

ENERGÍAS MARINAS

Estudio de costo nivelado de energía en Chile

Análisis de la cadena de suministro



MERIC
marine energy research & innovation center

Reporte
Noviembre de 2018

El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



Financiado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



INTRODUCCIÓN

La industria de las energías marinas en el mundo se encuentra en vías de desarrollo y Chile no ha quedado exento de ello. Dentro de las motivaciones para impulsar esta industria en el país se encuentra la necesidad de diversificar la matriz energética, el proceso de descarbonización de la misma, y por sobretodo, llegar a posicionar al país como líder mundial en el desarrollo y aprovechamiento de las energías renovables, en donde la energía marina podría tener un rol relevante que cumplir, considerando que Chile tiene más de 4.500 km de costa y posee uno de los principales potenciales para el desarrollo de energía undimotriz del mundo.

Este documento corresponde al resumen ejecutivo del estudio que busca identificar los principales aspectos técnico-económicos que afecten o impacten la viabilidad de proyectos de energías marinas en Chile. La herramienta de análisis económico «Costo Nivelado de Energía (LCoE)» refleja de manera comparativa estos aspectos, así como también tasas de descuento por aprendizaje y riesgos financiero. Así mismo, el estudio contempla; identificar los actores claves de la industria nacional, cuantificar la captura de valor local, identificar desafíos y oportunidades de la cadena de suministro e identificar todos los ítems involucrados en la inversión inicial y los gastos operacionales durante el ciclo de vida de los proyectos.

La figura 1 y 2 muestran la capacidad instalada de energía undimotriz y mareomotriz durante los últimos años y su costo en estudios internacionales, comparadas con otras energías como la eólica y solar. Las predicciones de distintos organismos internacionales indican que estos costos a nivel global pueden reducirse en hasta un 70 % para el 2030.

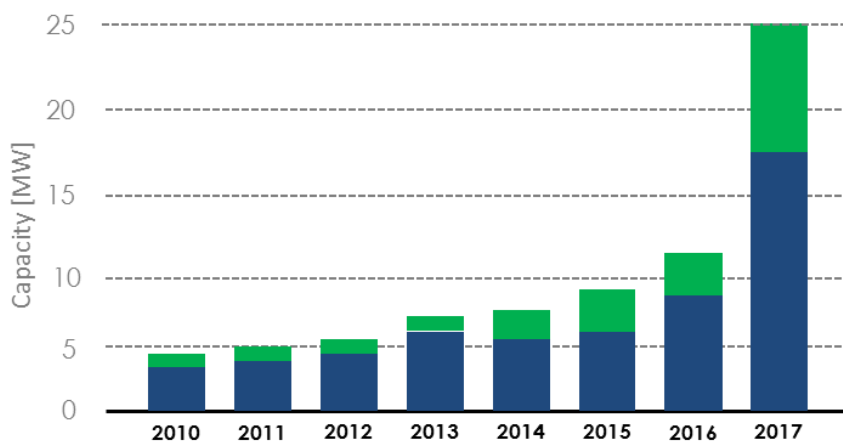


Figura 1: Capacidad instalada de energía mareomotriz (azul) y undimotriz (verde) entre 2010 y 2017

Fuente: OES, 2017

El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



Financiado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



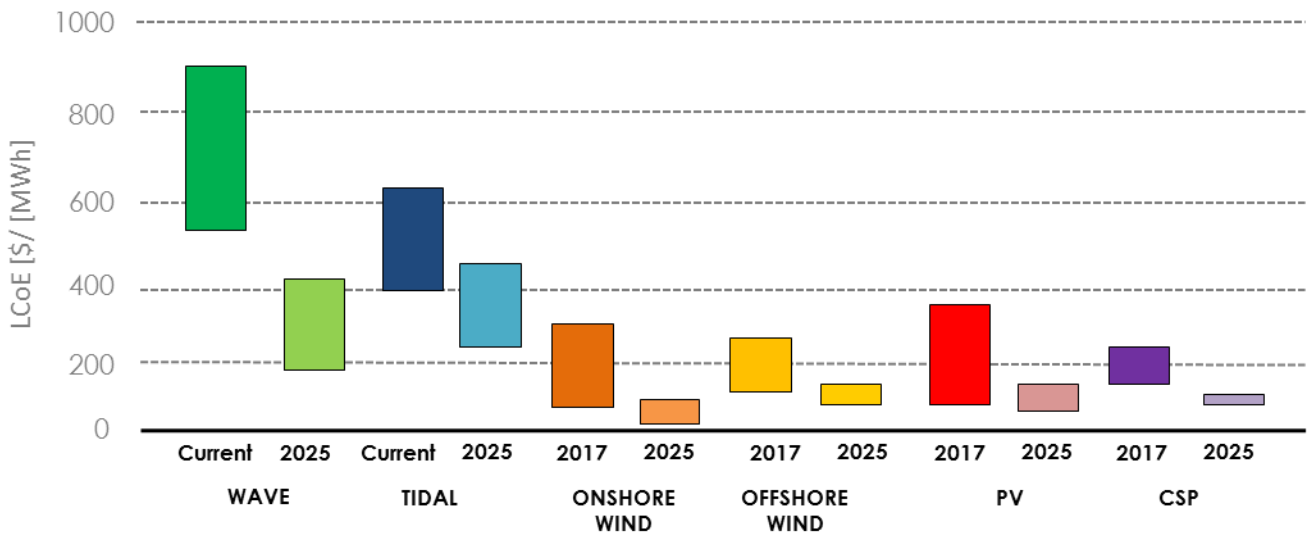


Figura 2: Comparación de LCoE de diversas tecnologías ERNC

Fuente: NREL, 2017

METODOLOGÍA

Este estudio se compone de tres fases :

1. **Estado del arte:** corresponde a la revisión documental de estudios del LCoE internacionales, análisis de sitios de implementación en Chile y, la revisión de tecnologías desarrolladas a nivel global. Además, entrevistas con los desarrolladores tecnológicos y definición de la metodología general del proyecto para obtención posterior del LCoE en Chile.
2. **Análisis de cadena de suministros:** esta fase corresponde al proceso de acercamiento a la cadena de suministro local y a la estimación de la captura de valor en Chile.
3. **Resultados de LCoE en Chile:** la tercera fase corresponde a la consolidación de información, cálculo final del LCoE por sitio y por tecnología y, un estudio socio-económico que incluye la generación de empleo y valor añadido bruto local.

A continuación se presenta un diagrama que consolida las etapas y actividades desarrolladas durante el estudio.

