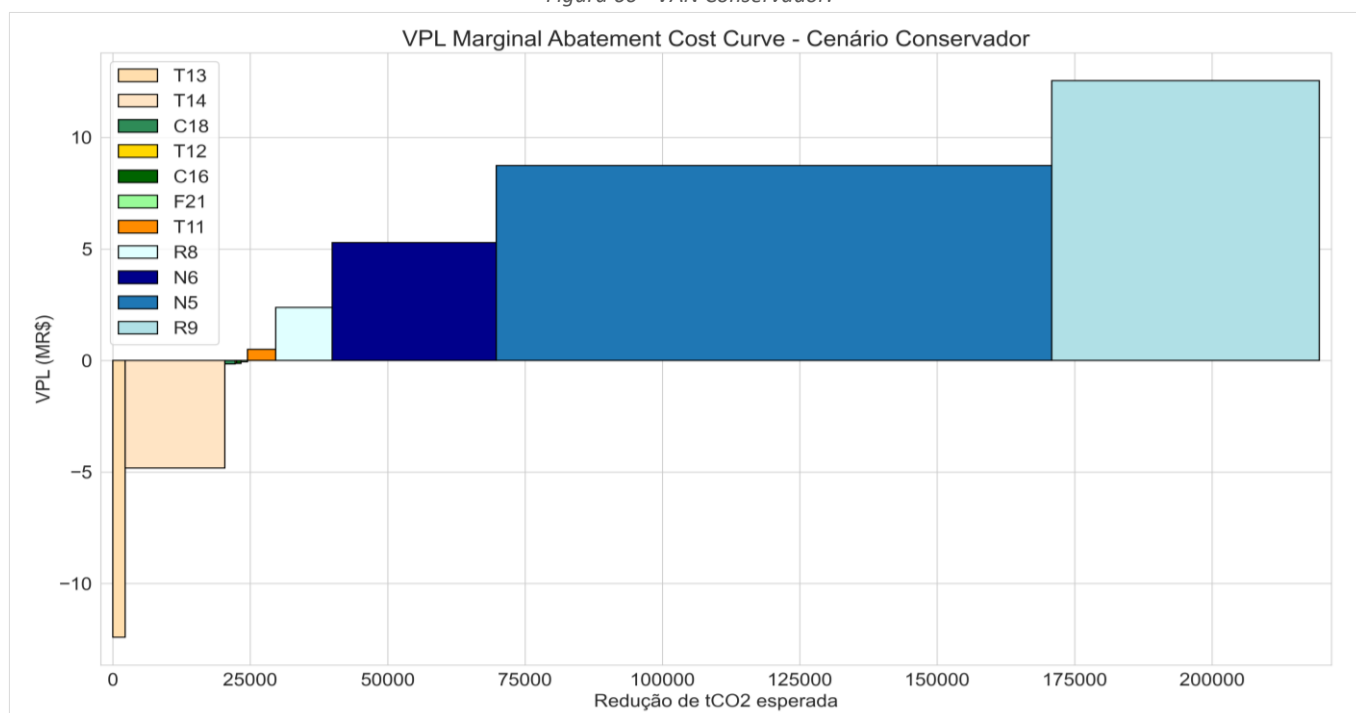
Las tres iniciativas con mayor destaque en este escenario son:

- N5 – Electrificación de muelles de graneles líquidos;
- R9 – Creación de grupo de trabajo para la descarbonización de remolcadores, con VAN de R\$ 12,54 millones;
- N6 – Descuento de tarifa para buques que utilizan combustibles renovables, con VAN de R\$ 5,37 millones.

Estas tres acciones concentran, de forma significativa, tanto el mayor volumen de reducción potencial de emisiones de CO₂ equivalente (tCO₂eq) como el mayor retorno financiero neto estimado, lo que las posiciona como prioritarias para su implementación en el corto y mediano plazo.

Otras cinco acciones también presentan VAN positivo, aunque con menor impacto individual, reforzando el papel de soluciones complementarias en el portafolio de mitigación. El análisis evidencia que los modos marítimos (buques y remolcadores) siguen siendo los principales objetivos estratégicos para la descarbonización, tanto por su participación en la huella de carbono como por la oportunidad de retorno financiero sobre las inversiones.

Figura 60 - VAN Conservador.



Fuente: Fundación Valenciaport.

En el escenario optimista, que considera una mayor eficiencia en la implementación de las medidas y contextos favorables de mercado y regulación, se observa un aumento expresivo tanto en el potencial de reducción de emisiones de GEI como en los valores de retorno económico (VAN) de las acciones evaluadas.

La Curva Marginal de Costo de Abatimiento (MACC) de la Figura 61 demuestra que, al igual que en el escenario conservador, las acciones con mayor impacto están fuertemente concentradas en los modos marítimos – buques y remolcadores.

Las cinco acciones con VAN positivo más elevado en este escenario son:

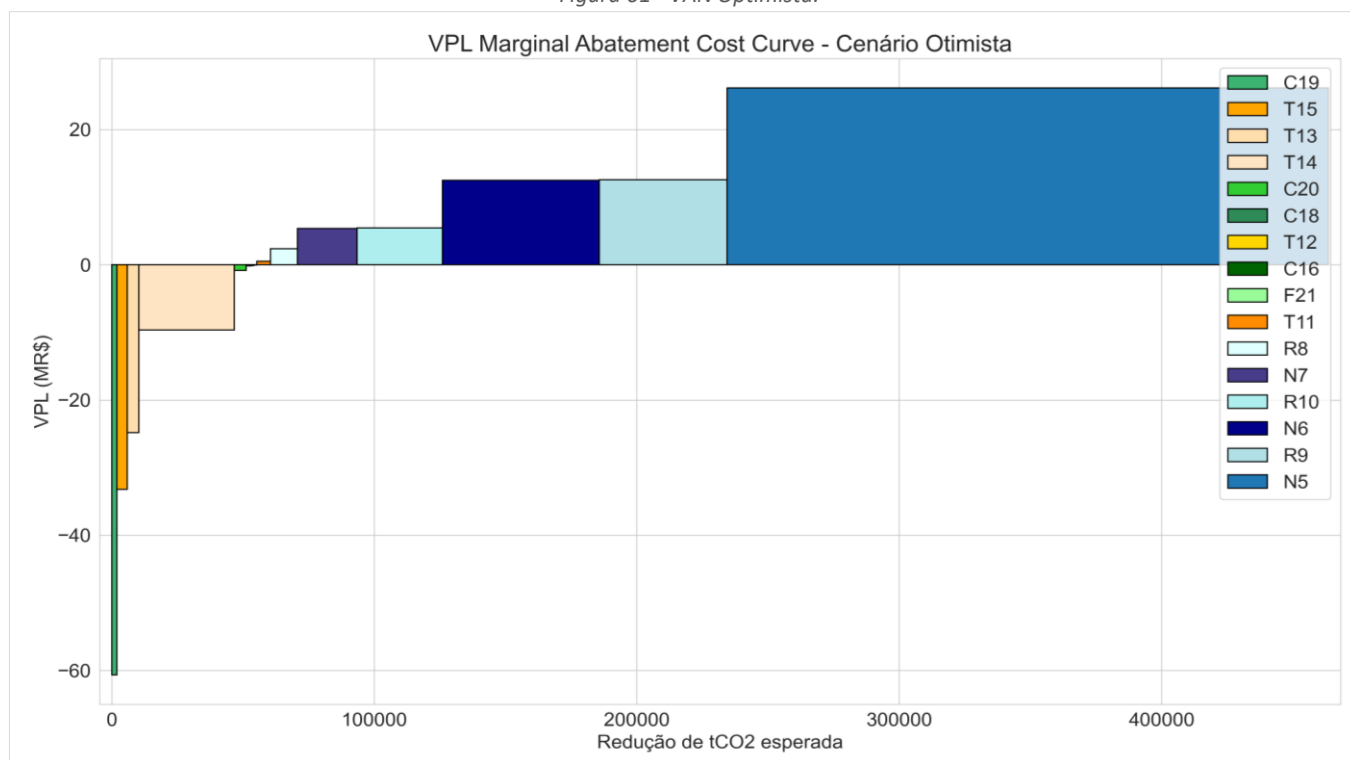
- N5 – Electrificación de muelles de graneles líquidos, con el mayor VAN y potencial de reducción de emisiones entre todas las medidas evaluadas;
- R9 – Grupo de trabajo para la descarbonización de la flota de remolcadores;
- N6 – Descuento de tarifa para buques que utilizan combustibles renovables;
- R10 – Suministro de electricidad durante la espera de los remolcadores;
- N7 – Sistema de prioridad de escala para buques con tecnología de bajo carbono.

Estas acciones se destacan por combinar viabilidad económica positiva con un elevado potencial de mitigación de emisiones (tCO₂eq), consolidándose como las estrategias más eficaces del portafolio técnico analizado.

A diferencia del escenario conservador, el escenario optimista amplía el volumen de reducción esperado, superando las 400 mil tCO₂eq — y mejora el desempeño financiero de diversas acciones, incluso de iniciativas que en el escenario anterior presentaban retorno neutro o negativo.

Este análisis refuerza la importancia de los incentivos institucionales, los marcos regulatorios y las sinergias operacionales para viabilizar un ambiente más propicio para la adopción de estas tecnologías, permitiendo a la autoridad portuaria y a sus operadores extraer el máximo valor de las estrategias de descarbonización.

Figura 61 - VAN Optimista.



Fuente: Fundação Valenciaport.

6.8. Compensación

Aunque los esfuerzos de descarbonización permiten reducir significativamente las emisiones del Puerto de Itaquí, siempre habrá un remanente de emisiones de difícil eliminación, en función de la naturaleza operacional de determinadas actividades portuarias. Para que el puerto alcance la neutralidad climática y se convierta en una infraestructura con emisiones netas cero hasta 2050, será necesario complementar las medidas de mitigación con acciones de compensación.

Esto implica inversiones en proyectos capaces de evitar o remover de la atmósfera una cantidad equivalente de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a las emisiones residuales.

De acuerdo con los escenarios analizados, el costo anual estimado para la compensación de las emisiones residuales en 2050 sería de aproximadamente R\$ 11,6 millones en el escenario conservador y R\$ 8,8 millones en el escenario optimista, considerando los resultados proyectados de emisiones residuales para cada escenario, según lo descrito en las secciones anteriores, y un precio medio de R\$ 960 por crédito de carbono.

Se recomienda iniciar la estrategia de compensación del Puerto de Itaqui a partir de 2050 de forma gradual, actuando inicialmente como facilitador, pasando a aglutinador y, eventualmente, estableciendo un requisito para alcanzar las emisiones netas cero. A continuación, se indican las responsabilidades que la EMAP tendría en cada fase:

Facilitador

- Crear y mantener una plataforma digital de acceso a créditos confiables.
- Seleccionar y validar proveedores/corredores de créditos certificados.
- Divulgar información y concienciar a la comunidad portuaria sobre la importancia de la compensación.

Aglutinador

- Crear y mantener una plataforma para la compra y venta de créditos.
- Conectar usuarios portuarios con proveedores/corredores confiables.
- Identificar necesidades de compensación y proyectos disponibles.
- Promover compras colectivas con condiciones ventajosas.
- Garantizar la trazabilidad y la verificación de las transacciones.

Requisito de Emisiones Netas Cero

- Establecer normas para la neutralidad de emisiones en el ecosistema portuario.
- Incluir requisitos de compensación en contratos, licencias y concesiones.
- Implementar sistemas obligatorios de monitoreo y verificación.
- Aplicar incentivos y sanciones conforme al nivel de cumplimiento.
- Ofrecer formación y apoyo para medidas de reducción y compensación.

7. Consideraciones finales

El plan de descarbonización del Puerto de Itaqui representa un hito inédito en el escenario portuario brasileño, posicionando al complejo logístico como el primer puerto público nacional en disponer de una herramienta de planificación de descarbonización alineada con las exigencias climáticas del siglo XXI.

Más que una respuesta a las metas de la OMI y a los compromisos de Brasil en el contexto del Acuerdo de París, el plan establece las bases técnicas, operativas y estratégicas para la reducción progresiva de las emisiones de gases de efecto invernadero en todos los modos y cadenas logísticas del puerto. El plan presenta soluciones tecnológicas viables e innovadoras, como la electrificación de muelles, el potencial de la energía solar, el uso de biocombustibles, hidrógeno verde y otras energías renovables con alto potencial de reducción de emisiones.

La estrategia combina acciones realistas de corto plazo con iniciativas estructurantes de largo plazo, promoviendo una transición energética gradual y segura en todos los modos y equipos portuarios. La construcción de una comunidad colaborativa entre EMAP, operadores y transportistas garantiza una mayor adhesión a las metas, impulsando una gobernanza integrada para la sostenibilidad. Con base en análisis económicos sólidos, 8 acciones del plan presentan VAN positivo, demostrando que la descarbonización también es una oportunidad de ganancias financieras y competitividad.

Como consecuencia de la descarbonización del sector marítimo, el peso de otras aplicaciones crecerá significativamente en el Puerto de Itaqi, por lo que es importante crear espacios de colaboración con toda la comunidad portuaria. La descarbonización será liderada por la transición energética en el sector marítimo, por lo tanto, es muy importante que el Puerto de Itaqi se prepare para el suministro de combustibles renovables, a fin de aumentar la atraktividad comercial del puerto. Para la descarbonización total, será necesario tener en cuenta las acciones de compensación, en las cuales, a corto plazo, EMAP debe desempeñar un papel de facilitador.

Este plan refuerza el compromiso del Puerto de Itaqi con un ecosistema logístico de bajo carbono, atrayendo inversiones sostenibles y consolidando su liderazgo nacional en sostenibilidad portuaria.

Referencias

BlueBARGE – Plataforma de fornecimento de energia limpa para navios.

<https://bluebarga.eu/>

EMEP/EEA – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.

<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-d-navigation/view>

Fourth IMO Greenhouse Gas Study (2020) – Estudo de emissões de gases de efeito estufa no setor marítimo.

<https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

HDF Energy – Empresa de soluções em hidrogênio e energia renovável.

<https://hdf-energy.com/>

Hyster – Soluções de equipamentos elétricos e hidrogênio para movimentação de cargas.

<https://www.hyster.com/es-es/emea/carretillas-elevadoras-electricas-de-4-ruedas/j10-18xd/>

Interchange UK – Estratégias alternativas de combustíveis para o transporte.

<https://www.interchange-uk.com/news/stbs-launch-alternative-fuels-strategy-for-the-south-west>

Italgru – Guindastes móveis elétricos para portos.

<https://italgru.it/en/electric-port-cranes/mobile-harbour-cranes/imhc-2120-e>

JCB – Soluções de máquinas elétricas.

<https://tinyurl.com/58baaphj>

Kalmar – Equipamentos de movimentação elétrica de cargas.

https://www.kalmarglobal.com/news--insights/press_releases/2023/kalmar-hands-over-its-first-fully/

Konecranes – Soluções em guindastes e movimentação de cargas.

<https://www.marinelink.com/companies/konecranes-83436>

Liebherr – Guindastes portuários elétricos LPS 420 E.

