



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO
DE DISEÑO Y
MANUFACTURA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

Propuesta Hélice Modular para Embarcaciones Artesanales

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero en Fabricación y Diseño Industrial

Alumno: Maximiliano Guerrero Carvajal

Profesor guía: Álvaro Céspedes Escobar

Comisión integrada: -Caren Carmona Vega

-Mario Gonzalez Carvallo

- Álvaro Céspedes Escobar

2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Hélice Mecano para Embarcaciones
Artesanales

Nombre del candidato(a): Maximiliano
Guerrero

Carrera / Grado: Ingeniería en Fabricación y Diseño
Industrial

Campus: Sede Viña del mar Departamento: Diseño y manufactura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Alvaro Céspedes Escobar, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)
del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _____ Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/10/2026 Firma: _____

RESUMEN

El presente Trabajo de Título desarrolla la propuesta denominada Hélice Mecano, un sistema de propulsión modular orientado a embarcaciones de pesca artesanal de la Región de Magallanes, compuesto por un núcleo reutilizable y palas desmontables que pueden ser reemplazadas individualmente. La propuesta surge como respuesta a los costos y tiempos de detención asociados a la reparación de hélices convencionales, especialmente cuando una falla requiere retorno a puerto, varada de la embarcación, desmontaje, reparación, balanceo y posterior reinstalación.

El Capítulo 1 aborda los antecedentes generales del proyecto, la problemática asociada al mantenimiento de hélices convencionales, las características de la pesca artesanal y del sistema propulsor de las embarcaciones, además de los antecedentes de OK-SHIP SpA como empresa vinculada al desarrollo. También se presentan el análisis FODA, la metodología de trabajo y la comparación conceptual entre la situación actual y la propuesta modular.

El Capítulo 2 desarrolla el estudio de mercado, identificando como segmento inicial a las embarcaciones artesanales de más de 12 y hasta 18 metros de eslora de la Región de Magallanes. Se analizan alternativas existentes, precios de hélices, costos de reparación, antecedentes comerciales, costos de varada y botada, competidores, demanda potencial y el modelo de negocio asociado a la propuesta.

El Capítulo 3 comprende el desarrollo técnico de la Hélice Mecano. Se describe el levantamiento geométrico de una hélice convencional mediante escaneo 3D, su reconstrucción mediante ingeniería inversa en Autodesk Fusion 360, la incorporación de un perfil NACA 4412 como referencia geométrica, el diseño del núcleo modular y del sistema de corredera, y la fabricación de un prototipo físico a escala 1:2 en PLA. Asimismo, se estudian tecnologías de manufactura aditiva metálica, principalmente WAAM y LPBF/DMLS, además de los procesos posteriores de mecanizado, inspección, acabado superficial y balanceo requeridos para una futura versión funcional.

El Capítulo 4 analiza los aspectos administrativos, organizacionales y legales necesarios para continuar el desarrollo del sistema, incluyendo estructura de trabajo, perfiles técnicos, permisos asociados a modificaciones del sistema propulsor, operaciones de buceo profesional y pruebas en embarcación. También se propone una estrategia de implementación progresiva basada en fabricación tercerizada, participación de armadores, empresas locales e instrumentos públicos de financiamiento.

El Capítulo 5 desarrolla una evaluación económica preliminar mediante la comparación entre el mantenimiento de una hélice convencional y el sistema modular propuesto. Se consideran costos documentados de varada y botada, reparación de hélices, tiempos de detención operacional y valor bruto de producción potencial no realizada. Debido al estado actual de desarrollo, la evaluación financiera definitiva queda condicionada a la obtención de costos reales de fabricación y comercialización de la versión metálica funcional.

Finalmente, el Capítulo 6 presenta la evaluación de los resultados obtenidos, diferenciando los antecedentes comprobados durante el desarrollo del prototipo de aquellos que aún requieren validación experimental. Se analizan el desarrollo de ingeniería, el prototipo físico, la mantenibilidad del sistema, la reducción preliminar del tiempo de intervención, el impacto económico potencial, las limitaciones del estudio y las etapas necesarias para avanzar hacia pruebas estructurales, hidrodinámicas y operacionales en una embarcación real.

En conclusión, el trabajo permitió desarrollar y materializar una arquitectura modular de hélice a escala de prototipo, establecer una ruta tecnológica para su futura fabricación metálica y determinar que su principal potencial se encuentra en la reducción del tiempo de indisponibilidad y de las intervenciones asociadas a una falla localizada de pala.

Palabras clave: Hélice modular, pesca artesanal, ingeniería inversa, escaneo 3D, manufactura aditiva, mantenimiento naval, palas intercambiables, Magallanes.