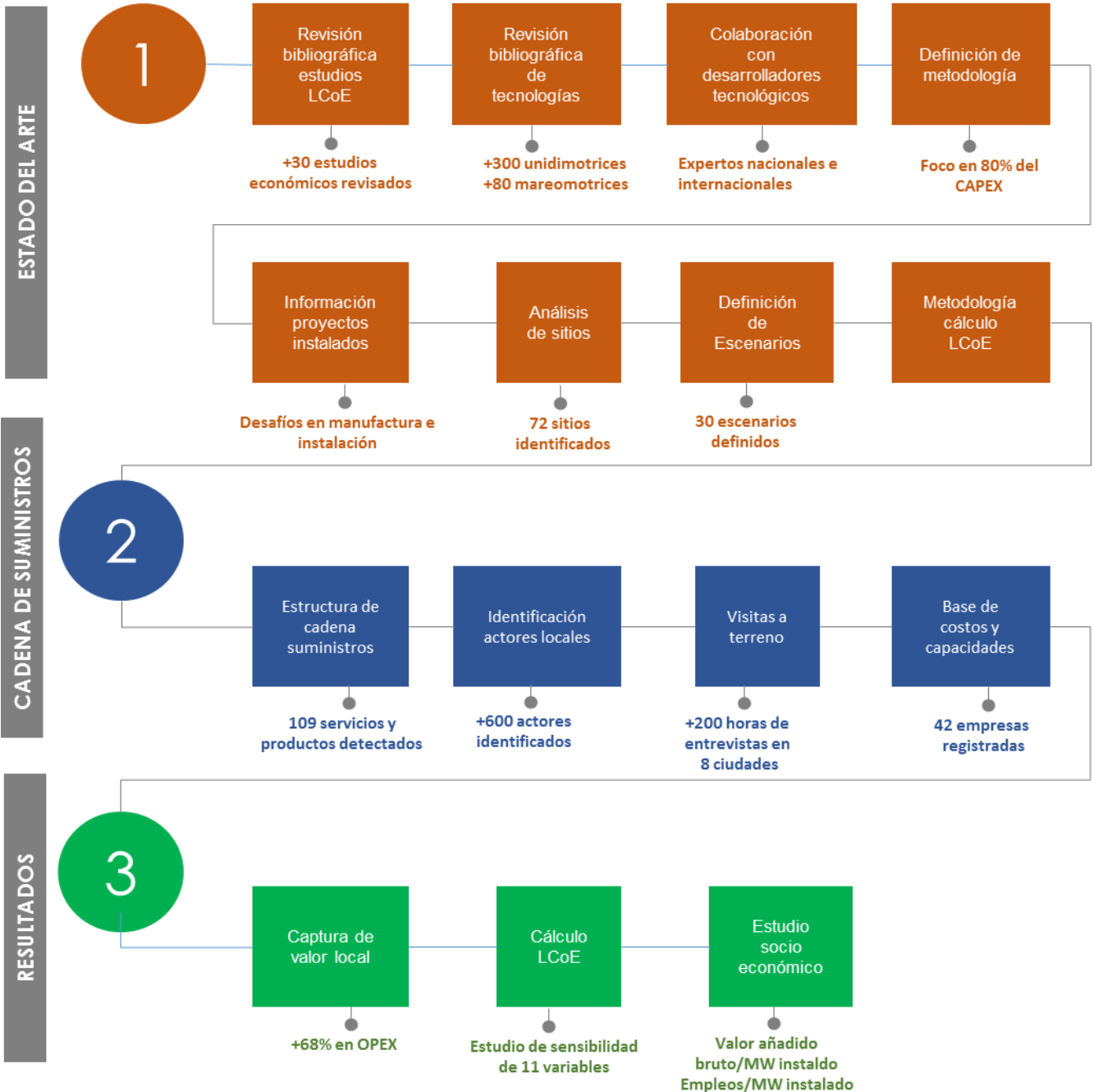
El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



DIAGRAMA DE METODOLOGÍA



El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de

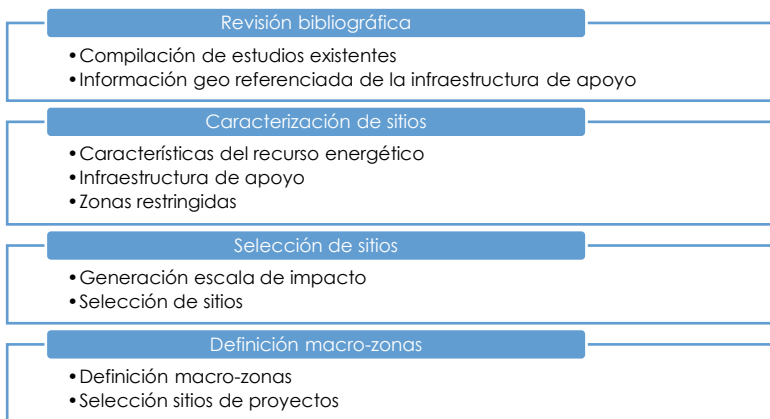


ANÁLISIS DE SITIOS EN CHILE

Dado el alto potencial energético presente en las costas de Chile, fue necesario realizar un extenso análisis de los posibles sitios y la infraestructura de apoyo en los cuales se podría emplazar un proyecto de energías marinas. Como resultado de este análisis se logró identificar 72 sitios potenciales para proyectos undimotrices y dos sitios potenciales para proyectos mareomotrices. Todos ellos fueron analizados desde un punto de vista de desarrollo de proyectos considerando todos los aspectos que impacten el costo final de implementación: distancia a la costa y puertos, batimetría, puntos de conexión a la red eléctrica, tipo de costa y caminos de acceso relevantes. Se ha realizado una selección de sitios por macrozona para el análisis del presente documento.