<https://www.liebherr.com/es-int/gruas-maritimas/productos/equipamiento-de-puerto/gr%C3%BAas-p%C3%B3rtico/liebherr-portal-slewing-electric/lps-420-e-5391558>

OpenRailwayMap – Plataforma de visualização de redes ferroviárias.

<https://www.openrailwaymap.org/>

Port of Gothenburg – Projeto de fornecimento de energia (OPS) para navios-tanque.

<https://www.portofgothenburg.com/about/projects/ops-tankers/>

Porto do Itaqui – Planejamento e desenvolvimento de novos negócios.

<https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/planejamento-desenvolvimento/novos-negocios>

Science Based Targets initiative (2019) – Foundations of Science-based Target Setting.

<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/foundations-of-SBT-setting.pdf>

Science Based Targets initiative (2023) – Science Based Target Setting for the Maritime Transport Sector.

<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Maritime-Guidance.pdf>

Stillstrom – Soluções de fornecimento de energia offshore para navios fundeados.

<https://stillstrom.com/>

TEQUIMAR – Terminal Químico de Aratu (leilão de portos).

<https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/leilao-de-portos>

Terberg – Soluções de veículos de movimentação de cargas elétricos.

https://www.terbergtaylor.com/assets/TTA_PRODUCT_LINE.pdf

Union Pacific – Projeto de locomotiva híbrida para operações ferroviárias.

https://www.up.com/aboutup/community/inside_track/ztr-hybrid-locomotives-it-240429.htm

Volvo – Máquinas de construção elétricas Volvo CE.

<https://www.volvoce.com/espana/es-es/products/electric-machines/l120-electric/>

Anexo I – Detalle de las medidas propuestas

Código	N1
Medida	Mejora en la recolección de datos de las escalas
Descripción	Implementación de mecanismos estandarizados y automáticos para la recolección, consolidación y análisis de los datos de escala de los buques que operan en el Puerto de Itaquí, incluyendo horarios de llegada y salida, tiempos de espera, consumo de energía, uso de combustible, tipo de carga y características de la embarcación.
Tipo de medida	Gestión de operaciones
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0
Beneficios adicionales	• Mejora de la transparencia y trazabilidad de las operaciones. • Toma de decisiones basada en datos. • Base para la creación de indicadores de eficiencia energética y climática. • Facilita la implementación de incentivos o penalizaciones relacionadas con el desempeño ambiental de los buques.
Presupuesto (MR\$)	0,6
Horizonte temporal	1M26–2M26
Departamento responsable	Operaciones, Digitalización
Indicadores de seguimiento	• % de escalas registradas con datos completos y confiables. • Número de variables clave recolectadas por escala.
Ejemplos de implementación	Puerto de Los Ángeles, Puerto de Amberes, Puerto de Singapur

Código	N2
Medida	Implementación de un sistema de gestión de las escalas
Descripción	Desarrollo e implementación de un sistema digital integrado que permita planificar, coordinar y optimizar las escalas de los buques en el Puerto de Itaquí. La herramienta puede incorporar funcionalidades como programación Just-in-Time, notificaciones a los actores clave y conexión con sistemas de comunidad portuaria (PCS).
Tipo de medida	Gestión de operaciones
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0
Beneficios adicionales	• Mejora de la eficiencia operativa y reducción de cuellos de botella. • Disminución de las emisiones asociadas al tiempo de espera. • Reducción de los costos operativos para armadores y terminales. • Mejora de la transparencia y de la coordinación entre los actores portuarios.
Presupuesto (MR\$)	0,3
Horizonte temporal	2M26–1M27
Departamento responsable	Operaciones, Digitalización
Indicadores de seguimiento	• % de escalas gestionadas por el sistema. • Reducción media del tiempo de espera de los buques. • Número de eventos Just-in-Time aplicados.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Los Ángeles

Código	N3
Medida	Investigación de preparación de la red eléctrica de Itaqui
Descripción	Realización de un estudio técnico para evaluar la capacidad actual de la red eléctrica del puerto y su potencial de expansión para atender las futuras demandas energéticas, especialmente en el contexto de la electrificación de las operaciones portuarias, suministro de OPS (Onshore Power Supply), recarga de vehículos eléctricos y uso de energías renovables.
Tipo de medida	Infraestructura portuaria
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0
Beneficios adicionales	• Identificación de oportunidades para integrar energías renovables al sistema. • Mejora de la seguridad energética del puerto y su resiliencia. • Posibilita la planificación adecuada de la electrificación del puerto.
Presupuesto (MR\$)	2
Horizonte temporal	2M26–1M27
Departamento responsable	Infraestructuras
Indicadores de seguimiento	• Identificación de puntos críticos y propuestas de mejora. • Número de proyectos de electrificación viabilizados a partir del estudio."
Ejemplos de implementación	Puerto de Santos, Puerto de Valencia, Puerto de Hamburgo

Código	N4
Medida	Red de media tensión (12 MW)
Descripción	Implementación de una red de media tensión (aproximadamente 12 MW de capacidad) dentro del área portuaria para garantizar el suministro eléctrico necesario a las futuras demandas asociadas a la electrificación de muelles, OPS (Onshore Power Supply) y otras operaciones.
Tipo de medida	Infraestructura portuaria
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0
Beneficios adicionales	• Mejora de la capacidad energética del puerto. • Reducción de los costos operativos de energía a largo plazo. • Aumento de la resiliencia energética frente a fallas o sobrecargas.
Presupuesto (MR\$)	35
Horizonte temporal	2M26–2M27
Departamento responsable	Infraestructuras
Indicadores de seguimiento	• Capacidad instalada de la red eléctrica (MW). • Número de puntos de conexión habilitados. • % de la infraestructura portuaria alimentada por la nueva red. • Número de proyectos eléctricos conectados a la red.
Ejemplos de implementación	Puerto de Santos, Puerto de Valencia

Código	N5
Medida	Electrificación de muelles de graneles líquidos
Descripción	Instalación de sistemas de suministro eléctrico en los muelles destinados a la operación de graneles líquidos, permitiendo que los buques se conecten a la red eléctrica terrestre durante la estadía en el puerto, evitando el uso de generadores auxiliares a bordo.
Tipo de medida	Infraestructura portuaria
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	15,6
Beneficios adicionales	• Mejora de la calidad del aire local. • Reducción del ruido en el entorno portuario. • Cumplimiento de futuras normas internacionales. • Fortalecimiento del posicionamiento del puerto como referencia en sostenibilidad.
Presupuesto (MR\$)	33,2
Horizonte temporal	1M27–2M28
Departamento responsable	Infraestructuras
Indicadores de seguimiento	• Número de muelles electrificados. • % de escalas conectadas al OPS. • Energía suministrada a los buques (MWh).
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Gotemburgo

Código	N6
Medida	Descuento de tarifa para buques que utilizan combustibles renovables
Descripción	Implementación de un esquema de incentivos económicos que concede descuentos en las tarifas portuarias a los buques que operan con combustibles renovables o de bajas emisiones, como metanol verde, biocombustibles avanzados, hidrógeno, entre otros.
Tipo de medida	Incentivos ambientales
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	3,5
Beneficios adicionales	• Atracción de tráficos marítimos con mejor desempeño ambiental. • Mejora de la imagen del puerto como agente comprometido con la sostenibilidad. • Estímulo a la innovación y al uso de combustibles alternativos en el sector marítimo.
Presupuesto (MR\$)	14
Horizonte temporal	1M27–2M40
Departamento responsable	Operaciones
Indicadores de seguimiento	• Número de buques que acceden al incentivo. • % de escalas incentivadas que utilizan combustibles renovables. • Valor total de descuentos concedidos.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Los Ángeles

Código	N7
Medida	Sistema de prioridad de escala para buques de bajo carbono
Descripción	Desarrollo e implementación de un sistema que concede prioridad de atraque a los buques que utilicen combustibles de bajas emisiones o tecnologías limpias.
Tipo de medida	Incentivos ambientales
Ámbito de aplicación	Buques
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	1,3
Beneficios adicionales	• Mejora de la eficiencia en las operaciones portuarias. • Aceleración de la adopción de tecnologías limpias en el transporte marítimo. • Fortalecimiento de la imagen del puerto como agente comprometido con la descarbonización.
Presupuesto (MR\$)	0,24
Horizonte temporal	1M27–2M50
Departamento responsable	Operaciones
Indicadores de seguimiento	• Tiempo medio de espera vs. tiempo medio de atraque para buques de bajas emisiones. • Número de buques priorizados por el desempeño ambiental.
Ejemplos de implementación	Puerto de Gotemburgo

Código	R8
Medida	Grupo de trabajo para la descarbonización de remolcadores
Descripción	Creación de un grupo de trabajo permanente entre la EMAP y las empresas de remolcadores, con el objetivo de definir estrategias y proyectos para reducir las emisiones de los remolcadores que operan en el Puerto de Itaqi.
Tipo de medida	Combustibles alternativos
Ámbito de aplicación	Remolcadores
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,55
Beneficios adicionales	• Fomento a la colaboración público-privada para la transición energética. • Mejora de la competitividad y sostenibilidad de los servicios portuarios.
Presupuesto (MR\$)	0,78
Horizonte temporal	2M25–2M40
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de reuniones y propuestas técnicas generadas por el grupo. • Porcentaje de la flota de remolcadores con tecnologías de bajas emisiones. • Proyectos piloto implementados o en desarrollo.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Los Ángeles

Código	R9
Medida	Programas de monitoreo de bioincrustación
Descripción	Implementación de programas para monitorear la bioincrustación en los cascos de los remolcadores del Puerto de Itaqui, con el objetivo de identificar aquellos con altos niveles de incrustación biológica que afectan la eficiencia en el consumo de combustible. El monitoreo puede incluir inspecciones visuales, uso de sensores o análisis de datos de desempeño energético.
Tipo de medida	Gestión de operaciones
Ámbito de aplicación	Remolcadores
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	3,34
Beneficios adicionales	• Mejora de la eficiencia energética de los remolcadores. • Generación de datos útiles para estudios ecológicos y para la gestión de especies invasoras.
Presupuesto (MR\$)	0,26
Horizonte temporal	2M26–2M27
Departamento responsable	Medio Ambiente / Operaciones
Indicadores de seguimiento	• Número de remolcadores evaluados anualmente. • Porcentaje de remolcadores con bioincrustación crítica detectada. • Aplicación de medidas correctivas (limpieza, pintura antifouling, etc.).
Ejemplos de implementación	Iniciativas piloto en puertos de Australia y Nueva Zelanda

Código	R10
Medida	Suministro de electricidad durante la espera
Descripción	Instalación de puntos de suministro de electricidad en muelles o áreas de atraque del Puerto de Itaqui para permitir que los remolcadores se conecten a la red eléctrica mientras están en espera entre maniobras.
Tipo de medida	Infraestructura portuaria
Ámbito de aplicación	Remolcadores
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	1,59
Beneficios adicionales	• Reducción de las emisiones locales y mejora de la calidad del aire en el entorno portuario. • Disminución del ruido y de las vibraciones en las áreas operacionales. • Ahorro de combustible para los operadores de remolcadores. • Facilita la electrificación progresiva de la flota auxiliar portuaria.
Presupuesto (MR\$)	3,15
Horizonte temporal	1M27–2M27
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de remolcadores que utilizan el sistema de suministro eléctrico. • Tiempo medio de conexión por remolcador (h/año). • Consumo de combustible fósil evitado.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Hamburgo

Código	T11
Medida	Creación de la comunidad de colaboración (Mejora de la recolección de datos, inventario, catálogo y capacitación)
Descripción	Establecimiento de una comunidad de colaboración entre la EMAP y las terminales, con el objetivo de mejorar la recolección de datos sobre emisiones, consumos energéticos y operaciones portuarias. Esta comunidad también facilitará la construcción conjunta del inventario de emisiones, el desarrollo de un catálogo de medidas de descarbonización y la implementación de programas de formación y capacitación técnica para impulsar la sostenibilidad portuaria.
Tipo de medida	Gestión de operaciones
Ámbito de aplicación	Terminales
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,2
Beneficios adicionales	• Mejora de la calidad y transparencia de los datos del puerto. • Promoción de la alineación estratégica entre los principales actores. • Aumento de la capacidad técnica del ecosistema portuario. • Facilitación del monitoreo, evaluación y mejora continua del plan de descarbonización.
Presupuesto (MR\$)	1,3
Horizonte temporal	1M26–2M50
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de entidades participantes de la comunidad. • Número de sesiones de trabajo y actividades realizadas.
Ejemplos de implementación	Puerto de Valencia, Puerto de Ámsterdam

Código	T12
Medida	Separación de los medidores de electricidad de cada terminal/operador de los de la EMAP
Descripción	Instalación de medidores de electricidad separados para cada terminal y operador portuario dentro del área de gestión del Puerto de Itaquí, permitiendo un monitoreo preciso y específico del consumo energético de cada entidad.
Tipo de medida	Gestión de operaciones
Ámbito de aplicación	Terminales
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,01
Beneficios adicionales	• Mejora del control y de la gestión del consumo energético de cada terminal. • Identificación de oportunidades de eficiencia energética a nivel de terminal. • Facilitación de la implementación de incentivos para el ahorro de energía. • Aumento de la transparencia y de la responsabilidad en el consumo energético.
Presupuesto (MR\$)	0,2
Horizonte temporal	1M26–2M26
Departamento responsable	Infraestructuras
Indicadores de seguimiento	• Número de terminales con medidores de electricidad independientes. • % de consumo eléctrico renovable utilizado por cada terminal.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Hamburgo

Código	T13
Medida	Incentivo al uso de electricidad renovable (con certificado)
Descripción	Implementación de un esquema de incentivos para las terminales que utilicen electricidad renovable certificada en sus operaciones. EMAP ofrecerá descuentos en tarifas, acceso preferencial o beneficios regulatorios para aquellas que utilicen electricidad proveniente de fuentes renovables, verificada por certificados de garantía de origen.
Tipo de medida	Incentivos ambientales
Ámbito de aplicación	Terminales
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,2
Beneficios adicionales	• Estímulo al uso de energía limpia y contribución a la descarbonización. • Alineamiento con los objetivos internacionales de combate al cambio climático y reducción de emisiones. • Mejora de la competitividad del puerto en el contexto de la sostenibilidad global.
Presupuesto (MR\$)	57,5
Horizonte temporal	1M28–2M50
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de terminales que se adhieran al esquema de incentivos. • % de electricidad renovable utilizada por las terminales.
Ejemplos de implementación	Puerto de Ámsterdam, Puerto de Róterdam

Código	T14
Medida	Incentivos económicos para operadores y terminales por el uso de combustibles de baja emisión
Descripción	Implementación de un sistema de incentivos económicos dirigido a operadores y terminales portuarios que utilicen combustibles de bajas emisiones. Los incentivos pueden incluir descuentos en tarifas portuarias, reducción de tasas por el uso de combustibles sostenibles o acceso prioritario a determinadas infraestructuras portuarias.
Tipo de medida	Incentivos ambientales
Ámbito de aplicación	Terminales
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	1,9
Beneficios adicionales	• Mejora de la calidad del aire en el entorno portuario. • Preparación para futuras regulaciones ambientales. • Refuerzo de la reputación institucional y liderazgo ambiental. • Atracción de terminales y operadores sostenibles.
Presupuesto (MR\$)	42
Horizonte temporal	1M30–2M50
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de operadores y terminales que adoptan combustibles sostenibles. • % de combustibles de baja emisión utilizados por los operadores y terminales. • Valor total de los incentivos económicos concedidos por el uso de combustibles de baja emisión.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Ámsterdam