ABSTRACT

This thesis presents the development of the Mecano Propeller, a modular propulsion system intended for artisanal fishing vessels operating in the Magallanes Region of Chile. The proposed concept consists of a reusable central hub and individually replaceable blades, with the aim of reducing the maintenance burden and operational downtime associated with conventional marine propeller failures. The project addresses situations in which propeller damage may require the vessel to return to port, undergo haul-out, propeller removal, repair or replacement, balancing, reinstallation and subsequent return to service.

Chapter 1 provides the general background of the project, including the maintenance-related limitations of conventional propellers, the operating context of artisanal fishing vessels and the main components of their propulsion systems. It also introduces OK-SHIP SpA as the company supporting the project and presents the SWOT analysis, project methodology and a conceptual comparison between the conventional maintenance scenario and the proposed modular solution.

Chapter 2 presents the market study, focusing on artisanal fishing vessels between 12 and 18 m in length operating in the Magallanes Region as the initial target segment. Existing propeller alternatives, acquisition and repair costs, commercial references, haul-out and relaunching costs, competing solutions, potential demand and the proposed business model are examined.

Chapter 3 describes the engineering development of the Mecano Propeller. The work includes the 3D scanning of an existing conventional propeller, reverse engineering and dimensional reconstruction in Autodesk Fusion 360, the use of a NACA 4412 airfoil as a geometric reference for blade development, the design of the modular hub and sliding blade-retention interface, and the manufacturing of a 1:2 scale PLA prototype. Metal additive manufacturing technologies, particularly Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) and Laser Powder Bed Fusion (LPBF/DMLS), are also evaluated together with the machining, dimensional inspection, surface finishing and balancing operations required for a future full-scale metallic prototype.

Chapter 4 addresses the organizational, administrative and regulatory requirements associated with further development of the system. This includes the proposed technical team, regulatory requirements related to propulsion-system modifications, professional diving operations and vessel testing, as well as a phased implementation strategy based on outsourced manufacturing,

collaboration with vessel owners, participation of local companies and potential public funding instruments.

Chapter 5 develops a preliminary economic assessment by comparing the maintenance implications of a conventional propeller with those of the proposed modular system. The analysis considers documented haul-out and relaunching costs, propeller repair costs, vessel downtime and the potential gross value of production not realized during periods of operational unavailability. Since a full-scale metallic prototype has not yet been manufactured, a definitive financial assessment remains dependent on obtaining validated manufacturing, replacement and commercialization costs.

Finally, Chapter 6 evaluates the results obtained throughout the project, clearly distinguishing between verified outcomes from the prototype development stage and variables that still require experimental validation. The chapter discusses the engineering design, physical prototype, maintainability of the modular concept, preliminary downtime reduction, potential economic impact, project limitations and the technical stages required to progress toward structural, hydrodynamic and full-scale operational testing on an actual vessel.

The project successfully developed and physically materialized a modular propeller architecture at prototype scale and established a technical pathway toward a future metallic version. At the current stage of development, the main potential benefit of the Mecano Propeller lies in reducing vessel downtime and simplifying maintenance interventions associated with localized blade damage, while full-scale structural and hydrodynamic performance remains subject to future experimental validation.

Keywords: modular propeller, artisanal fishing vessels, reverse engineering, 3D scanning, additive manufacturing, marine maintenance, replaceable blades, Magallanes.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
ÍNDICE.....	7
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA.....	11
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	12
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.....	13
1.1 ANTECEDENTES DEL PRODUCTO A DESARROLLAR.....	13
1.3 ANTECEDENTES DE LA PESCA ARTESANAL Y USO DE HÉLICES.....	17
1.4 COMPONENTES DE LA TRANSMISIÓN DE LA EMBARCACIÓN.....	19
1.5 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.6 TAMAÑO DEL PROYECTO.....	23
1.7 IMPACTO RELACIONADO.....	24
1.8 ANÁLISIS FODA.....	25
1.9 ANÁLISIS CAUSA - PROBLEMA - CONSECUENCIA.....	25
1.10 METODOLOGÍA.....	25
1.10.1 SITUACIÓN SIN PROYECTO.....	25
1.10.2 SITUACIÓN CON PROYECTO.....	26
1.10.3 MÉTODO DE MEDICIÓN DE BENEFICIOS Y COSTOS.....	26
1.10.4 INDICADORES DE GESTIÓN.....	26
1.11 CARTA GANTT DEL PROYECTO.....	27
CAPÍTULO 2: ESTUDIO DE MERCADO.....	28