PROCESO ANÁLISIS DE SITIOS



SITIOS SELECCIONADOS EN MACROZONAS

Macro-Zona	Región	Sitios para proyectos undimotrices continente	Sitios para proyectos undimotrices islas	Sitios para proyectos mareomotrices
Norte	Arica y Parinacota	No evaluada por tener recursos menores a 30KW/m		
	Tarapacá			
	Antofagasta			
	Atacama			
Centro Norte	Coquimbo	Punta Lacho	Isla Pascua (5) & Isla Juan Fernández (1)	
	Valparaíso			
	Región Metropolitana			
	O'Higgins			
Centro	Maule	Tortuga	Isla Santa María	
	Biobío			
	Araucanía			
Centro sur	Los Ríos	Punta Galera		Canal Chacao
	Los lagos			
Sur	Aysén			Estrecho Magallanes
	Magallanes			

El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



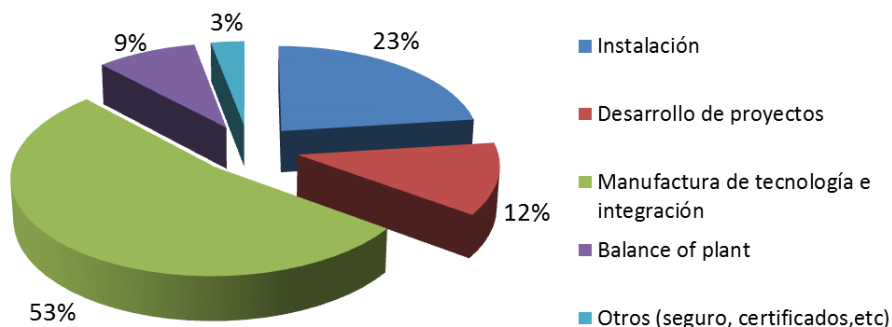
ESTRUCTURA CADENA DE SUMINISTRO

El análisis de la cadena suministro permitió identificar los actores relevantes dentro de los distintos sectores industriales y la captura de valor local. Las entrevistas con la cadena de suministro permitió documentar las capacidad, experiencias y costos asociados para las distintas etapas del ciclo de vida de proyectos de energía marinas. Este criterio de análisis de captura de valor local se cuantifica a través de porcentajes, como se muestra en la siguiente tabla.

Captura de Cadena de Valor Local	Características de Empresa						
	Capacidades			Experiencia		Interés Comercial	
	Bajo	Medio	Alto	Industria de otro sector	Energía Marina	Bajo	Alto
10%	X			X			X
30%		X		X			X
80%			X	X			X
50%	X				X		X
80%		X			X		X
100%			X		X		X

La clasificación de la cadena de suministro comprende dos principales categorías; “Desarrollo de proyectos” relacionada a los servicios identificados (62) y “Manufactura e integración de tecnología” relacionada a los productos/equipos (42). La primera abarca temas como instalación, desarrollo de proyectos, operación y mantenimiento y, desmantelamiento. La segunda abarca temas como la manufactura de sistemas hidrodinámicos, estructuras, sistemas de control y sistemas de extracción de potencia.

El análisis de la cadena de suministro también consideró el impacto que tienen los actores en los distintos ítems del CAPEX (ver gráfico a continuación)



El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



ESTRUCTURA CADENA DE SUMINISTRO

A través del análisis de los actores locales (visitas y entrevistas) se logró medir la captura de valor local, para cada servicio y producto identificados a lo largo de vida de un proyecto de energías marinas. En la tabla a continuación se puede revisar el detalle.

Supply chain				
Main supply chain	Category	Sub-category	Service/product	Max Local Value Capture (%)
Project Deployment	Installation	Device handling	Specialist vessels and equipment	80
			Mobilise devices to and from port	80
		Foundation and moorings	Installation vessels	100
			Civil and structural engineering	100
			Support vessels and ports	80
			Device access	80
		management and support	marine operations management	80
			marine warranty	80
			Subsea services	80
			Health and Safety	80
		commissioning	Device commissioning	0
			Electrical infrastructure commissioning	0
			Geotechnical surveying	80
		Site preparation	Onshore civil engineering	100
			Buoys and notifications	80
			Drilling and piling	30
			Offshore substation	10
	Electrical connection	Specialist vessels and equipment	30	
		Offshore electrical connections	80	
		Onshore electrical infrastructure	100	
		Offshore cable services	80	
	Project development	Resource assessment	Specialist vessels and equipment	100
			Modelling services	100
			Measuring services	100
			Electrical design	80
			Electrical connection	80
		Project design	Project management and professional services	80
			Front end engineering design	30
		Project planning	Foundation and mooring design	100
			Project planning	30
		O&M	Environmental	Survey services
	Environmental scoping and assessment			80
	Public relations		Specialist vessels and equipment	80
			Public relations and marketing	80
	Legal services		Stakeholder and public engagement	80
			Consents and licensing	80
	Geophysical and geotechnical		Legal support	80
			Geotechnical services	80
	Financial services		Geoconsulting	80
			Geophysical services	80
		Insurance	80	
		Project management	30	
		Business planning	30	
		Accountancy	30	
		Investment and funding	100	
		Financial due diligence	80	
	Decommissioning	Sea structures	Sea structures	80
Specialist vessels and equipment			80	
Specialist vessels and equipment		Specialist vessels and equipment	80	
		Ports	80	
Electrical recycling, disposal and relocation		Electrical	30	
		recycling, disposal and relocation	30	

El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



ANÁLISIS CADENA DE SUMINISTRO

Supply chain				Max Local Value Capture (%)
Main supply chain	Category	Sub-category	Service/product	
Technology manufacture and integration.	Hydrodynamic subsystem	Tidal	Blades	80
			Flow modifier (duct)	80
			Low hydro turbines	80
		Wave	Overtopping	80
			Hull forms	80
			Pressure vessels	80
			Oscillator	80
			Buoyancy structures	80
			SCADA systems	100
			Condition monitoring	80
	Monitor and control	Environmental monitoring	Environmental monitoring	80
			Brake systems	10
			Mechanical actuators	10
		Reactive control	Turbine yaw systems	10
			Ballasting and buoyancy systems	0
			Blade pitch systems	10
			Power electronics	80
			Mooring systems	100
	Reaction subsystem	Foundations and supports	Foundations and supports	100
		Balance of plant	inter-array and exporting cabling	cable protection
	Substations		Ancillary electrical systems	50
			Cables and accessories	80
	Device structure	Device protection	Onshore	100
			Offshore	50
			Seals	50
		Small mechanical components	Corrosion protection	50
			Housing	50
		Small mechanical components	Small mechanical components	30
		Personnel access and safety	Personnel access and safety	30
		Consumables	Consumables	80
		Auxiliary equipment	Cranes and winches	30
			Backup generation systems	30
		Load bearing structures	Composite structures	80
Machined components			80	
Concrete structures	100			
Fabrications	80			
Forgings and castings	80			
Power take off	Power conversion and conditioning	Power conversion and conditioning	10	
	Air turbines	Air turbines	10	
	Electric generators	Electric generators	30	
	hydro turbines	hydro turbines	10	
	Bearings	Bearings	10	
	Subsea electrical connectors	Subsea electrical connectors	10	
	hydraulic systems	Power packs	10	
		Actuators	10	
	Accumulators	10		
	Gearbox and gears	Gearbox and gears	30	