Código	T15
Medida	Instalación de punto de recarga para camiones
Descripción	Instalación de infraestructura de recarga eléctrica en las terminales para los camiones que operan dentro del Puerto de Itaquí. EMAP podrá actuar como facilitadora, por medio de incentivos, acuerdos de cooperación o requisitos en contratos de concesión.
Tipo de medida	Infraestructura portuaria
Ámbito de aplicación	Terminales
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,2
Beneficios adicionales	• Mejora de la calidad del aire en el entorno portuario. • Fortalecimiento de la imagen ambiental del puerto y de las terminales. • Apoyo a la política nacional de electromovilidad. • Atracción de terminales y operadores sostenibles.
Presupuesto (MR\$)	3,3
Horizonte temporal	1M28–2M28
Departamento responsable	Infraestructura y Energía
Indicadores de seguimiento	• Número de puntos de recarga instalados en las terminales. • Número de camiones eléctricos circulando en el puerto. • % de terminales con infraestructura de recarga eléctrica.
Ejemplos de implementación	Puerto de Los Ángeles, Puerto de Róterdam

Código	C16
Medida	Grupo de trabajo del transporte terrestre + sector agrícola
Descripción	Creación de un grupo de trabajo compuesto por EMAP, operadores logísticos, empresas del sector agrícola y autoridades locales, con el objetivo de analizar y promover la transición hacia soluciones de transporte terrestre más sostenibles para el desplazamiento de mercancías entre el puerto y las zonas agrícolas.
Tipo de medida	Logística verde
Ámbito de aplicación	Camiones
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,04
Beneficios adicionales	• Optimización de las rutas logísticas, aumentando la eficiencia. • Mejora de la calidad del aire. • Estímulo a la cooperación público-privada, alineándose con políticas de sostenibilidad.
Presupuesto (MR\$)	0,78
Horizonte temporal	2M25–2M40
Departamento responsable	Logística y Transporte
Indicadores de seguimiento	• Número de reuniones y proyectos iniciados por el grupo de trabajo. • Número de iniciativas sostenibles implementadas. • Volumen de mercancías transportadas por medios de baja emisión.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Suape

Código	C17
Medida	Estudio del hinterland y potencial de corredores verdes
Descripción	Realización de un estudio sobre el hinterland del Puerto de Itaquí, con foco en la identificación de oportunidades para el desarrollo de corredores verdes. Este estudio analizará las rutas de transporte actuales y futuras, evaluando el potencial de integración de soluciones sostenibles, como la electrificación de infraestructuras y el uso de combustibles alternativos.
Tipo de medida	Logística verde
Ámbito de aplicación	Camiones
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0
Beneficios adicionales	• Mejora de la eficiencia logística. • Reducción de la contaminación atmosférica. • Reducción de los costos operativos.
Presupuesto (MR\$)	0,5
Horizonte temporal	2M26–2M27
Departamento responsable	Planificación Estratégica
Indicadores de seguimiento	• Identificación de rutas y corredores verdes con mayor potencial de implementación. • Número de iniciativas sostenibles identificadas e implementadas.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Hamburgo

Código	C18
Medida	Esquema de categorización y etiquetas verdes para camiones
Descripción	Implementación de un sistema de categorización y etiquetado verde para los camiones que operan en el puerto, basado en su nivel de emisiones y en el uso de tecnologías limpias. Este sistema permitirá clasificar los camiones en diferentes categorías de acuerdo con su impacto ambiental, facilitando la aplicación de incentivos y descuentos para vehículos de bajas emisiones. Además, se concederán etiquetas verdes a los camiones que utilicen combustibles alternativos o tecnologías de bajo impacto, incentivando la transición hacia una flota más sostenible.
Tipo de medida	Logística verde
Ámbito de aplicación	Camiones
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,1
Beneficios adicionales	• Estímulo al uso de vehículos de bajas emisiones. • Mejora de la calidad del aire. • Alineamiento con políticas de sostenibilidad.
Presupuesto (MR\$)	1,35
Horizonte temporal	1M27–2M40
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de camiones categorizados con etiquetas verdes. • % de camiones de bajas emisiones en comparación con la flota total operativa.
Ejemplos de implementación	Puerto de Los Ángeles, Puerto de Róterdam

Código	C19
Medida	Acuerdo con empresa de energía para el suministro de combustible renovable en el entorno portuario
Descripción	Celebración de un acuerdo entre EMAP y una empresa energética para el suministro y distribución de combustibles renovables (como biodiésel, HVO, biogás, entre otros) en el Puerto de Itaquí. El objetivo es garantizar que las operaciones dentro del puerto, tanto en el transporte terrestre como en las actividades portuarias, utilicen fuentes de energía limpia, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo la transición hacia una logística más sostenible. El acuerdo puede también incluir la implantación de la infraestructura necesaria para la distribución de estos combustibles en el área portuaria.
Tipo de medida	Combustibles alternativos
Ámbito de aplicación	Camiones
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,1
Beneficios adicionales	• Impulso a la infraestructura de combustibles renovables en el puerto. • Cumplimiento de posibles regulaciones ambientales futuras. • Reducción de la contaminación atmosférica. • Atracción de operadores sostenibles.
Presupuesto (MR\$)	288
Horizonte temporal	1M27–2M30
Departamento responsable	Infraestructura y Energía
Indicadores de seguimiento	• Cantidad de combustible renovable suministrado al puerto. • Número de camiones que utilizan combustibles renovables.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Los Ángeles

Código	C20
Medida	Oficina de asistencia a las empresas de transporte
Descripción	Creación de una oficina técnica y de apoyo dentro del Puerto de Itaquí para asesorar y acompañar a las empresas de transporte que operan en el área portuaria en su transición hacia modelos más sostenibles. Esta oficina ofrecerá información sobre regulaciones ambientales, acceso a incentivos o financiación para la renovación de flotas, adopción de combustibles alternativos, capacitación en buenas prácticas y soporte técnico para la implementación de soluciones de bajo carbono.
Tipo de medida	Logística verde
Ámbito de aplicación	Camiones
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,23
Beneficios adicionales	• Apoyo a la modernización de la flota terrestre que opera en el Puerto de Itaquí. • Fomento a la cooperación y fortalecimiento de las relaciones institucionales para la transición energética. • Reducción de la contaminación atmosférica asociada al transporte terrestre. • Aumento del cumplimiento ambiental entre los operadores que acceden al puerto.
Presupuesto (MR\$)	5
Horizonte temporal	1M27–2M30
Departamento responsable	Medio Ambiente
Indicadores de seguimiento	• Número de empresas atendidas por la oficina. • Número de iniciativas sostenibles implementadas por operadores con apoyo de la oficina.
Ejemplos de implementación	Puerto de Hamburgo, Puerto de Los Ángeles

Código	F21
Medida	Grupo de trabajo de logística y digitalización de las operaciones ferroviarias
Descripción	Creación de un grupo de trabajo técnico compuesto por EMAP, operadores ferroviarios, terminales, empresas logísticas y entidades gubernamentales, con el objetivo de mejorar la eficiencia del transporte ferroviario en el Puerto de Itaqi mediante soluciones logísticas avanzadas y herramientas de digitalización. El grupo abordará temas como el intercambio de datos en tiempo real, la trazabilidad de las cargas, la coordinación de horarios y el uso de plataformas digitales para optimizar la gestión ferroviaria.
Tipo de medida	Logística verde
Ámbito de aplicación	Ferrocarriles
Potencial de reducción de emisiones/año (kt CO₂)	0,06
Beneficios adicionales	• Aumento de la eficiencia y competitividad del transporte ferroviario de cargas. • Reducción del tráfico por carretera y de las emisiones asociadas a los camiones. • Mayor integración del modo ferroviario en los procesos logísticos portuarios.
Presupuesto (MR\$)	0,75
Horizonte temporal	1M26–2M40
Departamento responsable	Operaciones
Indicadores de seguimiento	• Número de reuniones realizadas y acciones implementadas por el grupo de trabajo. • Aumento del volumen de carga transportada por ferrocarril.
Ejemplos de implementación	Puerto de Róterdam, Puerto de Hamburgo

8. Anexo II – Estudio del potencial solar, necesidad de almacenamiento y producción local de hidrógeno en el Puerto de Itaquí

1. Introducción

Contexto y Objetivos del Estudio

Como parte del Plan descarbonización planteado sobre el Puerto de Itaquí que se está desarrollando en el marco de la colaboración entre la EMAP y la Fundación Valenciaport se incluye el estudio sobre el potencial renovable del puerto y de producción de combustibles renovables, en particular, el hidrógeno verde. El estudio contribuirá a una toma de decisiones informada sobre las inversiones necesarias en infraestructuras energéticas, con el fin de reducir la huella de carbono del puerto y mejorar su competitividad en un entorno internacional cada vez más regulado en términos ambientales.

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Identificar las áreas dentro del puerto con mayor potencial para la instalación de paneles solares;
- Cuantificar la capacidad de generación de energía solar y definir los parámetros técnicos para su implementación **(Subtarea 1)**;
- Asimismo, se evaluarán las necesidades de almacenamiento energético a corto y largo plazo para optimizar el uso de la energía generada **(Subtarea 2)**;
- Se analizará el potencial de producción local de hidrógeno y se propondrán soluciones tecnológicas y de infraestructura para su almacenamiento y uso, en consonancia con las necesidades energéticas de este vector energético planteadas en el presente Plan de descarbonización del Puerto de Itaquí **(Subtarea 3)**.

Alcance

El alcance del presente estudio se concentra en tres áreas clave para la transición energética del Puerto de Itaquí:

1. La evaluación del potencial solar;
2. La identificación de las necesidades de almacenamiento de energía;
3. El estudio de la producción local de hidrógeno.

La primera área se enfoca en identificar y evaluar zonas dentro del puerto que sean aptas para la instalación de sistemas fotovoltaicos, con el objetivo de maximizar la generación de energía solar. La segunda área aborda el análisis de las tecnologías de almacenamiento más adecuadas para el puerto, considerando soluciones tanto a corto plazo, como las baterías, como a largo plazo, como la producción de hidrógeno. La tercera área se dedica a estudiar la viabilidad de la producción de hidrógeno in situ, incluyendo la localización de una planta de electrólisis y la evaluación de su capacidad en función de diferentes escenarios de demanda.

Este estudio no solo se centrará en la viabilidad técnica de las soluciones propuestas, sino también en su rentabilidad económica y en las condiciones de financiamiento necesarias para su implementación. Las recomendaciones que se deriven del estudio estarán alineadas con los objetivos de sostenibilidad del puerto, así como con las políticas energéticas y ambientales tanto locales como internacionales.

El enfoque metodológico del estudio combinará técnicas cualitativas y cuantitativas, integrando la experiencia técnica con un análisis riguroso de datos. En primer lugar, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura y de estudios precedentes sobre generación solar, almacenamiento energético y producción de hidrógeno en puertos similares, con el fin de identificar las mejores prácticas y lecciones aprendidas que puedan aplicarse al Puerto de Itaquí.

A continuación, se procederá a evaluar el potencial solar utilizando herramientas de análisis geoespacial para identificar las áreas del puerto con mayor exposición solar. Se modelará la generación de electricidad empleando datos meteorológicos locales, teniendo en cuenta las variaciones estacionales y diarias, y se simularán perfiles de potencia que evalúen la eficiencia de diferentes configuraciones tecnológicas, como la orientación y la inclinación de los paneles.

El análisis de las necesidades de almacenamiento energético se basará en la evaluación de la capacidad de almacenamiento requerida para equilibrar la generación y el consumo de energía en el puerto. Se analizará la viabilidad técnica y económica de diversas tecnologías de almacenamiento, tanto de corto plazo como de largo plazo, y se proyectarán diferentes escenarios de almacenamiento basados en la demanda energética prevista y en la variabilidad de la generación solar.

En cuanto a la producción de hidrógeno, se identificará la ubicación óptima para una planta de electrólisis dentro del puerto y se evaluará su capacidad de producción, considerando distintos escenarios de demanda, como el

bunkering y las operaciones portuarias. Se realizará un análisis de costos asociado a la instalación y operación de la planta de hidrógeno, incluyendo las tecnologías de almacenamiento necesarias.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis económico y financiero que incluirá la estimación de los costos de inversión y operación para cada una de las soluciones propuestas. Se evaluarán las oportunidades de financiamiento público y privado, así como los incentivos fiscales y subvenciones disponibles. Además, se analizarán el retorno de inversión (ROI) y los plazos de amortización.

La validación y revisión de los resultados se realizarán en colaboración con expertos y partes interesadas del Puerto de Itaquí, ajustando las recomendaciones según las observaciones recibidas y las condiciones del mercado. El informe final recogerá las conclusiones, recomendaciones y un plan de acción detallado para la implementación de las soluciones propuestas.

2. Subtarea 1: Potencial

2.1. Metodología

El presente estudio tiene como objetivo analizar el potencial de generación solar fotovoltaica en el Puerto de Itaquí y sus áreas de influencia, considerando específicamente la viabilidad de instalar sistemas solares en las cubiertas de edificios administrativos, estacionamientos en proceso de reforma y otras zonas gestionadas por la Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) fuera del perímetro portuario, como la terminal de pasajeros o terrenos adyacentes.

Dada la elevada irradiación solar característica del estado de Maranhão y el compromiso del puerto con la descarbonización y la sostenibilidad energética, este análisis busca identificar oportunidades concretas para el aprovechamiento de la energía solar como fuente limpia y estratégica para el abastecimiento de sus operaciones.

Para estimar el potencial de generación solar en las áreas identificadas del Puerto de Itaquí, se ha seguido una metodología basada en el análisis de superficie disponible, datos de irradiación solar promedio anual y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. En primer lugar, se ha realizado una estimación preliminar de las superficies útiles en techos de edificios administrativos, estructuras de estacionamiento y terrenos externos viables, a partir de imágenes satelitales y planos del puerto. Posteriormente, se ha considerado la irradiancia solar media en São Luís, que oscila entre 3,03 (Marzo) y 5,49 (Agosto) kWh/m²/día con media anual en 4,366 kWh/m²/día [1], así como un rendimiento promedio del sistema del 15 al 18 % [2], teniendo en cuenta pérdidas por temperatura, orientación, sombras y conversión. Estos parámetros permiten calcular la producción teórica anual de energía para cada tipo de área y valorar su contribución potencial al consumo eléctrico del puerto.

Figura 62 - Irradiación considerada para el Puerto de Itaquí.

Daily Total Averages of the Direct Normal Irradiation for the State of MARANHÃO

(Wh/m².day)

Show 10 entries

Search: 81200

---- Insert ID ----

ID	Lon	Lat	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
61200	-44.249	-2.5005	4355	3902	3487	3032	3105	3804	4679	4990	5496	5378	4722	4804	4863
ID	Lon	Lat	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec

Fuente: Fundación Valenciaport.