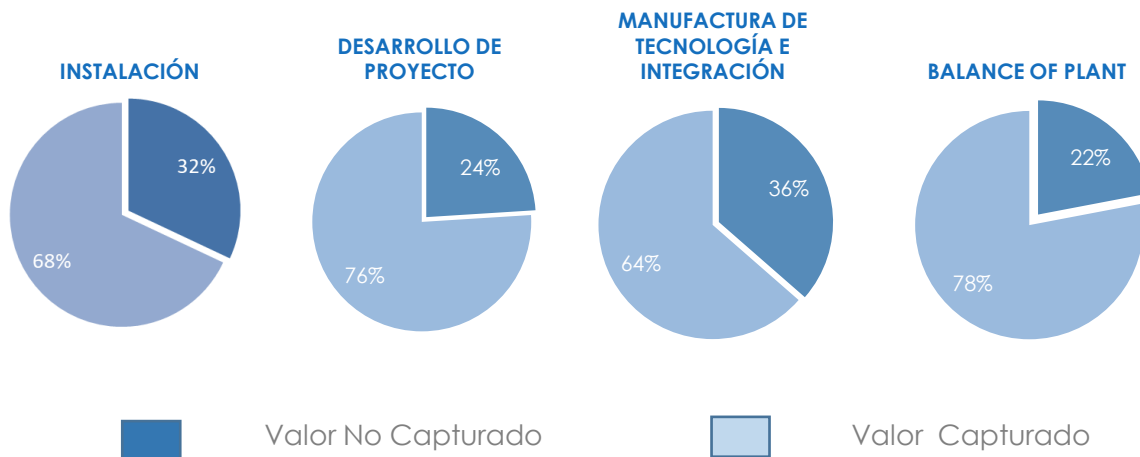
El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de

ANÁLISIS CADENA DE SUMINISTRO

De la información anterior, se pudo identificar que los actores locales serian capaces de capturar el **68% DE LA CADENA DE VALOR DE UN PROYECTO**. Esto es a pesar de que el desarrollo tecnológico e I+D se encuentra fuera del país. Este alto valor de captura es producto, principalmente, de una desarrollada industria nacional de apoyo a las actividades en el mar. A continuación se muestra la captura de valor en las principales 4 etapas de la cadena de valor.



Dentro de las empresas con mayor contribución en la captura de valor local se pueden mencionar las empresas de servicios de anclajes y fondeos, los astilleros y servicios marítimos en general, incluyendo empresas ligadas a los estudios preliminares.



El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



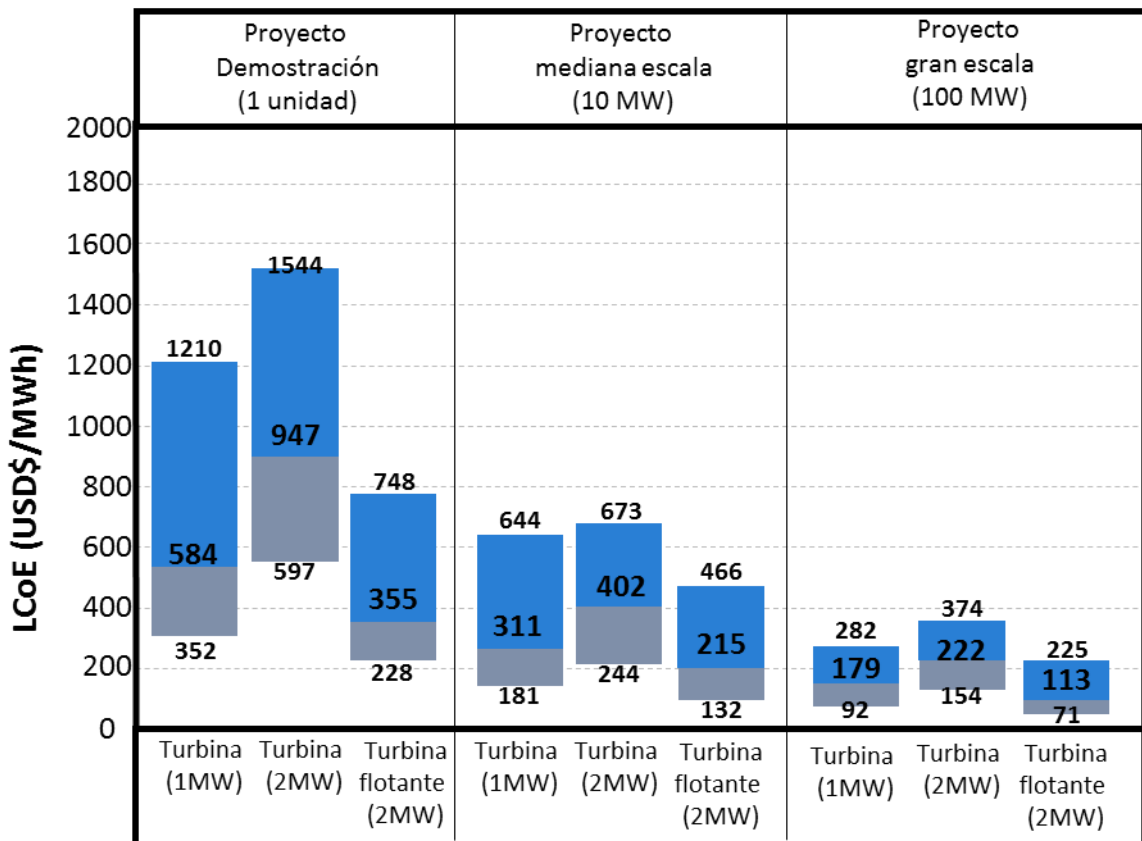
RESULTADOS LCOE- TECNOLOGÍAS MAREOMOTRICES

La evaluación del LCoE para tecnología mareomotriz se realizó en dos sitios: Canal de Chacao y Magallanes.

El análisis para el sitio Canal de Chacao consideró un proyecto demostrativo (una unidad), mediana escala (10 MW) y gran escala (100MW). Los resultados obtenidos para cada escala y tecnología se muestran a continuación.

Se realizó un análisis de sensibilidad para 11 de las variables más importantes dentro del cálculo del LCoE. Los rangos de variaciones fueron definidos de acuerdo a las características locales. Los parámetros que presentan mayor variabilidad son: Factor de carga, producción anual y costos de operación.