2.2. identificación de Zonas Susceptibles para Paneles Fotovoltaicos

La identificación de áreas adecuadas para la instalación de sistemas fotovoltaicos en el Puerto de Itaquí se ha basado en criterios de disponibilidad física, accesibilidad, orientación, ausencia de sombras significativas y titularidad pública. Se han considerado tres categorías principales de espacios gestionados por la Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) o vinculados al Gobierno del Estado de Maranhão:

1. **Cubiertas de edificios administrativos:** Estas superficies planas o ligeramente inclinadas ofrecen un entorno favorable para la instalación de paneles solares, al estar generalmente libres de obstrucciones y contar con infraestructura eléctrica cercana. Se han identificado como prioritarias las cubiertas de los edificios de oficinas centrales, salas técnicas y almacenes logísticos.
2. **Estacionamientos en proceso de reforma:** La instalación de estructuras fotovoltaicas tipo carport sobre estacionamientos representa una solución doblemente eficiente, ya que además de generar electricidad renovable, proporcionan sombra y confort térmico a los vehículos. Las áreas seleccionadas incluyen estacionamientos destinados a personal operativo, visitantes y flotas de servicio, actualmente en proceso de renovación o expansión.
3. **Áreas fuera de la poligonal portuaria:** Son zonas que presentan potencial para albergar plantas solares de mayor escala, especialmente en terrenos sin uso definido o con baja ocupación. Se há indicado como zonas potenciales a falta de decisión definitiva una vez la EMAP identifique emplazamientos concretos. En una primera aproximación se propondrá.

2.3. Planteamiento Inicial: Zonas Internas

El procedimiento de dimensionamiento de las zonas ha seguido un proceso secuencial. En primer lugar se ha determinado el espacio disponible en zonas bajo control directo de la EMAP. Estas zonas se han considerado como tipologías 1 y 2 y determinan el espacio disponible para la producción fotovoltaica instalable a corto plazo.

Figura 63 - Áreas disponibles para la instalación de paneles fotovoltaicos en zonas controladas por EMAP.



Fuente: Fundación Valenciaport.

Tras el análisis detallado de las infraestructuras y superficies disponibles en el recinto del Puerto de Itaquí, se ha determinado que el área potencialmente aprovechable para la instalación de paneles fotovoltaicos asciende a **14.810 m²**. Esta superficie se distribuye entre **7.320 m²** correspondientes a cubiertas de edificios administrativos y logísticos, y **7.490 m²** en áreas de estacionamiento, actualmente en proceso de renovación.

Para reflejar con mayor precisión la fracción útil realmente disponible, se han aplicado factores de adecuación del 80 % para las cubiertas (considerando obstáculos, inclinaciones o zonas no accesibles) y del 90 % en los estacionamientos (por disposición estructural y separación entre filas). Como resultado, la superficie útil neta estimada para la instalación de paneles solares es de **12.597 m²**, lo que representa la base para el dimensionamiento de la planta fotovoltaica dentro del perímetro portuario.

Tabla 17 - Superficies identificadas en terreno EMAP.

		Extensión (m ²)	Factor	Superficie (m ²)
Edificios	Edificio EMAP 1	2620	0,8	2096
	Edificio EMAP 2	1700	0,8	1360
	Edificio EMAP 3	600	0,8	480
	Edificio EMAP 4	1000	0,8	800
	Edificio EMAP 5	1400	0,8	1120
Parques	Parque 1	1240	0,9	1116
	Parque 2	5400	0,9	4860
	Parque 3	850	0,9	765
Total		14810		12597

Fuente: Fundación Valenciaport.

Con el objetivo de dimensionar la instalación fotovoltaica más adecuada para el espacio disponible en el Puerto de Itaquí, se han analizado distintos modelos comerciales de paneles solares de alta eficiencia actualmente disponibles en el mercado brasileño. En concreto, se han comparado tres módulos representativos de tecnología monocristalina PERC de 550 Wp: el Tensite EM550-PH, el Jinko Solar Tiger Pro 550W y el Canadian Solar HiKu6 CS6W-550MS. Las características técnicas de los equipos solares planteados se pueden consultar en [3], [4] y [5].

odos los modelos seleccionados incorporan células de media celda (“half-cut”), lo que mejora el rendimiento en condiciones de sombreado parcial, reduce pérdidas por resistencia y aumenta la fiabilidad general del sistema. Además, presentan eficiencias superiores al 21 %, lo que los hace especialmente adecuados para situaciones con superficie limitada, como es el caso de las cubiertas y estacionamientos identificados en el puerto.

Las dimensiones y pesos de los tres modelos son similares, facilitando la estandarización del montaje. Para una superficie útil disponible de 12.597 m², y asumiendo una densidad de instalación típica de 0,53 kWp/m², la potencia fotovoltaica máxima instalable sería de aproximadamente 6,7 MWp. Esto se traduce en un requerimiento de aproximadamente 12.138 módulos de 550 Wp, independientemente del modelo seleccionado, dado que todos tienen la misma potencia unitaria.

La selección final del módulo dependerá de factores adicionales como disponibilidad local, condiciones comerciales, garantías ofrecidas y compatibilidad con los sistemas de montaje e inversores seleccionados. No obstante, cualquiera de los modelos analizados resulta técnicamente adecuado para su integración en el entorno portuario, cumpliendo con los estándares internacionales de calidad y con una sólida trayectoria de uso en instalaciones industriales a gran escala.

Con ello, considerando una irradiancia solar media anual en el Puerto de Itaquí identificada de 4.366 kWh/m²/día y un rendimiento global del sistema fotovoltaico estimado entre 15 % y 18 %, la producción anual esperada para la superficie útil disponible se sitúa en el rango se encuentra entre los 3.011.168 kWh/año y los 3.613.402 kWh/año.

Este valor supera el consumo anual de la EMAP (2.601.926,13 kWh en el año 2022) con lo que el resto de la energía quedaría disponible para satisfacer consumos alternativos, ya sean de las terminales o bien para dar servicios de OPS cuando estos sean una realidad en el Puerto de Itaquí.

Para garantizar el rendimiento óptimo, la seguridad y la durabilidad del sistema fotovoltaico proyectado en el Puerto de Itaquí, se recomienda seguir una serie de buenas prácticas técnicas, alineadas con normativas nacionales e internacionales. En primer lugar, se debe realizar un estudio detallado de sombras y obstáculos, especialmente en cubiertas con equipos, barandillas o estructuras auxiliares, a fin de optimizar la distribución de los módulos y minimizar pérdidas por sombreado parcial. **La orientación recomendada para São Luís es hacia el norte geográfico, con una inclinación próxima a la latitud local (~2,5°),** aunque configuraciones coplanares en cubiertas planas también pueden ser viables si la densidad energética es prioritaria.

Además, toda la instalación debe contar con proyectos aprobados por un ingeniero electricista registrado en el CREA y cumplir con los procedimientos de acceso de la distribuidora local (Equatorial Maranhão), conforme a la Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023 sobre micro y minigeneración distribuida. En el entorno portuario, también se recomienda coordinar con las autoridades de seguridad operacional (ANVISA, Receita Federal, Marinha do Brasil) en caso de afectaciones a áreas sensibles o protegidas. Finalmente, se aconseja integrar un sistema de monitoreo remoto en tiempo real para asegurar el seguimiento del rendimiento, la detección temprana de fallos y la planificación eficiente de tareas de mantenimiento preventivo.

2.4. Planteamiento ampliado: Áreas exteriores a la poligonal portuaria

Una vez analizada la superficie disponible dentro del recinto del Puerto de Itaqui, se ha estimado que es posible instalar un sistema fotovoltaico de aproximadamente 6,7 MWp sobre un total de 12.597 m² útiles, distribuidos entre cubiertas de edificios y zonas de estacionamiento. No obstante, esta capacidad representa solo una fracción del potencial técnico de inyección que permite la infraestructura eléctrica existente, en particular la subestación equipada con una celda modular de media tensión Schneider Electric SM6, configurada para operar a 13,8 kV con una corriente nominal de 630 A.

Por eso este estudio propone, como paso inicial la maximización de la generación fotovoltaica hasta agotar la capacidad de la red interna de distribución del Puerto de Itaqui.

Al combinar a las superficies internas ya identificadas con nuevas áreas externas complementarias que permitan alcanzar dicha capacidad sin necesidad de modificar la infraestructura de media tensión existente. Esta estrategia de diseño no solo permite maximizar el uso de activos ya disponibles, sino que optimiza el retorno energético y económico del sistema al distribuir la inversión fija en infraestructura sobre un mayor volumen de generación renovable sin implicar cambios en la infraestructura de distribución eléctrica del puerto que supondría una inversión de orden superior.

Figura 64 - Panel de media tensión de la EMAP [6]



Fuente: Fundación Valenciaport.

La capacidad máxima de inyección de energía mediante esta celda se ha calculado a partir de su potencia aparente trifásica, utilizando la expresión:

$$S = \sqrt{3} * V * I_n = \sqrt{3} * 13.800 * 630 = 15,05 \text{ MVA}$$

Considerando un factor de potencia típico de 0,95 en sistemas fotovoltaicos modernos, la potencia activa efectiva que puede ser evacuada sin sobrecargar la celda asciende a:

$$P = S * \cos(\varphi) = 15,05 * 0,95 = 14.3 \text{ MW}$$

Este valor se toma como límite superior de diseño para la instalación fotovoltaica total del Puerto de Itaquí teniendo en cuenta que todas las instalaciones inyecten en media tensión.

Por tanto, restando la potencia generada en las instalaciones internas, nos quedarían disponibles 7,6 MWp restantes.

Para cubrir los 7,6 MWp restantes, se requeriría una superficie útil estimada de aproximadamente 14.340 m², asumiendo una densidad típica de instalación de 0,53 kWp/m², como en las instalaciones interna. Estas áreas externas deberán cumplir una serie de requisitos técnicos, operativos y jurídicos, entre los que destacan:

1. **Titularidad pública o disponibilidad de uso:** se priorizarán terrenos propiedad del Gobierno del Estado de Maranhão o gestionados por la EMAP en zonas adyacentes al puerto, como antiguas áreas logísticas, patios ferroviarios en desuso o zonas próximas a la terminal de pasajeros.

2. **Proximidad a la infraestructura eléctrica del puerto:** con el fin de minimizar pérdidas por distancia y facilitar la conexión al punto común de entrega en la subestación SM6, se recomienda que la planta externa se sitúe a una distancia máxima de 1,5 a 2 km del centro de carga.
3. **Condiciones topográficas y de irradiación:** los terrenos deberán contar con baja pendiente, orientación libre de sombras, accesibilidad para maquinaria de instalación y baja exposición a inundaciones, frecuentes en algunas zonas del entorno portuario.
4. **Viabilidad de conexión:** será necesario diseñar una conexión por media tensión, preferentemente aérea o subterránea según viabilidad técnica, hasta la celda disponible en la subestación existente, dimensionando adecuadamente protecciones y seccionamientos conforme a la NBR 14039 (instalações elétricas em média tensão).

Con todo ello el espacio requerido para la maximización, desde un punto de vista técnico, de la infraestructura de distribución del Puerto de Itaquí es la siguiente.

Tabla 18 - Superficies necesarias para la generación fotovoltaica.

		Extensión (m²)	Factor	Superficie (m²)
Edificios	Edificio EMAP 1	2620	0,8	2096
	Edificio EMAP 2	1700	0,8	1360
	Edificio EMAP 3	600	0,8	480
	Edificio EMAP 4	1000	0,8	800
	Edificio EMAP 5	1400	0,8	1120
Parques	Parque 1	1240	0,9	1116
	Parque 2	5400	0,9	4860
	Parque 3	850	0,9	765
Total		14810		12597
Áreas fuera de la poligonal		15933	0,9	14340
Total		30743		26937

Fuente: Fundación Valenciaport.

La siguiente tabla muestra un resumen de las características técnicas de las instalaciones plantadas.

Tabla 19 - Características técnicas de las instalaciones plantadas

Parámetro	Instalación interna	Instalación externa
Superficie disponible efectiva (m²)	12.597	14.340
Potencia pico instalada (kWp)	6.676,4	7.600,2
Número de módulos (550 W)	12.138	13.818
Producción anual mínima estimada (kWh)	3.011.168	3.427.812
Producción anual máxima estimada (kWh)	3.613.402	4.113.375

Fuente: Fundación Valenciaport.

La producción máxima estimada es de **7.726.777 kWh anuales**.

2.5. Consideraciones económicas

Esta sección presenta una evaluación económico-financiera del sistema fotovoltaico proyectado para el Puerto de Itaqui, teniendo en cuenta una potencia total prevista distribuida en tres modalidades constructivas: instalaciones sobre cubiertas de edificios, estructuras tipo carport en estacionamientos y una planta solar externa ubicada sobre suelo en terrenos colindantes al puerto.

El análisis se basa en datos del mercado brasileño actual, y en particular, incorpora el precio de la energía eléctrica aplicable a consumidores industriales, que resulta ser la referencia más realista para estimar los beneficios económicos del proyecto en el contexto operativo del puerto.

Tabla 20 - Componentes del coste de la electricidad estimables para el Puerto de Itaqui.

Componente	Porcentaje estimado	Valor em R\$/kWh	Referencia
Tarifa de Energía (TE)	40 % – 50 %	R\$ 0,284 – 0,355	[7]
TUSD – distribución/transmisión	30 % – 35 %	R\$ 0,213 – 0,249	[8]
Impostos e cargos	15 % – 25 %	R\$ 0,107. – 0,178	[9], [10]

Fuente: Fundación Valenciaport.

El análisis se basa en un precio de referencia de **R\$ 0,711/kWh**, representativo del coste real pagado por consumidores industriales de alta tensión en Maranhão, incluyendo generación, distribución y componentes regulados.

2.6. Inversión Inicial

La inversión inicial constituye uno de los factores críticos para determinar la viabilidad económica de un sistema fotovoltaico. En este caso, se ha realizado un desglose detallado considerando las diferencias sustanciales en los costes de instalación entre las tres tipologías previstas. Esta metodología permite no solo afinar los cálculos, sino también facilitar una eventual implementación en fases.

La primera categoría corresponde a la instalación sobre cubiertas de edificios administrativos y logísticos dentro del recinto portuario. Esta modalidad aprovecha espacios existentes, minimizando el impacto físico y urbanístico, y permite una integración directa con los consumos eléctricos locales. Se ha estimado una superficie útil de 7.320 m², lo que permitiría instalar aproximadamente 3.883 kWp. El coste por kWp instalado en cubiertas industriales suele ser inferior al de otras modalidades, pero en este caso se han contemplado las particularidades técnicas (impermeabilización, acceso, estructura portante), asumiendo un rango de precios entre **R\$ 4.600 y R\$ 5.800/kWp**, lo que se traduce en una inversión total de entre **R\$ 17,8 y R\$ 22,5 millones**.

La segunda modalidad considera la instalación de paneles en zonas de estacionamiento, mediante estructuras metálicas tipo carport. Este tipo de solución, además de generar energía, proporciona sombra y protección térmica a vehículos y personas, mejorando el confort operativo. La superficie identificada asciende a 7.490 m², con un potencial de 3.970 kWp. Dado que estas estructuras requieren una cimentación reforzada y mayor altura, el coste por kWp se estima entre **R\$ 4.800 y R\$ 6.000**, resultando en una inversión aproximada de entre **R\$ 19,1 y R\$ 23,8 millones**.