Canal de Chacao

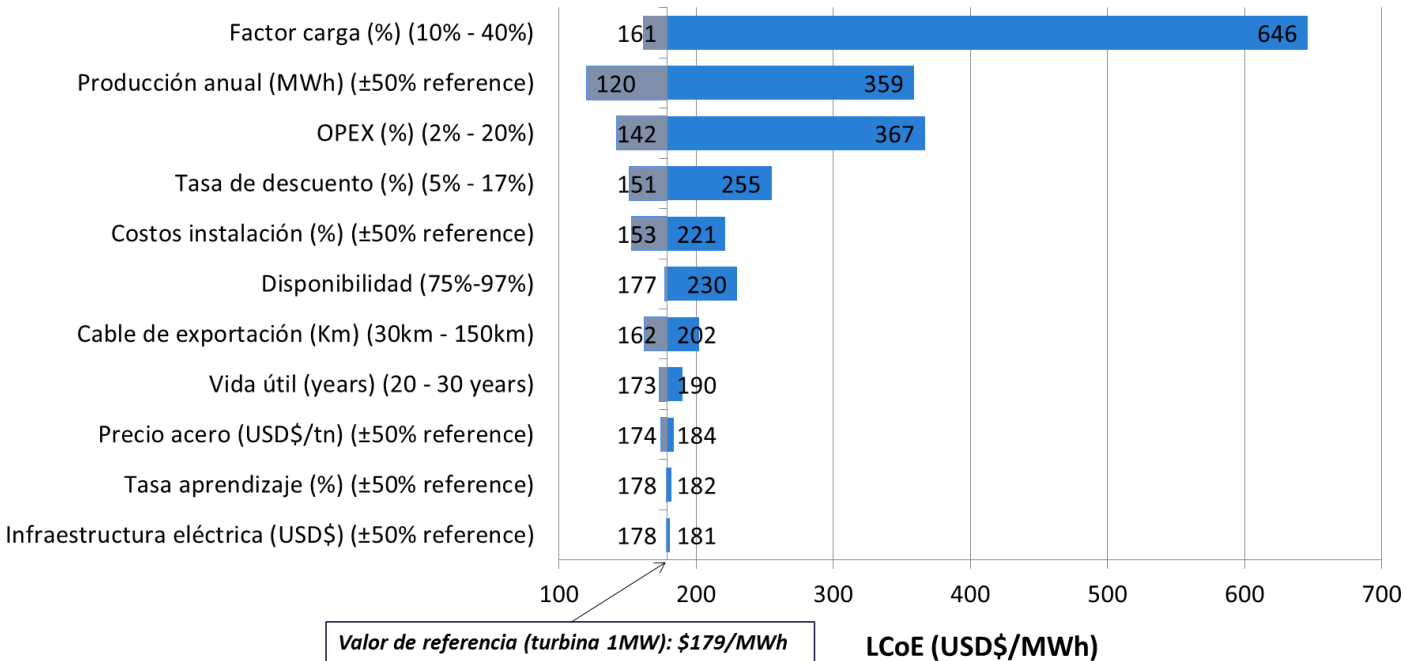
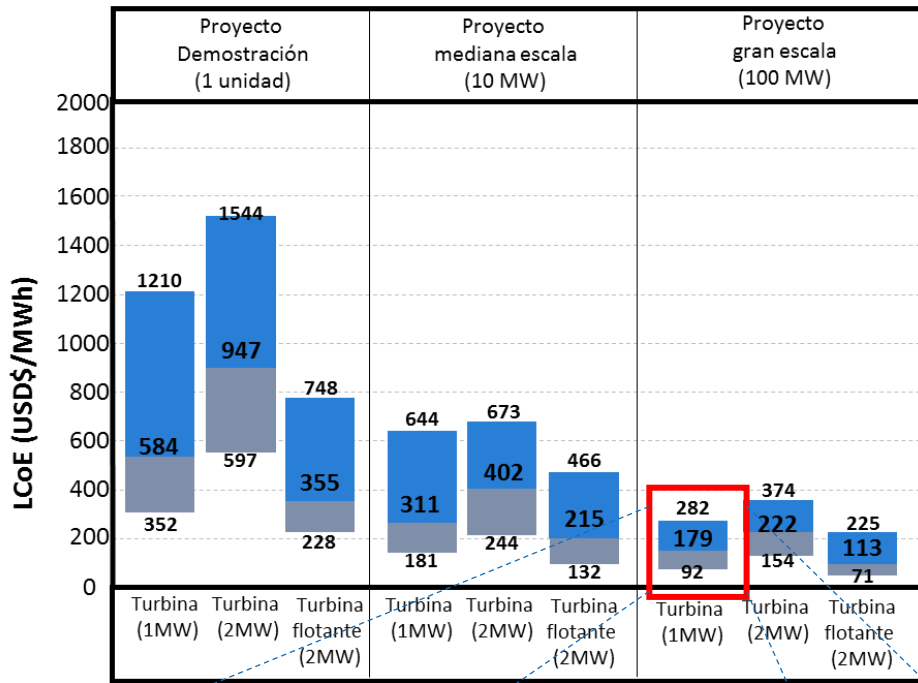


El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de

Canal de Chacao



El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por

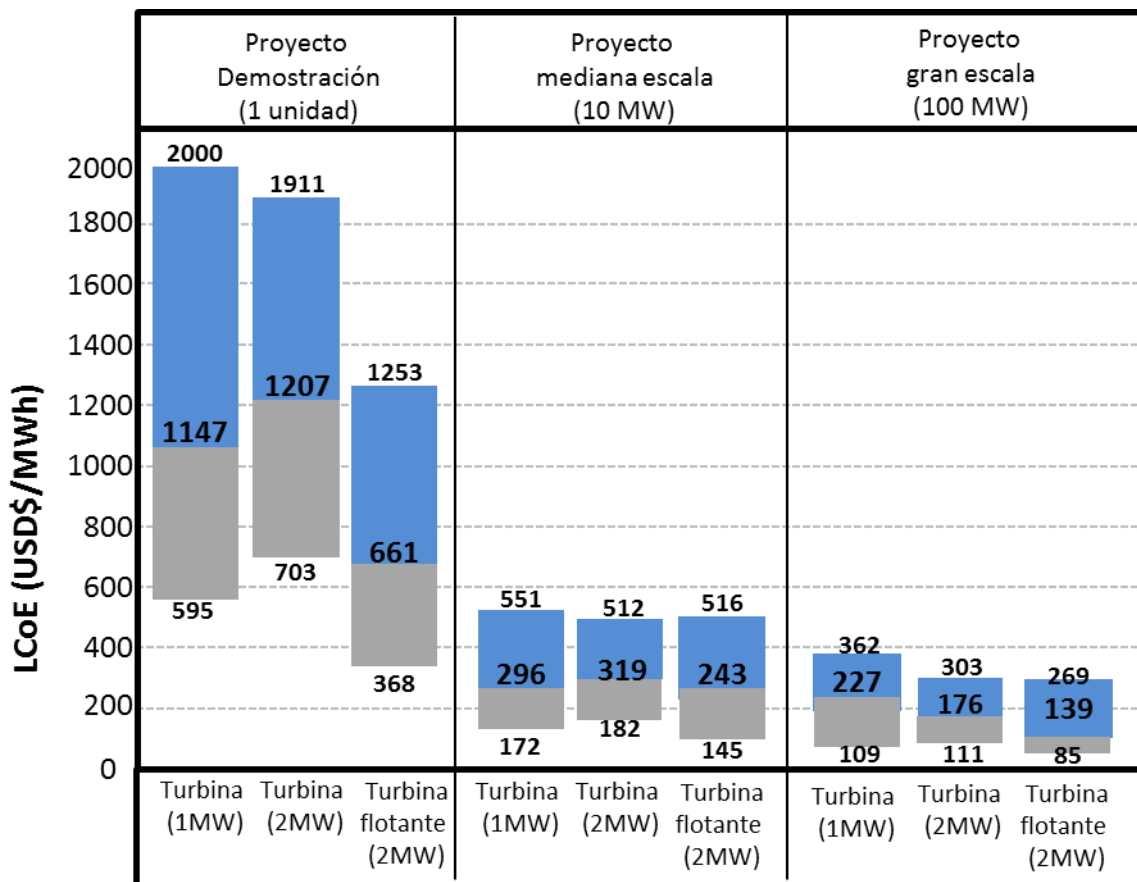


El estudio cuenta con la colaboración técnica de

RESULTADOS LCoE – TECNOLOGÍAS MAREOMOTRICES

En Estrecho de Magallanes se definieron 3 escenarios para tres tecnologías: un proyecto demostrativo (1 unidad), mediana escala de 10 MW y gran escala de 100MW. Los resultados de costo nivelados de energía se muestran a continuación.

Estrecho de Magallanes



Dispositivos de energía mareomotriz

Al igual que en el canal de Chacao, al realizar el análisis en distintos niveles de incertidumbre se aprecian en los rangos de variaciones para los distintos escenarios, siendo los más predominantes: factor de carga, producción de energía y costo operacional. Los niveles de incertidumbre disminuyen con el incremento en el escala del proyecto.

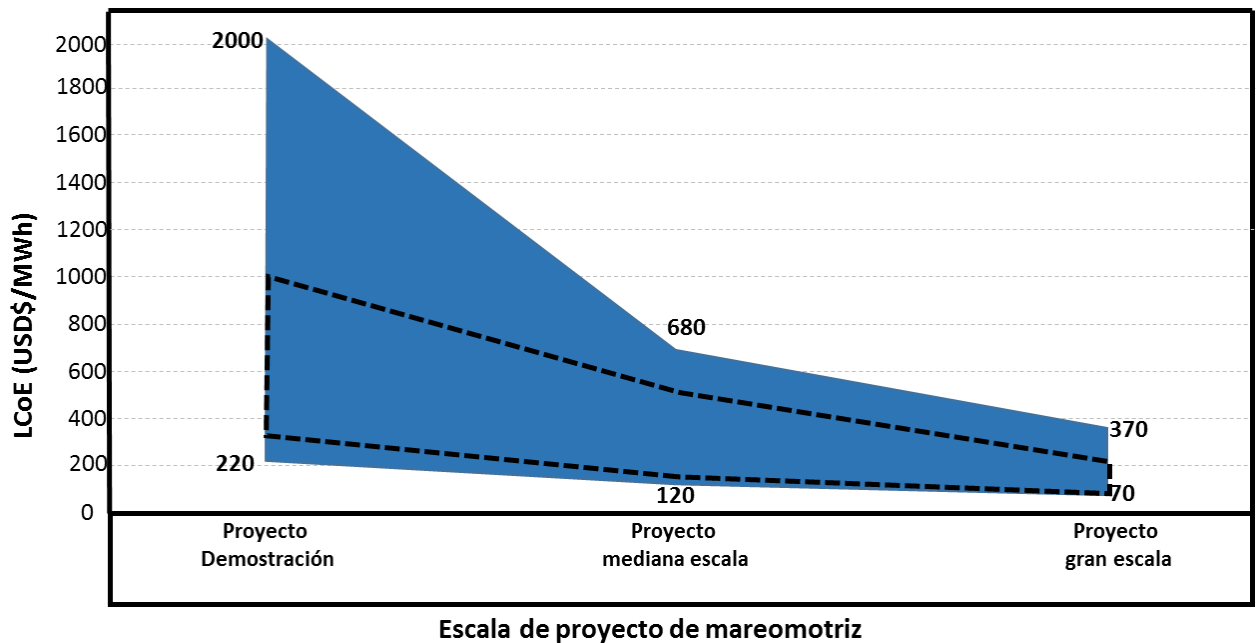
El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de

RESULTADOS LCoE – TECNOLOGÍAS MAREOMOTRICES

A continuación se muestra un gráfico comparativo con los costos nivelado de energía mareomotriz obtenidos para las diferentes escalas de proyecto y su comparación con la información disponible de estudio internacionales de Ocean Energy System (línea punteada). A gran escala el costo para proyectos de energía mareomotriz en Chile oscilan entre 70 y 370 US\$/MWh.