Por último, el componente más voluminoso del sistema será una planta sobre suelo en terrenos externos próximos al puerto, con una potencia prevista de 7.600 kWp, distribuidos en 14.340 m² útiles. Esta instalación se considera necesaria para alcanzar el límite máximo de capacidad de inyección permitido por la subestación de media tensión existente. Esta modalidad implica costes adicionales por adecuación del terreno (nivelación, drenaje, accesos) y por la construcción de una línea de media tensión que conecte la planta con la subestación interna. Por ello, el coste estimado por kWp es más alto, en un rango entre **R\$ 5.000 y R\$ 6.500**, lo que genera una inversión proyectada de entre **R\$ 38,0 y R\$ 49,4 millones**.

En conjunto, **la inversión total estimada** del sistema se sitúa en un rango que oscila entre **R\$ 74,9 millones y R\$ 95,7 millones**, dependiendo de las soluciones técnicas adoptadas y las condiciones comerciales de contratación.

Tabla 21 - Coste por tipo de instalación

Tipo de instalación	Potencia (kWp)	Coste por kWp (R\$)	Inversión estimada (R\$)
Cubiertas (techos)	3.883	4.600 – 5.800	17.846.000 – 22.521.400
Estacionamientos (carports)	3.970	4.800 – 6.000	19.056.000 – 23.820.000
Suelo (externo) [11]	7.600	5.000 – 6.500	38.000.000 – 49.400.000
TOTAL	14.276		74.902.000 – 95.741.400

Fuente: Fundación Valenciaport.

2.7. Ahorro económico anual

La principal ventaja económica de una instalación fotovoltaica radica en el ahorro generado al evitar la compra de electricidad a la red. En este caso, el precio medio considerado es de **R\$ 0,711/kWh**, representativo del coste real pagado por consumidores industriales en según referencias explicadas anteriormente.

Con este dato, el ahorro económico anual derivado de la autoproducción de electricidad se calcula entre **R\$ 4.578.032 y R\$ 5.491.633**, en función del volumen de energía generado. Este ahorro se refleja directamente en la factura energética del puerto, reduciendo los costos operativos fijos y liberando recursos para otras inversiones o mejoras logísticas. A su vez, contribuye a reducir la exposición a la volatilidad de tarifas eléctricas, un riesgo importante en entornos industriales e infraestructuras críticas como los puertos.

No obstante, se debe considerar en este punto otras ventajas no cuantificables económicamente. Cabe destacar la independencia energética ganada con una instalación propia que redundará en la resiliencia de la instalación así como beneficios sociales derivados de la mayor disponibilidad de energía eléctrica para consumos alternativos.

2.8. Periodo de Retorno de Inversión (ROI)

El análisis de rentabilidad a largo plazo se basa en el cálculo del ROI, que indica cuántos años son necesarios para recuperar la inversión inicial con los ahorros generados. Utilizando los valores obtenidos anteriormente, el periodo de retorno del sistema completo oscila entre **13,6 años** en el escenario más favorable (menor inversión, mayor producción) y **20,9 años** en el escenario más conservador (mayor inversión, menor producción).

Estos resultados indican que el sistema es económicamente viable incluso sin incentivos fiscales, y que puede amortizarse completamente dentro de su vida útil operativa, estimada en 25 años. A partir del año de retorno, el sistema comienza a generar beneficios netos para la autoridad portuaria.

2.9. Costes de Mantenimiento

Las condiciones ambientales específicas del Puerto de Itaquí exigen un enfoque intensivo respecto al mantenimiento. La presencia constante de polvo en suspensión, propia de las operaciones logísticas a granel, junto con la salinidad del entorno costero, puede acelerar la acumulación de suciedad en los módulos y afectar la eficiencia de conversión si no se implementan protocolos de limpieza frecuentes. Por ello, **el estudio ha asumido un coste de mantenimiento anual equivalente al 2 % de la inversión inicial**, ligeramente por encima de los valores de referencia en otras instalaciones de referencia (que suelen oscilar entre 1 y 1,5 %).

Este mantenimiento incluye limpieza periódica de paneles, inspección de inversores, monitoreo de datos, revisión de protecciones y cableado, así como mantenimiento preventivo de estructuras y de la línea de media tensión que conecta la planta exterior con la subestación existente. En términos absolutos, se estima que el gasto anual en mantenimiento estará entre **R\$ 1.498.000 y R\$ 1.914.800**, dependiendo del volumen de inversión ejecutado.

2.10. Perfiles Anuales de Generación con Granularidad Horaria

El objetivo de este apartado es obtener el perfil horario de generación eléctrica para una planta fotovoltaica instalada en el Puerto de Itaquí, con el fin de evaluar la distribución temporal de la producción energética, su comportamiento estacional, y servir de base para estudios económicos, modelado de autoconsumo y análisis de impacto en red.

Para ello, se ha utilizado el sistema de modelado Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [12], desarrollado por la Comisión Europea – Joint Research Centre (JRC), el cual proporciona estimaciones horarias de producción energética para sistemas fotovoltaicos a partir de bases de datos climatológicas satelitales y modelos físicos validados para diversas regiones del mundo. Es una aplicación online de acceso público y gratuito.

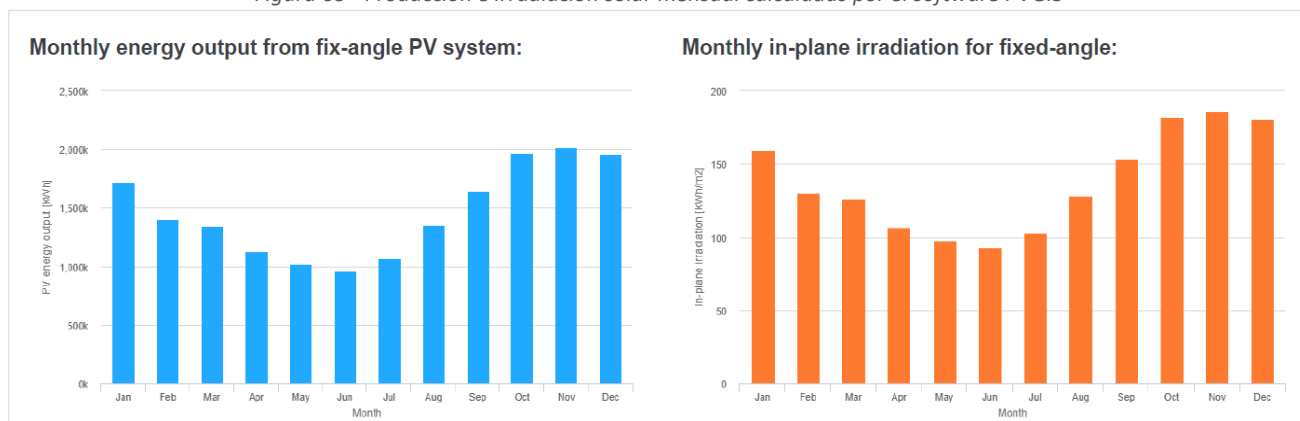
Esta herramienta permite estimar la producción horaria para una ubicación geográfica determinada, considerando variables como radiación solar, inclinación y orientación de los paneles, pérdidas del sistema y temperatura ambiente.

Tabla 22 - Parámetros de entrada a PVGIS

Parámetro	Valor utilizado
Ubicación	Puerto de Itaqui, São Luís, Maranhão (Brasil)
Coordenadas	Latitud -2.5692°, Longitud -44.3658°
Potencia nominal instalada	14,3 MWp (para análisis se escaló a 1 kWp)
Inclinación del sistema	15°
Orientación (azimute)	0° (orientación al norte, óptima para Brasil)
Pérdidas del sistema	14 % (por temperatura, suciedad, cableado, etc.)
Periodo seleccionado	Año típico de referencia (TMY - Typical Meteorological Year)
Salida deseada	Perfil horario (8.760 datos anuales)

Fuente: Fundación Valenciaport.

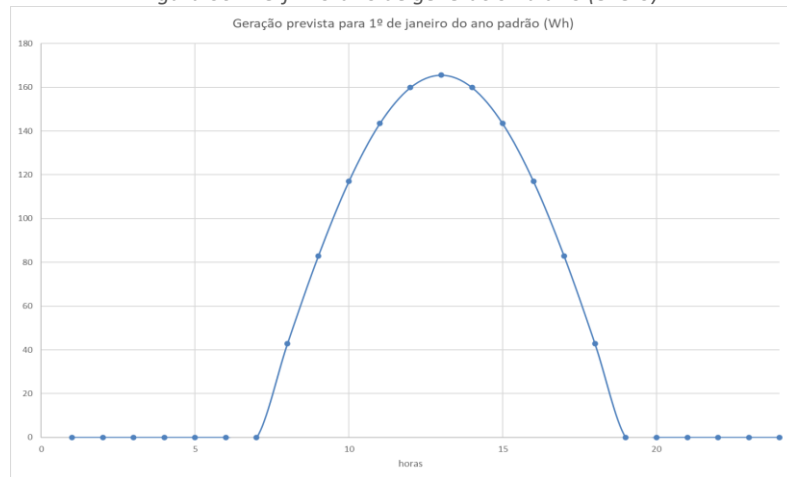
Figura 65 - Producción e irradiación solar mensual calculadas por el software PVGIS



Fuente: Fundación Valenciaport.

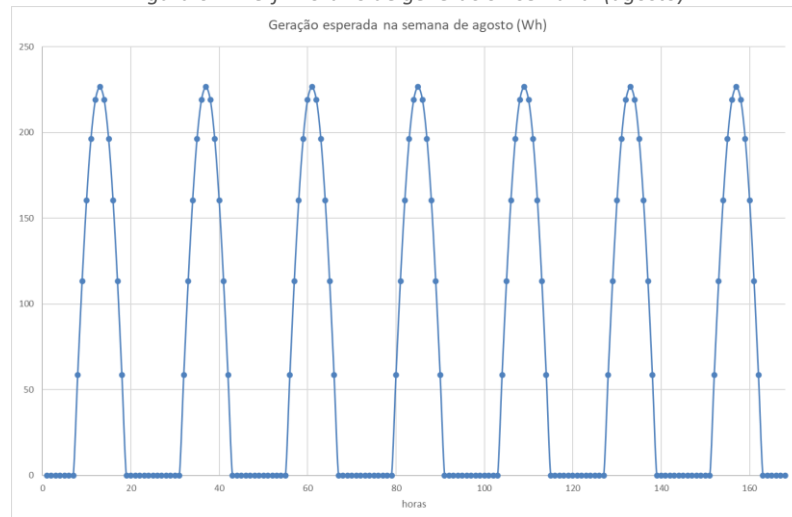
A continuación, se muestran los perfiles de generación normalizada, es decir en términos de Wh por kWp, de referencia para el primer día del año, una semana (primera) de agosto y por último el perfil de generación completo.

Figura 66 - Perfil horario de generación diario (enero).



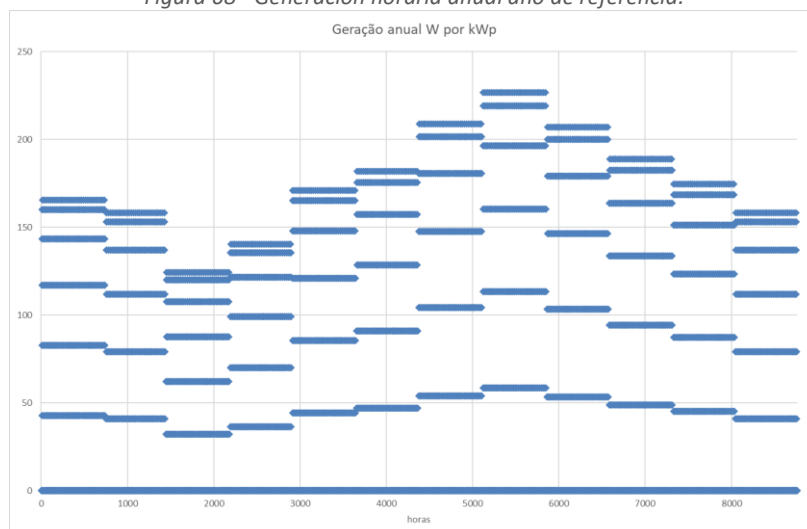
Fuente: Fundación Valenciaport.

Figura 67 - Perfil horario de generación semanal (agosto)



Fuente: Fundación Valenciaport.

Figura 68 - Generación horaria anual año de referencia.



Fuente: Fundación Valenciaport.

El análisis horario de generación fotovoltaica correspondiente al Puerto de Itaquí permite concluir que el sistema proyectado presenta una producción bien distribuida a lo largo del año, con una estacionalidad moderada y un patrón diario típico de zonas tropicales húmedas, caracterizado por amaneceres progresivos, picos de generación entre las 11:00 y 14:00 horas, y un descenso suave hacia el final de la tarde.

La variabilidad mensual responde a las oscilaciones en la radiación solar, siendo agosto y septiembre los meses más productivos, y marzo y abril los de menor generación, lo que coincide con los ciclos regionales de nubosidad y precipitación.

La generación nula durante las horas nocturnas y la concentración del 100 % de la producción en las horas solares implica que, para maximizar el autoconsumo o gestionar excedentes, es recomendable estudiar medidas complementarias como:

- sistemas de almacenamiento de energía,
- ajuste de perfiles de carga, o
- estrategias de gestión de la demanda.

De forma integrada, el perfil horario obtenido representa una herramienta esencial para el dimensionamiento eléctrico, la evaluación económica y la integración eficaz del sistema fotovoltaico en la operación energética del puerto.

3. Subtarea 2: Necesidad de Almacenamiento

3.1. Evaluación de Necesidades de Almacenamiento Energético

Durante el año 2022, la EMAP registró un consumo energético total de 2,6 GWh, según datos proporcionados por la administración portuaria. Este valor corresponde al conjunto de instalaciones operativas y administrativas del recinto suministradas por la EMAP.

Este volumen de consumo permite establecer una primera aproximación de la magnitud energética del enclave, que puede considerarse moderada en términos industriales, lo que abre la puerta a una estrategia de cobertura parcial o incluso total mediante fuentes de generación renovables.

El sistema fotovoltaico propuesto para su instalación en el puerto, con una potencia total de 14,3 MWp, ha sido modelado con datos climáticos específicos del emplazamiento mediante PVGIS. En base a dicho modelo, se ha estimado una producción anual de entre 6.438.848 y 7.726.618 kWh, dependiendo del rendimiento efectivo del sistema (rango estimado entre 15 % y 18 %).

La comparación directa entre producción estimada y consumo registrado permite extraer varias conclusiones clave:

- La planta proyectada generaría entre 2,47 y 2,97 veces el consumo actual del puerto.
- Esto implica un superávit energético significativo, que requerirá evaluar cuidadosamente los escenarios de gestión de excedentes.
- Bajo un esquema de autoconsumo directo, la instalación podría cubrir el 100 % de la demanda actual gestionada por la EMAP, incluso en los meses de menor radiación.

Este resultado subraya el enorme potencial de autosuficiencia energética de la EMAP con posibilidad de contribuir a complementar el abastecimiento eléctrico del puerto y refuerza la viabilidad técnica y ambiental del proyecto fotovoltaico, siempre que se diseñe una arquitectura de red flexible y se contemple la posible evolución de la demanda energética futura (crecimiento operativo, electrificación de maquinaria, implementación de refrigeración o electrificación de flotas).

El dimensionamiento de la planta fotovoltaica prevista en el presente estudio, con una potencia instalada de 14,3 MWp, permitirá generar una cantidad de energía anual significativamente superior a las necesidades actuales del recinto portuario. En concreto, frente a un consumo registrado en 2022 de 2.6 GWh, la instalación solar será capaz de generar entre 6,4 y 7,7 GWh anuales, dependiendo de las condiciones operativas y del rendimiento global efectivo del sistema. Esto implica que, incluso en un escenario conservador, se producirá más del doble del consumo actual, lo que obliga a plantear un análisis riguroso sobre cómo gestionar los excedentes energéticos que no puedan ser absorbidos directamente por las cargas internas del puerto.

En un primer escenario, se contempla un modelo híbrido basado en el autoconsumo instantáneo complementado con la posibilidad de inyectar los excedentes de energía a la red pública. Esta estrategia se alinea con lo establecido en diversas normativas brasileñas de generación distribuida, y sería aplicable si se establece un acuerdo técnico y comercial con la distribuidora eléctrica local, Equatorial Maranhão. Bajo esta configuración, la totalidad de la producción fotovoltaica se conecta a la red interna del puerto; la energía generada se utiliza en tiempo real para cubrir la demanda, y los kilovatios-hora no consumidos en cada momento se exportan a través de subestación o de otro punto habilitado, dependiendo del diseño de la infraestructura de evacuación. Este modelo requiere asegurar la compatibilidad técnica de la conexión, así como la implementación de un sistema de medición bidireccional y protecciones específicas para evitar el vertido incontrolado o la formación de islas eléctricas. Aunque es una solución técnicamente viable y operativamente sencilla, su eficiencia económica dependerá del régimen de compensación establecido para la energía excedente y del eventual coste por el uso de red.

Una segunda alternativa sería el almacenamiento local de la energía no consumida mediante baterías industriales. En este modelo, los excedentes que no pueden ser utilizados de forma inmediata por las instalaciones portuarias se almacenan durante las horas solares para su uso posterior, por ejemplo, en horas nocturnas o durante picos de consumo. Esta estrategia permite incrementar el índice de autoconsumo, mejorar la autosuficiencia energética del recinto y reducir la dependencia de la red eléctrica. No obstante, presenta mayores requerimientos técnicos y económicos. Sería necesario dimensionar cuidadosamente la capacidad del sistema de almacenamiento en función del perfil horario de consumo y generación, garantizar un espacio físico adecuado para su instalación y aplicar protocolos de operación seguros y eficientes. Además, habría que considerar los costes asociados al ciclo de vida de las baterías, su mantenimiento y eventual reposición. Si bien la inversión inicial puede resultar considerable, esta solución ofrece beneficios adicionales en términos de resiliencia energética, gestión de picos y estabilidad de la red interna.

Además, este escenario posibilita abordar los excedentes no como un problema operativo, sino como una oportunidad estratégica para transformar el modelo energético del puerto. En lugar de limitarse a gestionar un exceso de generación, se propone expandir la base de consumo eléctrico mediante la electrificación progresiva de nuevas cargas, de forma que parte o la totalidad de la energía excedente pueda ser aprovechada de forma directa sin necesidad de exportación ni almacenamiento. Esta estrategia podría materializarse a través de diversas acciones, la incorporación de infraestructura de recarga para flotas internas de vehículos o la migración de ciertos consumos térmicos a tecnologías eléctricas eficientes como bombas de calor. Esta aproximación permitiría no solo aumentar el grado de utilización de la energía renovable generada localmente, sino también contribuir de manera significativa a los objetivos de descarbonización del puerto, reducir la huella de carbono de sus operaciones y mejorar su competitividad ambiental.

La implementación de medidas consideradas en el presente estudio de descarbonización que incluye la electrificación de los consumos energéticos requeridos por los barcos durante su estancia en puerto haría aumentar significativamente la demanda base del Puerto. Estos excesos de producción eléctrica podrían integrarse directamente sin necesidad de almacenamiento intermedio y posibilitarían la integración de potencias mayores de generación renovable. No obstante, requerirían una infraestructura de distribución interna más compleja, lo cual quedaría fuera del alcance de este estudio.

3.2. Estudio técnico sobre el potencial de almacenamiento (Escenarios)

Con el fin de evaluar de forma rigurosa y realista la viabilidad técnico-económica del aprovechamiento solar fotovoltaico en el Puerto de Itaquí, el presente estudio ha sido estructurado en dos casos de análisis diferenciados. Esta división responde a la necesidad de comparar el rendimiento, el impacto y la rentabilidad de distintas estrategias de implementación de generación renovable, teniendo en cuenta tanto las limitaciones físicas del entorno portuario como el marco tarifario y tecnológico vigente.

En base a los perfiles de generación y considerando la demanda de referencia (distribuida uniformemente como consideración inicial) se optimizará económicamente el dimensionamiento de las baterías teniendo en cuenta los siguientes supuestos.

La generación proyectada en este caso permite cubrir una parte sustancial del consumo eléctrico actual del puerto mediante autoconsumo directo, reduciendo significativamente la factura energética con un coste de energía evitada estimado en R\$ 0,711 por kWh, según las tarifas industriales vigentes en el Estado de Maranhão. Sin embargo, debido a la limitación de superficie disponible, esta solución no permite un aprovechamiento total del potencial fotovoltaico del enclave ni la plena cobertura de la demanda portuaria en determinados periodos. Adicionalmente, la curva horaria de generación no siempre coincide con la curva de consumo, lo que abre la necesidad de valorar opciones de almacenamiento eléctrico complementario para mejorar el índice de autosuficiencia.

Dado el coste actual del almacenamiento por baterías estacionarias, estimado en R\$ 2.000 por kWh instalado [13], se ha analizado en este caso la capacidad óptima de baterías que permita desplazar energía solar desde las horas de generación máxima hacia las horas de demanda real, sin incurrir en sobredimensionamientos injustificados. El equilibrio entre el coste de inversión en almacenamiento y el ahorro generado por la reducción del consumo eléctrico de red resulta crucial para determinar la viabilidad final de este escenario.

El objetivo de la optimización es la maximización del Valor Actual Neto (VAN) de la inversión, considerando un tasa interna de descuento del 4%

Para llevar a cabo la optimización se ha utilizado una herramienta de optimización de baterías desarrollada por la Fundación Valenciaport.

Caso de estudio 1: Instalación fotovoltaica en edificios y parkings propios de la EMAP

En este primer escenario, se considera únicamente la instalación de sistemas fotovoltaicos sobre las cubiertas de edificios administrativos y en áreas de estacionamiento ya identificadas como técnicamente viables dentro del recinto portuario. Esta opción representa una estrategia de aprovechamiento de superficie ya urbanizada, con mínima afección al suelo, menor complejidad de tramitación y máxima integración arquitectónica.

Los resultados de la optimización se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 23 - Parámetros técnico-económicos de la optimización de la capacidad de almacenamiento. Caso 1.

DEMANDA (2022)	INSTALACIÓN		
1000	POTENCIA ALMACENAMIENTO	307,2795715	kW
	CAPACIDAD ALMACENAMIENTO	2230,082314	kWh
	INSTALACIÓN SOLAR	6,6	MW
	INSTALACIÓN EÓLICA	0	Aero
GENERACIÓN RENOVABLE	PRODUCCIÓN SOLAR	3205,88	MWh
	MAXIMA GENERACIÓN SOLAR	1,50	MW
	PRODUCCIÓN EÓLICA	0,00	MWh
	MAXIMA GENERACIÓN EÓLICA	0,00	MW
DEMANDA	DEMANDA TOTAL	2592,88	MWh
	DEMANDA MEDIA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÁXIMA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÍNIMA ANUAL	0,30	MWh/h
ALMACENAMIENTO	VERTIDO SIN ALMACENAMIENTO	2030,34	MWh
	VERTIDO CON ALMACENAMIENTO	1094,23	MWh
	HORAS AÑO DESBALANCE	3642	h
	ENERGÍA ALMACENADA	936,11	MWh
	PORCENTAJE RENOVABLE ALMACENADO	29,20%	%
	ENERGÍA COMPRADA A RED CON ALMACENAMIENTO	622,03	MWh
	ENERGÍA COMPRADA A RED SIN ALMACENAMIENTO	1417,33	MWh
	NÚMERO DE CICLOS	364	Ciclos
	PORCENTAJE DE CARGA DE LA BATERIA	38,17%	%
ECONÓMICOS	UTILIZACIÓN MEDIA DE POTENCIA DE BATERÍA	83,65%	%
	Inversión en Almacenamiento (ESTIMADO)	614.559,14	R\$
	Inversión en Generación Solar (ESTIMADO)	-	R\$
	Inversión en Generación Eólica (ESTIMADO)	-	R\$
	Inversión Total (ESTIMADO)	614.559,14	R\$
	PRECIO DE COMPRA ELECTRICIDAD	0,711	R\$/kWh
	AHORRO ANUAL COMPRA DE ELECTRICIDAD	565.458,04	R\$
	OPEX	21.249,89	R\$
	CASHFLOWS	565.458,04	R\$
	TASA DE DESCUENTO	4%	
	VAN	3971812,08	R\$

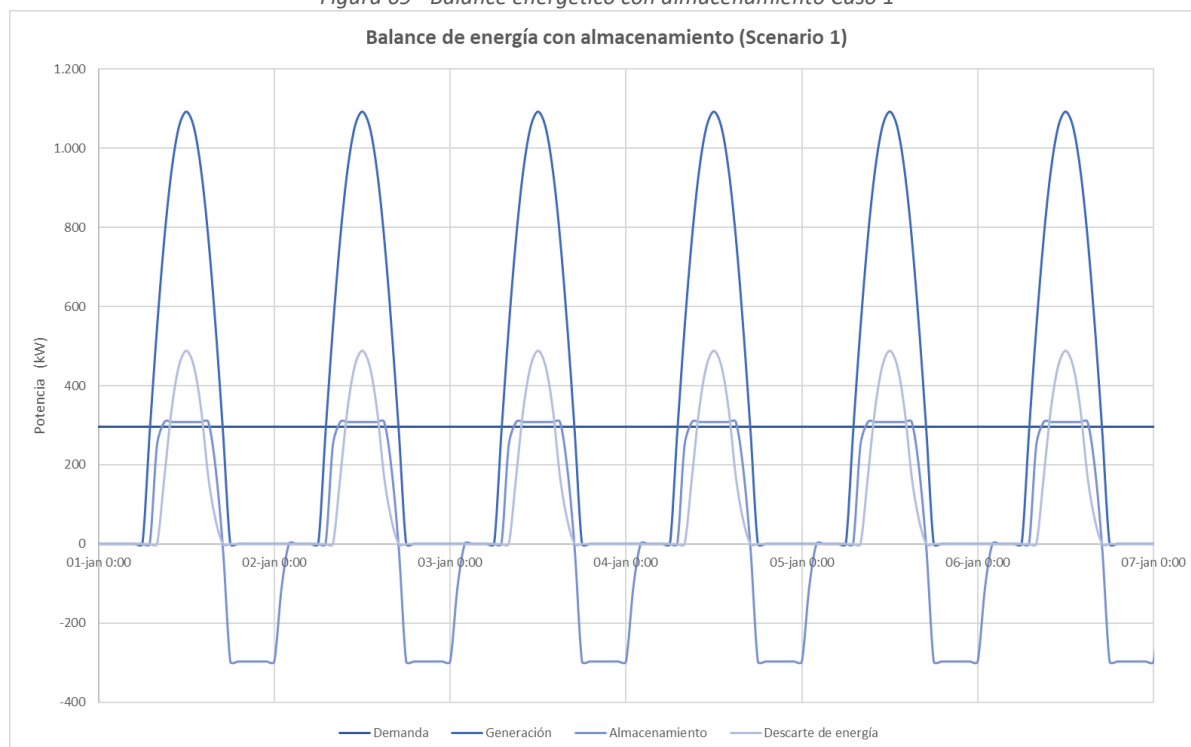
Fuente: Fundación Valenciaport.

Obtenemos para el primer caso de estudio un valor de optimización de 307 kW de potencia de almacenamiento necesaria y capacidad de 2230 kWh, esto implica una inversión de 614559 R\$ para la adquisición de baterías. Con ello se genera un ahorro de compra de la electricidad anual de 565458 R\$.

Se reduce los vertidos de electricidad renovable (por incapacidad de absorción de la red, pasado de 2030 MWh un (63% de la generación) a 1094 MWh (34%). Los costes de mantenimiento de la instalación se consideran de 21.249 R\$ [14].

La siguiente gráfica muestra el balance energético planteado para la primera semana del año considerado como base:

Figura 69 - Balance energético con almacenamiento Caso 1



Fuente: Fundación Valenciaport.

Caso de estudio 2: Instalación fotovoltaica considerando la instalación completa.

En el segundo escenario, se amplía el alcance de la instalación fotovoltaica con la inclusión de una planta adicional en suelo, ubicada en áreas externas al recinto inmediato, pero aún dentro del área de gestión portuaria o del Gobierno del Estado, como explanadas adyacentes o zonas de expansión logística.

Esta alternativa permite alcanzar una capacidad instalada significativamente mayor, lo que no solo garantiza la cobertura total del consumo actual del puerto, sino que también viabiliza nuevos vectores de consumo energético, tales como:

- Producción de hidrógeno verde.
- Electrificación de equipos portuarios.
- Suministro de energía a terceros.

Esta mayor capacidad de generación inevitablemente genera un volumen superior de excedentes solares diarios, haciendo más relevante la necesidad de almacenamiento eléctrico. Sin embargo, también se abre la posibilidad de emplear parte de esa energía adicional en usos flexibles, como la producción de hidrógeno, carga nocturna o sistemas de refrigeración, lo que reduce la presión sobre el sistema de baterías.