El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



Financiado por

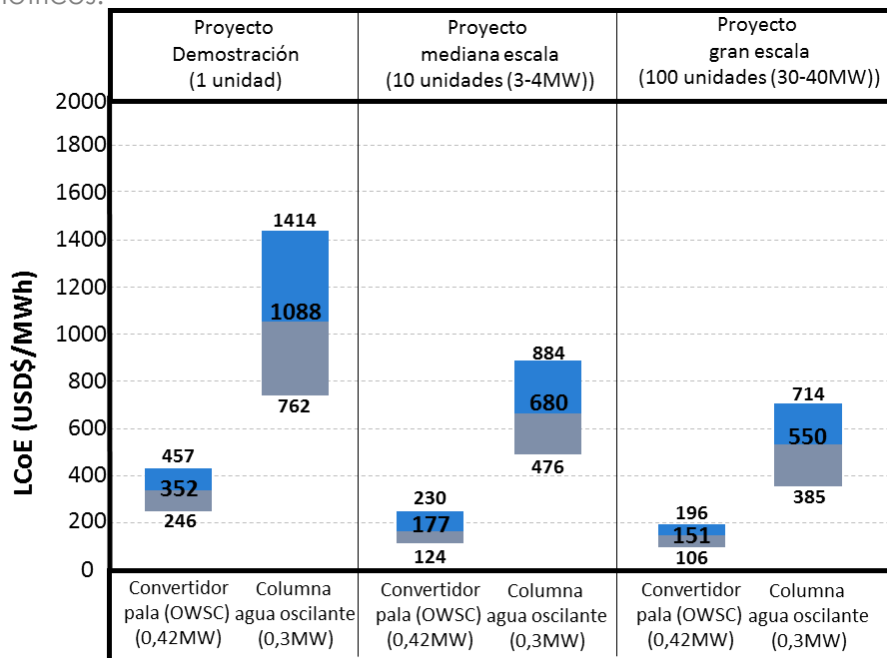


El estudio cuenta con la colaboración técnica de

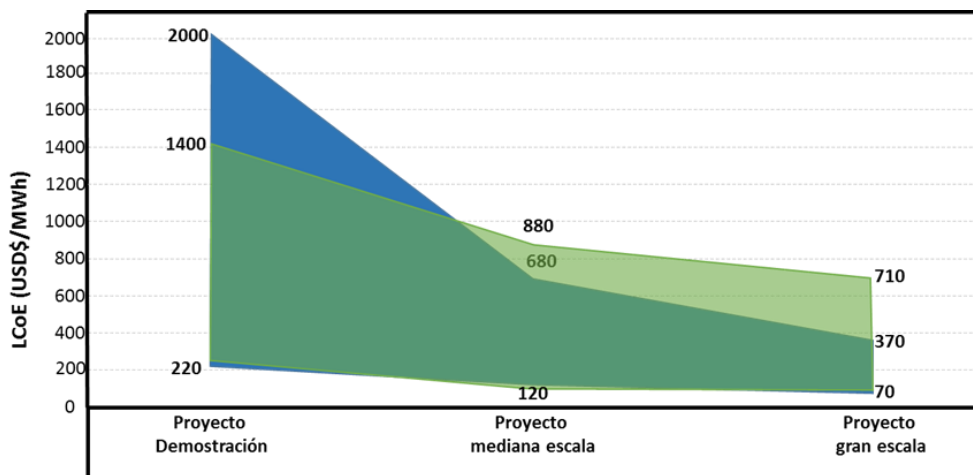


RESULTADOS LCOE – TECNOLOGÍAS UNDIMOTRICES

A continuación se presentan los resultados obtenidos con tecnologías undimotrices y se utiliza como ejemplo el sitio Punta Lacho. Se definieron tres escenarios para proyectos undimotrices en el sitio Punta Lacho (V Región): un proyecto demostrativo (1 dispositivo), un proyecto de mediana escala (10 dispositivos) y un proyecto de gran escala (100 dispositivos instalados). El análisis de sensibilidad de 11 variables se realizó para la tecnología OWSC en el proyecto de gran escala. El factor de carga es la variable con mayor impacto. Finalmente, se muestra la comparación entre el LCoE de tecnologías undimotrices y mareomotrices.



Dispositivos de energía undimotriz



Escala de proyecto de energías marinas

■ Energía mareomotriz ■ Energía undimotriz

El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por

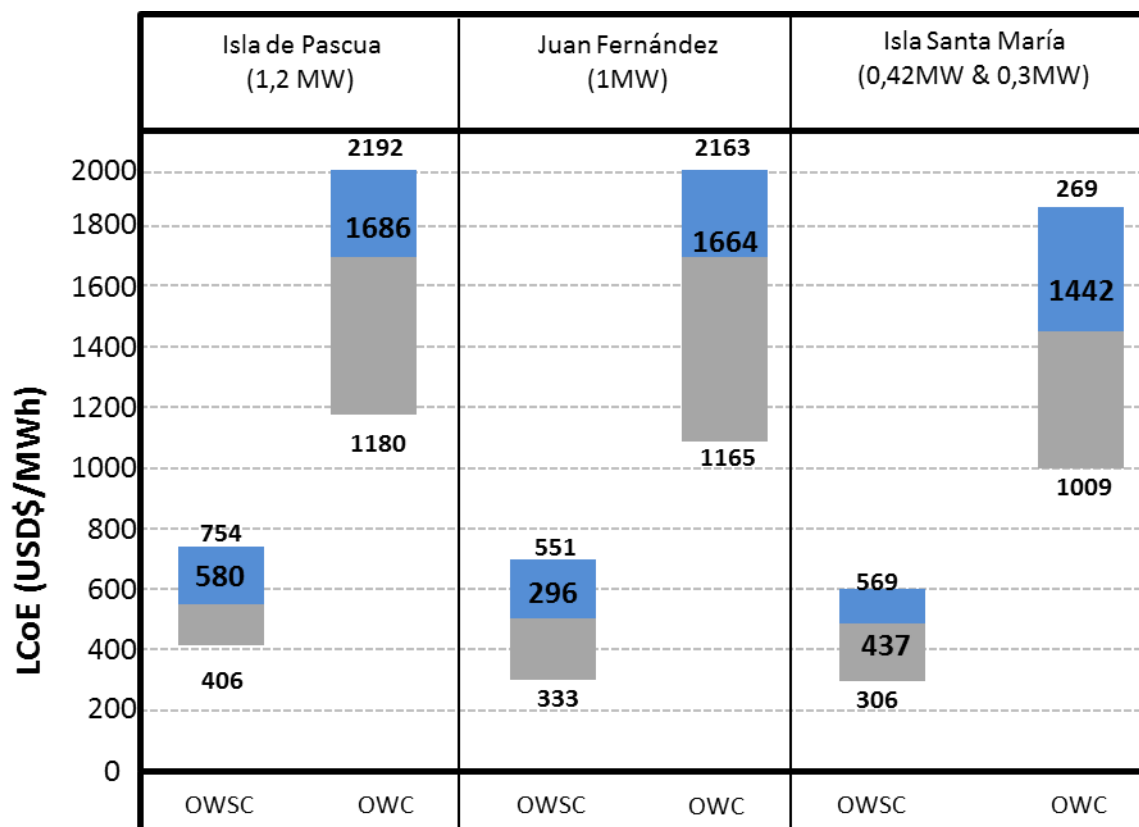


El estudio cuenta con la colaboración técnica de



RESULTADOS LCOE – TECNOLOGÍAS UNDIMOTRICES

Se realizó un análisis con tecnología undimotriz en 3 islas: Isla de Pascua (Región Valparaíso), Isla Juan Fernández (Región de Valparaíso) e Isla Santa María (Región del Biobío). Los escenarios para las islas seleccionados son únicos. Cada uno de definió de acuerdo las características operacionales y del recurso de cada isla. La capacidad instalada está dada por la cantidad de equipos que se pueden instalar en cada escenario.



Dispositivos de energía undimotriz

El estudio del LCOE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



Financiado por



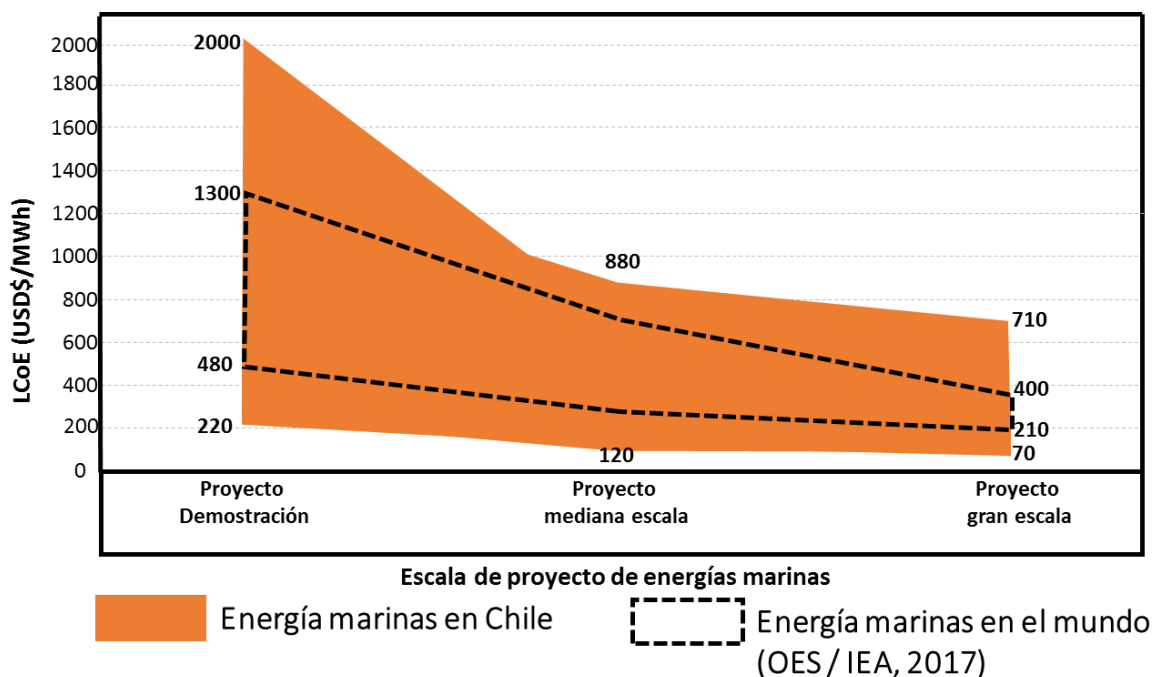
El estudio cuenta con la colaboración técnica de



RESULTADOS LCOE – CONCLUSIONES

De acuerdo lo mostrado en este documento, los resultados obtenidos para el LCoE varían dependiendo de la escala del proyecto y tecnología a analizar. Obteniéndose un valor de LCoE entre 70-370 [USD/MWh] en proyectos de gran escala mareomotriz y entre 70-710 [USD/MWh] en proyectos de gran escala undimotriz. Para proyectos demostrativos el rango de valores del LCoE de proyectos mareomotrices ($\Delta=1860$) es mayor que el rango de valores del LCoE de proyectos undimotrices ($\Delta=1160$), por lo tanto la incertidumbre es mayor. Esta incertidumbre está basada en los supuestos hechos para el cálculo de los costos de fabricación, pre-instalación e instalación de los dispositivos en el Canal de Chacao y Magallanes. Los recursos y equipamientos necesarios para la fabricación e instalación de dispositivos mareomotrices son escasos o inexistentes en Chile. Por esta razón los escenarios pesimistas consideran opciones más costosas o menos probables. Así mismo, se puede observar que el rango de valores del LCoE de proyectos undimotrices de gran escala ($\Delta=250$) es mayor que el rango de valores de LCoE de proyectos mareomotrices ($\Delta=600$). Esto se puede explicar con la economía de escala tecnológica, o sea, la capacidad en MW por dispositivos.

En este proyecto, además, se ha analizado en forma semi-cualitativa las capacidades de la captura de valor local. Destacando la relevancia de cada servicio y producto en el resultado final del LCoE. Entre los ítems con mayor impacto en el CAPEX, se ha concluido que la instalación de sistemas de anclajes y fondeos, así como también la fabricación costo efectiva de estructuras de acero naval en astilleros, son servicios que podrían potenciar o gatillar en forma competitiva una potencial industria de energía marina en Chile.



El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de



ANÁLISIS SOCIO ECONÓMICO- CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis socio económico de los potenciales beneficios que la energía marina podría dejar en Chile. Se han definido futuros escenarios al 2050 donde se considera la incorporación de las energías marinas dentro del portafolio de energías renovables de la matriz energética chilena, como se indica en la siguiente tabla.

Escenario	Energías marinas como parte de la matriz (%)	Capacidad instalada (MW)
Alto	1%	260
Medio	0,5%	130
Bajo	0,25%	65

Asumiendo una capacidad de energía marina desde 65 MW a 260 MW en 2050 (sólo 0,25 % al 1 % del total de renovables en Chile, que es un supuesto muy conservador) esto traería entre 44 billones a 183 billones CLP de valor añadido bruto y con potencial entre 1531.2 y 6242.7 trabajos a tiempo completo que serían creados en Chile. La incertidumbre en estos valores se basa principalmente en los supuestos realizados con los salarios promedios de Chile y el Reino Unido y, captura de valor local. Además de estos beneficios el desarrollo de las energías marinas podría traer otros beneficios a Chile como el desarrollo de habilidades y conocimiento que podrían ser exportadas a otros países.

En resumen, bajo los supuestos de los futuros escenarios de desarrollo de la industria de energías marinas, y tomando en consideración la captura de valor local en los diferentes ítems del CAPEX y variables económicas como ingresos per cápita y salarios promedios, se estimó que en Chile se pueden generar entre 15 y 23 empleos tiempo completo en total por MW instalado. Además, se estimó un valor añadido bruto de 700 millones de pesos chilenos aproximadamente por MW instalado.

El estudio del LCoE y análisis de la cadena de suministro es liderado por



FUNDACIÓN CHILE

En el marco



Financiado por



El estudio cuenta con la colaboración técnica de