Tabla 24 - Parámetros técnico-económicos de la optimización de la capacidad de almacenamiento. Caso 2

DEMANDA (2022)	INSTALACIÓN		
1000	POTENCIA ALMACENAMIENTO	568,1136626	kW
	CAPACIDAD ALMACENAMIENTO	6650,266962	kWh
	INSTALACIÓN SOLAR	14,3	MW
	INSTALACIÓN EÓLICA	0	Aero
GENERACIÓN RENOVABLE	PRODUCCIÓN SOLAR	6946,08	MWh
	MAXIMA GENERACIÓN SOLAR	3,24	MW
	PRODUCCIÓN EÓLICA	0,00	MWh
	MAXIMA GENERACIÓN EÓLICA	0,00	MW
DEMANDA	DEMANDA TOTAL	2592,88	MWh
	DEMANDA MEDIA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÁXIMA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÍNIMA ANUAL	0,30	MWh/h
ALMACENAMIENTO	VERTIDO SIN ALMACENAMIENTO	5757,68	MWh
	VERTIDO CON ALMACENAMIENTO	4102,07	MWh
	HORAS AÑO DESBALANCE	4004	h
	ENERGÍA ALMACENADA	1655,61	MWh
	PORCENTAJE RENOVABLE ALMACENADO	23,84%	%
	ENERGÍA COMPRADA A RED CON ALMACENAMIENTO	2,08	MWh
	ENERGÍA COMPRADA A RED SIN ALMACENAMIENTO	1404,47	MWh
	NÚMERO DE CICLOS	1	Ciclos
	PORCENTAJE DE CARGA DE LA BATERIA	73,50%	%
	UTILIZACIÓN MEDIA DE POTENCIA DE BATERÍA	72,78%	%
ECONÓMICOS	Inversión en Almacenamiento (ESTIMADO)	1.136.227,33	R\$
	Inversión en Generación Solar (ESTIMADO)	-	R\$
	Inversión en Generación Eólica (ESTIMADO)	-	R\$
	Inversión Total (ESTIMADO)	1.136.227,33	R\$
	PRECIO DE COMPRA ELECTRICIDAD	0,711	R\$/kWh
	AHORRO ANUAL COMPRA DE ELECTRICIDAD	997.104,45	R\$
	OPEX	46.041,43	R\$
	CASHFLOWS	997.104,45	R\$
	TASA DE DESCUENTO	4%	
	VAN	6951182,97	R\$

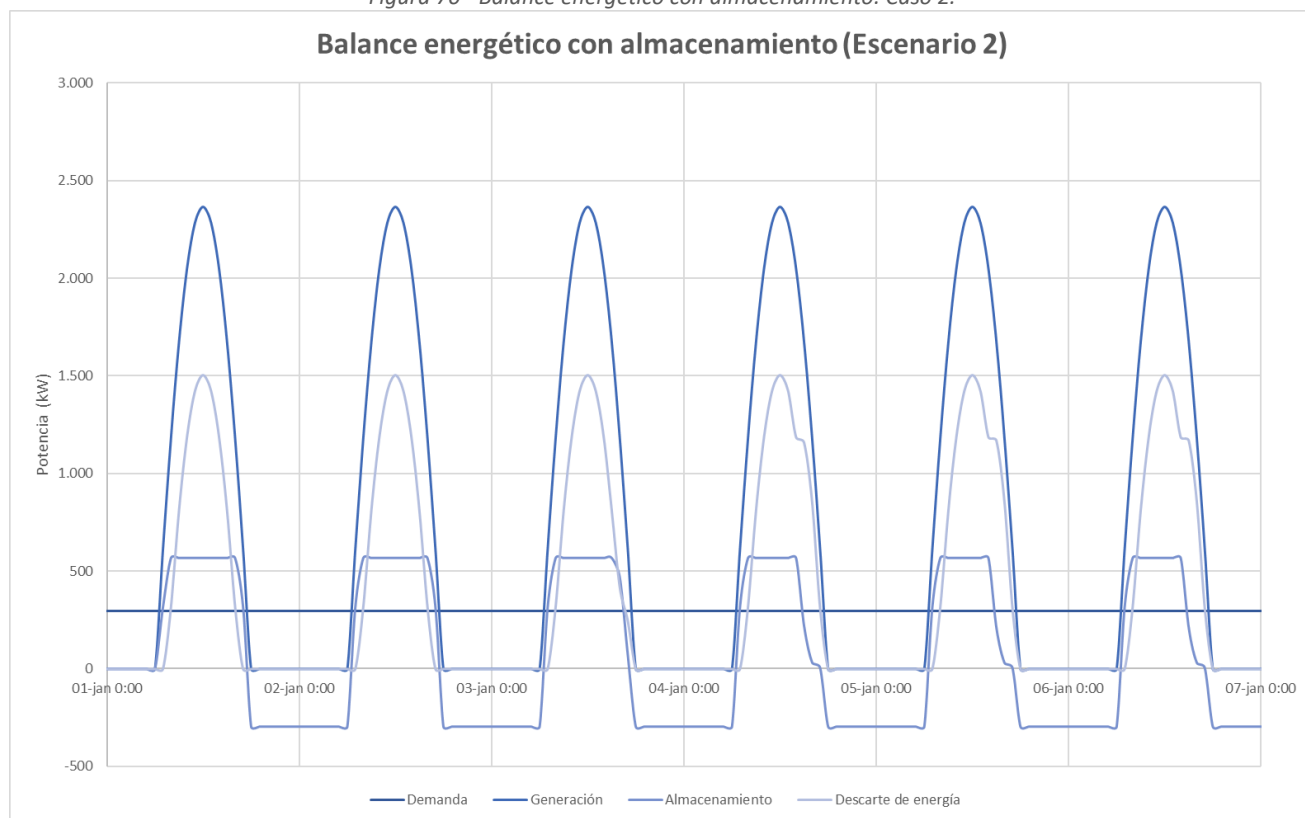
Fuente: Fundación Valenciaport.

Obtenemos para el primer caso de estudio un valor de optimización de 3857 kW de potencia de almacenamiento necesaria, esto implica una inversión de 7.714.189 R\$ para la adquisición de baterías. Con ello se genera un ahorro de compra de la electricidad anual de 996.755. R\$.

Se reduce los vertidos de electricidad renovable (por incapacidad de absorción de la red, pasado de 5757 MWh un (82% de la generación) a 4105 MWh (59%). Los costes de mantenimiento de la instalación se consideran de 46.041 R\$ proporcionales a la escala de la solución planteada.

Esto evidencia que, incluso con almacenamiento optimizado, una parte significativa de la energía renovable generada no puede ser utilizada sin nuevas medidas de flexibilización del sistema.

Figura 70 - Balance energético con almacenamiento. Caso 2.



Fuente: Fundación Valenciaport.

En términos comparativos, el primer caso presenta una mejor eficiencia relativa de aprovechamiento energético con una inversión menor y una proporción mayor de autoconsumo. En cambio, el segundo caso, aunque menos eficiente desde el punto de vista de uso relativo de la energía, permite alcanzar mayores volúmenes absolutos de energía aprovechada y mayor ahorro económico total, gracias a la magnitud de generación solar instalada.

Ambos casos demuestran la viabilidad técnica y económica de combinar generación solar y almacenamiento eléctrico en el entorno portuario, aunque también ponen de manifiesto la necesidad de diseñar estrategias complementarias —como el uso de hidrógeno verde, la electrificación de maquinaria o la implementación de microrredes— para dar salida a la energía renovable excedente que no puede ser absorbida por la red ni almacenada eficientemente.

4. Subtarea 3: produção local de hidrogênio

4.1. Evaluación del Potencial de Generación de Hidrógeno en el Puerto

El Puerto de Itaquí, gracias a su potencial solar identificado y a la infraestructura energética proyectada, dispone de condiciones técnicas favorables para implementar una instalación de producción local de hidrógeno verde. La planta fotovoltaica propuesta, con una capacidad instalada de 14,3 MWp y una producción estimada entre 6,4 y 7,7 GWh

anuales, ofrece una base energética renovable suficiente para alimentar de forma parcial o total una planta de electrólisis destinada a la generación de hidrógeno.

En este contexto, se propone dimensionar una instalación de electrólisis con una capacidad productiva máxima de 450 kg de hidrógeno por día, lo que equivale a una producción anual de aproximadamente 150.000 kg, suponiendo un régimen operativo continuo de 365 días al año. Esta cantidad de hidrógeno podría destinarse al suministro de equipos móviles portuarios, flotas logísticas internas, sistemas auxiliares o vehículos externos vinculados a la operativa portuaria. Esto permitiría la alimentación de aproximadamente 10 máquinas de logística portuaria ya identificadas en el plan de descarbonización.

Se ha optado por este plan de alcance moderado teniendo en cuenta el nivel de madurez de la tecnología y así como el grado de despliegue de estas tecnologías en entorno portuario que sigue siendo muy limitado.

4.2. Capacidad Propuesta para la Planta de Electrólisis

Con base en la estrategia de descarbonización del Puerto de Itaquí y el potencial renovable identificado en el presente estudio, se ha considerado como punto de partida el dimensionamiento de una planta de electrólisis capaz de producir un máximo de 450 kilogramos de hidrógeno por día. Esta capacidad se alinea con un escenario de desarrollo progresivo de la demanda portuaria y logística, garantizando a la vez una escala suficientemente representativa para demostrar viabilidad técnica y económica.

Para alcanzar esta tasa de producción diaria, es necesario establecer primero la relación entre el consumo energético del electrolizador y el rendimiento del proceso. Los sistemas comerciales actuales presentan consumos energéticos que oscilan entre 50 y 55 kWh por cada kilogramo de hidrógeno producido, dependiendo de la tecnología utilizada, la pureza del agua de alimentación y la presión de salida. Asumiendo un valor medio de 52,5 kWh/kg H₂, la producción de 450 kg diarios requerirá un consumo eléctrico de 23.625 kWh por día.

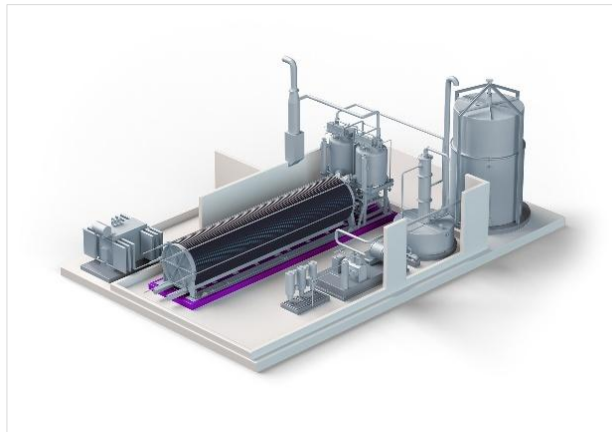
Esta demanda energética diaria equivale, en términos de potencia nominal, a 984 kW de carga continua durante 24 horas. No obstante, dado que la energía renovable —en este caso solar fotovoltaica— no está disponible de forma continua durante el día y considerando la necesidad de flexibilidad operativa (por mantenimiento, variabilidad de irradiancia o desconexiones), se propone instalar un electrolizador con una potencia nominal de 1 MW.

El electrolizador podrá operar de forma ajustada a la curva de generación solar del puerto o bien mantener una operación más estable mediante el uso de energía complementaria de la red eléctrica. Esta flexibilidad es crítica para garantizar el abastecimiento continuo de hidrógeno sin necesidad de sobredimensionar el sistema de almacenamiento.

Respecto a la tecnología de electrólisis, se contemplan dos alternativas principales actualmente consolidadas en el mercado:

Electrólisis Alcalina (AWE): Tecnología madura y ampliamente disponible, con costes de inversión relativamente bajos. Su principal limitación reside en la menor capacidad de respuesta frente a las variaciones de carga eléctrica, lo que puede dificultar la integración directa con fuentes renovables intermitentes como la solar fotovoltaica.

Figura 71 - Atmospheric Alkaline Electrolyser | Nel Hydrogen



Fuente: Nel Hydrogen.

Electrólisis PEM (PEM): Tecnología más reciente, adecuada para entornos con generación eléctrica variable. Ofrece tiempos de arranque más rápidos, mayor densidad energética y facilidad de operación a presiones elevadas, aunque con un coste de adquisición ligeramente superior al de la opción alcalina.

Figura 72 - 1MW ITM PEM electrolyser



Fuente: ITM Power.

Considerando que la planta estará conectada parcialmente a generación fotovoltaica con perfiles de producción fluctuantes, y priorizando la flexibilidad operativa, se recomienda la adopción de tecnología PEM para esta primera instalación piloto en el Puerto de Itaquí. Esta elección permite maximizar el aprovechamiento de la energía solar disponible, reducir el riesgo de pérdida de producción por inestabilidad en la fuente energética y facilitar futuras ampliaciones modulares del sistema.

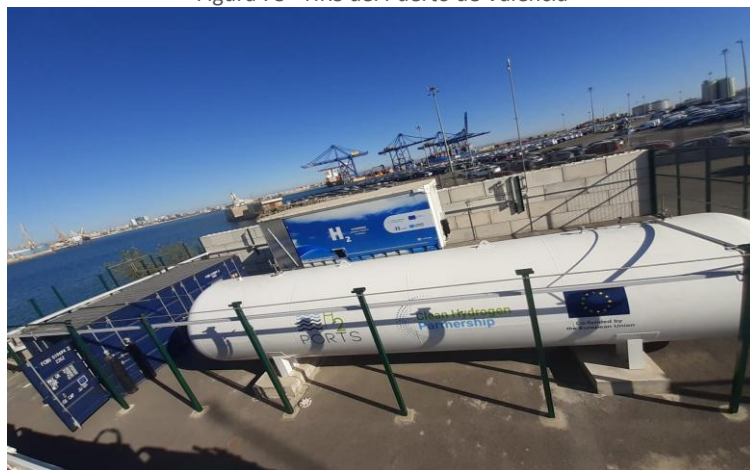
En el caso de una producción diaria de 450 kg de hidrógeno, se estima por tanto un requerimiento hídrico de aproximadamente 5.000 a 6.750 litros por día, lo que representa entre 5 y 6,75 m³/día. Se debería asegurar el suministro de este recurso desde la red del Puerto de Itaquí.

4.3. Tecnologías Propuestas para el Almacenamiento de Hidrógeno

Como sistema de Almacenamiento y dispensación directamente conectado con la producción considerada en el apartado anterior se propone la implementación de una estación de repostaje de hidrógeno (Hydrogen Refuelling Station, HRS) específicamente adaptada al entorno portuario, siguiendo el modelo operativo probado en el proyecto europeo **H2PORTS**, actualmente en funcionamiento en el Puerto de Valencia.

La solución implementada en H2PORTS ha demostrado su viabilidad técnica y operativa en un entorno logístico complejo, atendiendo con éxito a maquinaria portuaria pesada como una Reach Stacker y una cabeza tractora equipada con pila de combustible. La propuesta para Itaquí consiste en replicar esta solución como base tecnológica, adaptando su capacidad de almacenamiento a la demanda energética prevista en el presente estudio. Concretamente, se plantea **triplicar la capacidad de almacenamiento en baja presión**, pasando de los **150 kg utilizados en Valencia a 450 kg en Itaquí**, con el objetivo de abastecer una operación diaria más intensiva y continua.

Figura 73 - HRS del Puerto de Valencia



Fuente: Fundación Valenciaport.

La HRS propuesta estará formada por los siguientes subsistemas principales:

- **Unidad de almacenamiento en baja presión (30–40 bar):** sistema compuesto por racks de cilindros diseñados para contener hasta 450 kg de hidrógeno. Esta capacidad cubriría aproximadamente un día completo de operación, coincidiendo con el ritmo de producción de la planta de electrólisis dimensionada. El almacenamiento en baja presión permite una mayor seguridad en entornos operativos complejos y reduce los requerimientos técnicos de los equipos de transferencia.
- **Sistema de compresión y dispensado:** módulo de compresores que eleva la presión del hidrógeno desde el almacenamiento primario hasta los niveles requeridos para el repostaje (350 o 700 bar, en función del tipo de vehículo o equipo). Esta unidad estará equipada con un sistema de control automatizado, refrigeración y gestión de caudal, además de uno o más dispensadores con conexión estandarizada.

- **Sistema de control, seguridad y SCADA:** integración de sensores, válvulas de corte, detectores de fugas, sistemas de ventilación y extinción, así como un sistema de monitorización remota en tiempo real (SCADA) para la operación segura del sistema.
- **Contenedor técnico modular (plug & play):** todos los sistemas irán integrados en una estructura compacta y transportable, permitiendo su instalación en entornos variables del recinto portuario sin necesidad de obra civil intensiva. La estación podrá trasladarse, escalarse o replicarse fácilmente en otras zonas del puerto.

Desde el punto de vista funcional, esta HRS podrá atender el repostaje de maquinaria logística pesada, flotas de servicio portuario, o incluso camiones de transporte regional o de largo recorrido que operen en el entorno del puerto. La capacidad de 450 kg de almacenamiento diario coincide con el volumen máximo de hidrógeno producido por la planta de electrólisis prevista, lo que permite cerrar un ciclo completo de generación, almacenamiento y consumo local, sin excedentes ni necesidad de evacuación externa.

4.4. Dimensionamiento económico

La implementación de una infraestructura completa de producción, almacenamiento y dispensación de hidrógeno verde en el Puerto de Itaquí requiere no solo de una base tecnológica sólida, sino también de una planificación económica rigurosa y detallada. En este apartado se presenta el dimensionamiento económico global del sistema propuesto, teniendo en cuenta los distintos componentes que integran la cadena de valor del hidrógeno: desde la electrólisis del agua impulsada por energía renovable, hasta el almacenamiento intermedio y la dispensación final para aplicaciones portuarias o logísticas.

El modelo adoptado se ha desarrollado bajo criterios de modularidad, escalabilidad y replicabilidad, con referencias directas al proyecto europeo H2PORTS, adaptado a las condiciones operativas, climáticas y regulatorias del entorno brasileño. Se ha tomado como base una planta de electrólisis de 1 MW de potencia nominal, con una capacidad de producción de hasta 450 kg de hidrógeno por día, y un sistema de almacenamiento asociado en tanques de baja presión, con capacidad equivalente para asegurar la operatividad diaria sin interrupciones. La estación de repostaje (Hydrogen Refuelling Station, HRS) también ha sido dimensionada para atender maquinaria portuaria o vehículos pesados.

Los costes aquí presentados incluyen todos los elementos necesarios para una solución llave en mano: adquisición de equipos, tratamiento de agua, sistemas de compresión, seguridad, obra civil, integración e instalación. Esta aproximación permite disponer de una visión clara del esfuerzo inversor requerido para la puesta en marcha del sistema, así como para la planificación futura de escalado, operación y mantenimiento. La estimación económica no solo constituye una herramienta de análisis técnico, sino también un insumo clave para la evaluación de viabilidad financiera, búsqueda de financiación pública o privada y toma de decisiones estratégicas en el marco de la transición energética del recinto portuario.

Tabla 25 - Estimación de costos por bloque funcional para el sistema de hidrógeno verde.

Bloque funcional	Componente	Descripción técnica	Coste estimado (R\$)
Generación	Electrolizador PEM de 1 MW	Sistema completo, incluye stack, inversores, control, integración. Producción: ~450 kg/día.	R\$ 11.000.000
	Sistema de tratamiento de agua	Ósmosis inversa, para producir ~8 m³/día de agua ultrapura.	R\$ 700.000
	Balance de planta e infraestructura	Obra civil, electricidad, refrigeración, controles, integración general.	R\$2.500.000
Subtotal generación			R\$ 14.200.000
Almacenamiento	3 tanques de baja presión (150 kg c/u)	Depósitos cilíndricos horizontales, de acero, certificados. Capacidad total: 450 kg @ 30–40 bar.	R\$ 1.600.000
	Sistema de instrumentación y seguridad	Válvulas, sensores de presión, control de temperatura y purga, integrado al SCADA.	Incluido en otros bloques
Subtotal almacenamiento			R\$ 1.600.000
Dispensación	Compresor de alta presión (350–700 bar)	Multietapa, refrigerado, para alimentación de surtidor a vehículos o maquinaria.	R\$ 2.000.000
	Dispensador (1 punto de carga)	Surtidor estandarizado con manguera, acoplamiento y refrigeración interna.	R\$ 600.000
	Contenedor técnico + integración	Sistema plug & play en skid contenedor con climatización, seguridad, SCADA.	R\$ 1.600.000
	Instalación y puesta en marcha	Transporte, permisos, montaje, documentación y capacitación.	R\$ 600.000
Subtotal dispensación			R\$ 4.800.000
TOTAL		Sistema de generación, almacenamiento y suministro de 450 kg/día	R\$ 20.600.000

Fuente: Fundación Valenciaport.

4.5. Cálculo del LCOH – Coste Nivelado del Hidrógeno en el Puerto de Itaquí

El coste nivelado del hidrógeno (LCOH, por sus siglas en inglés) representa el coste medio por kilogramo de hidrógeno producido a lo largo de toda la vida útil de una planta, considerando tanto la inversión inicial como los costes de operación, mantenimiento, agua y energía. Se trata de un indicador esencial para valorar la competitividad económica de los proyectos de hidrógeno renovable y para compararlos con otras tecnologías de producción o vectores energéticos convencionales.

Para el caso del Puerto de Itaquí, se ha dimensionado una instalación capaz de producir hasta 450 kilogramos de hidrógeno al día, lo que supone una producción anual de 164.250 kilogramos. A lo largo de una vida útil estimada de 15 años, la planta generaría un total acumulado de 2.463.750 kilogramos de hidrógeno. El sistema se basa en electrólisis alimentada por energía eléctrica, con un consumo específico de 52,5 kWh por kilogramo de hidrógeno producido, lo que implica una demanda eléctrica anual de aproximadamente 8.621.000 kWh.

Para el cálculo económico, se ha considerado el escenario de inversión más exigente, con un coste total de instalación de R\$ 20.600.000, que incluye el sistema de electrólisis, el tratamiento de agua, los depósitos de almacenamiento en baja presión y la estación de repostaje completa. A este valor se suman los costes operativos

anuales, principalmente el consumo de electricidad, que asciende a unos R\$ 6.125.000 anuales con la tarifa industrial vigente en el estado de Maranhão (R\$ 0,711 por kWh). A estos costes energéticos se deben añadir entre R\$ 750.000 y R\$ 1.000.000 anuales en operación y mantenimiento, incluyendo agua ultrapura, inspecciones, reemplazo de componentes y supervisión técnica.

Proyectando estos gastos durante toda la vida útil del sistema, se obtienen aproximadamente R\$ 91.880.000 en costes de energía y hasta R\$ 15.000.000 en operación y mantenimiento, lo que eleva el coste total acumulado a R\$ 127.480.000 si se suma la inversión inicial de R\$ 20.600.000. Al dividir esta cifra por los 2.463.750 kilogramos de hidrógeno producidos, se obtiene un LCOH de aproximadamente R\$ 51,74 por kilogramo de hidrógeno.

Este valor, aunque aún elevado respecto al hidrógeno gris o al azul, se encuentra dentro del rango razonable para proyectos pioneros de mediana escala alimentados parcialmente por red eléctrica. El componente energético representa más del 70 % del coste total, lo que subraya la importancia estratégica de aprovechar la planta solar proyectada para el Puerto de Itaqui como fuente primaria de energía para el electrolizador. La integración con generación renovable permitirá reducir el coste del hidrógeno en el medio plazo, mejorar su competitividad y favorecer el posicionamiento del puerto como nodo logístico bajo en carbono en la región norte de Brasil.

4.6. Integración con la Generación Renovable del Puerto

Uno de los pilares fundamentales del sistema de producción de hidrógeno proyectado en el Puerto de Itaqui es su integración directa con la planta solar fotovoltaica de 14,3 MWp evaluada en este estudio. Esta instalación, diseñada específicamente para ser explotada en el entorno portuario, cuenta con un potencial de generación eléctrica anual estimado entre 6,4 y 7,7 GWh, lo que representa un volumen energético más que suficiente para alimentar la planta de electrólisis de 1 MW y permitir una producción diaria de hasta 450 kilogramos de hidrógeno verde.

La generación solar fotovoltaica se caracteriza por presentar una disponibilidad horaria acotada y variable, concentrada principalmente entre las 8:00 y las 17:00 horas, con picos máximos de producción en torno al mediodía. Esta curva de generación, bien conocida en entornos tropicales como el de Maranhao, coincide de forma razonable con el perfil de operación del sistema de electrólisis si se configura para funcionar durante las horas solares, especialmente en los meses de mayor irradiancia. En este sentido, la selección de un electrolizador de tecnología PEM (Proton Exchange Membrane) responde a la necesidad de contar con un sistema capaz de operar con buena eficiencia en condiciones de carga parcial y responder con rapidez a la variabilidad en la generación renovable. Esta tecnología permite arranques y paradas frecuentes sin comprometer la durabilidad del stack, lo que resulta clave para un acoplamiento eficiente con energía solar.

Durante las horas de mayor generación fotovoltaica, la planta podrá cubrir de forma directa gran parte de la demanda energética del electrolizador, reduciendo al mínimo el consumo de electricidad de la red y disminuyendo de forma significativa el coste del hidrógeno producido. En los momentos en que la generación solar no sea

suficiente (ya sea por condiciones meteorológicas adversas, por demanda superior a la producción o fuera del horario solar) el sistema podrá completar su alimentación mediante la red eléctrica, garantizando la continuidad operativa sin necesidad de sobredimensionar los sistemas de almacenamiento.

Para gestionar de forma óptima este balance dinámico entre generación, consumo y almacenamiento, se recomienda la implementación de un sistema de gestión energética (EMS) que controle en tiempo real la producción fotovoltaica, el funcionamiento del electrolizador, el estado de carga de los depósitos de hidrógeno y las previsiones de consumo. Este sistema permitirá maximizar el aprovechamiento de la energía renovable, optimizar la eficiencia global del conjunto y garantizar la estabilidad operativa y la seguridad de la instalación.

El análisis comparativo realizado evidencia que la integración de un sistema de producción de hidrógeno verde en el Puerto de Itaquí permite mejorar significativamente el aprovechamiento de la energía solar generada. **En el primer escenario**, limitado a generación distribuida en cubiertas y estacionamientos, el aprovechamiento de la planta fotovoltaica pasa del 73,6 % al 88,5 % al incorporar el electrolizador, lo que supone una mejora del 14,9 % en la eficiencia del sistema.

En el **segundo escenario**, que incluye también la planta solar sobre suelo, la mejora es aún más notable: se incrementa el aprovechamiento del 25,2 % al 46,7 %, es decir, un aumento del 21,5 %, gracias a la capacidad del sistema de hidrógeno para absorber una parte significativa de los excedentes renovables. Estos resultados confirman que el hidrógeno actúa como un elemento clave para valorizar la generación renovable no consumida en tiempo real, y refuerzan su papel estratégico dentro de un modelo energético portuario más eficiente, flexible y sostenible.

La integración funcional y energética entre la planta fotovoltaica y el sistema de hidrógeno permitirá, en definitiva, cerrar un ciclo de producción local, libre de emisiones, adaptado al entorno operativo portuario y con fuerte valor estratégico. Esta sinergia posiciona al Puerto de Itaquí como un referente en la transición energética del sistema portuario brasileño y latinoamericano, con un modelo replicable, escalable y alineado con los objetivos nacionales e internacionales de descarbonización.

5. Conclusiones

El presente estudio ha permitido demostrar la viabilidad técnica, energética y estratégica de una propuesta generación renovable local mediante energía solar fotovoltaica y en la producción de hidrógeno verde como vector complementario de descarbonización. A través de un análisis detallado de la infraestructura existente, las condiciones climáticas locales y el perfil de consumo del recinto portuario, se ha definido un modelo energético robusto, escalable y adaptado a las características operativas de un entorno logístico marítimo en expansión.

La caracterización del potencial solar del puerto ha puesto de manifiesto la existencia de una superficie disponible suficiente para albergar una instalación fotovoltaica distribuida en cubiertas de edificios y aparcamientos, así como en zonas externas del entorno inmediato. Esta capacidad permite alcanzar un volumen de generación renovable superior al consumo eléctrico actual de la EMAP, abriendo la puerta no solo a la autosuficiencia energética, sino también al desarrollo de nuevas aplicaciones eléctricas o al suministro de vectores energéticos alternativos.

En lo que respecta al almacenamiento energético, el estudio ha identificado la oportunidad de incorporar soluciones de almacenamiento eléctrico como complemento clave a la planta fotovoltaica proyectada. Esta posibilidad adquiere especial relevancia en un contexto en el que la generación solar, aunque abundante, presenta una distribución horaria limitada y sujeta a variabilidad. La instalación de sistemas de almacenamiento mediante baterías permitiría maximizar el aprovechamiento de la energía renovable generada durante las horas de mayor radiación, facilitando su uso diferido en momentos de baja generación o alta demanda. Además, el almacenamiento eléctrico contribuiría a mejorar la estabilidad operativa del sistema interno del puerto, permitiría reducir la dependencia de la red en situaciones críticas, y reforzaría la seguridad energética del recinto.

La planta de producción de hidrógeno propuesta ha sido diseñada como una solución proporcionada y realista considerando el estado actual de la tecnología, pensada para integrarse directamente con la generación renovable local y para operar en coherencia con las necesidades energéticas del puerto. Su implementación permite valorar no solo el impacto ambiental positivo asociado a la descarbonización de ciertos procesos logísticos, sino también la posibilidad de posicionar al Puerto de Itaquí como nodo demostrador de tecnologías limpias, capaz de atraer inversiones, proyectos de innovación y flujos comerciales sostenibles.

En conjunto, el proyecto plantea una hoja de ruta clara hacia un modelo portuario bajo en carbono, apoyado en soluciones tecnológicas maduras, económicamente justificables y ambientalmente responsables. El Puerto de Itaquí dispone de los recursos, la infraestructura y el contexto estratégico necesarios para liderar esta transformación, y con ello convertirse en referente nacional e internacional en materia de transición energética aplicada al sector marítimo-portuario.

6. Referências

[1] https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_MA-en.html

[2] https://wcti.fb.utfpr.edu.br/anais/individuais/2023/3_25_anais.pdf

[3] https://www.tensite-energy.com/wp-content/uploads/2023/10/Ficha-tecnica-EM550-PH_V1.pdf

[4] <https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-%28V%29-F1-EN.pdf>

[5] https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/02103821/Canadian_Solar-Datasheet-CS6W-MB-AG-520-550-V1.0C3_AU.pdf

[6] Databook de la Obra de Construcción y Modernización de la Subestación Receptora del Puerto de Itaqui Itaqui - EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária- 2022

[7] <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet-2024.pdf>

[8] <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243376ti.pdf>

[9] ICMS <https://www.sefaz.ma.gov.br>

[10] PASEP/CONFIS <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br>

[11] <https://publications.iadb.org/publications/portuguese/document/O-Custo-Nivelado-da-Energia-LCOE-e-o-Futuro-da-Geração-Fotovoltaica-na-América-Latina-e-Caribe.pdf>

[12] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/

[13] <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-record-low-of-139-kwh/>

[14] <https://www.irena.org/publications/2022/Dec/Electricity-storage-and-renewables>