2.1 MERCADO OBJETIVO	28
2.2 DEFINICIÓN GENERAL DEL PRODUCTO	28
2.3 COMPRENSIÓN DEL MERCADO	28
2.4 ANÁLISIS DE DEMANDA	29
2.5 ANTECEDENTES DE PRECIOS, REPARACIÓN Y DISPONIBILIDAD DE HÉLICES.....	29
2.5.1 ANTECEDENTES DE PRECIOS DE HÉLICES Y REPARACIÓN	29
2.5.2 ANTECEDENTE DE COTIZACIÓN REAL DE HÉLICES	30
2.5.3 COSTO DOCUMENTADO DE VARADA Y BOTADA.....	31
2.6 PROYECCIÓN FUTURA.....	31
2.7 OFERTA Y COMPETIDORES	32
2.8 VARIABLES QUE AFECTAN LA DEMANDA	32
2.9 DEFINICIÓN DEL USUARIO Y CLIENTE.....	32
2.10 MODELO DE NEGOCIO CANVAS EN FORMATO CANVA	33
2.11 CUANTIFICACIÓN ESTIMADA DEL MERCADO	33
 <u>CAPÍTULO 3: ESTUDIO TÉCNICO</u>	 <u>34</u>
 3.1 OBJETIVOS TÉCNICOS DEL PRODUCTO	 34
OBJETIVO GENERAL	34
3.3 DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DEL PROCESO.....	35
3.4 SELECCIÓN DE EQUIPOS	35
3.5 DETERMINACIÓN DE INSUMOS.....	37
3.6 PROGRAMA DE TRABAJO Y PROCESO PRODUCTIVO	38
3.7 INGENIERÍA DE DETALLE Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO	39
3.7.1 LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO MEDIANTE ESCaneo 3D	39
3.7.2 RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DIMENSIONAL EN FUSION 360	40
3.7.3 INCORPORACIÓN DEL PERFIL NACA 4412.....	41
3.7.4 DISEÑO DEL NÚCLEO Y SISTEMA DE ANCLAJE MODULAR	42
3.7.5 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO A ESCALA 1:2.....	44
3.7.6 RESULTADO DE LA ETAPA DE PROTOTIPADO.....	45
3.7.7 PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE PALAS MEDIANTE MANUFACTURA ADITIVA METÁLICA	46
3.7.9 APROVECHAMIENTO DE MATERIAL Y PROPIEDADES DE LA MANUFACTURA ADITIVA METÁLICA	51
3.7.10 ACABADO SUPERFICIAL Y CONSIDERACIONES ASOCIADAS A CAVITACIÓN.....	52
3.7.11 PROCESO PROPUESTO DE FABRICACIÓN DE UNA PALA METÁLICA	53

3.8 CONTROL DE CALIDAD Y PRUEBAS EN TERRENO	53
3.9 CAPITAL DE TRABAJO.....	54
3.10 PUESTA EN MARCHA	54
3.11 INVERSIÓN INICIAL Y COSTOS DE IMPREVISTOS	54
<u>CAPÍTULO 4: ASPECTOS ADMINISTRATIVOS Y LEGALES</u>	<u>55</u>
4.1 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	55
4.2 CARGOS, PERFILES Y REMUNERACIONES.....	55
4.3 RESPONSABILIDADES ADMINISTRATIVAS	56
4.5 NORMATIVA TÉCNICA Y LEGAL APLICABLE.....	60
4.6 RESPONSABILIDADES LEGALES Y RIESGOS.....	60
4.7 ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN Y FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO	61
4.7.1 ESTRATEGIA INICIAL MEDIANTE FABRICACIÓN TERCERIZADA.....	61
4.7.2 PARTICIPACIÓN DE ARMADORES COMO SOCIOS DE VALIDACIÓN.....	62
4.7.3 PARTICIPACIÓN DE EMPRESAS LOCALES	63
4.7.5 ESTRATEGIA DE FINANCIAMIENTO PROPUESTA POR ETAPAS.....	67
4.7.6 MODELO DE IMPLEMENTACIÓN RECOMENDADO	70
<u>CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA.....</u>	<u>71</u>
5.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA.....	71
5.1.1 BASE DE EVALUACIÓN	71
5.1.2 MONEDA Y TRATAMIENTO DEL IVA	71
5.1.3 HORIZONTE DE EVALUACIÓN.....	71
5.1.4 TASA DE DESCUENTO.....	72
5.1.5 INDICADORES DE EVALUACIÓN.....	72
5.2 ANTECEDENTES ECONÓMICOS DEL SISTEMA CONVENCIONAL	72
5.2.1 COSTO DOCUMENTADO DE VARADA Y BOTADA.....	72
5.2.2 COSTOS DE REPARACIÓN Y REPOSICIÓN DE HÉLICES.....	73
5.2.3 TIEMPO DE DETENCIÓN OPERACIONAL	73
5.2.4 VALOR BRUTO DE PRODUCCIÓN POTENCIAL NO REALIZADA.....	75
5.3 ESTRUCTURA DE COSTOS PROPUESTA PARA LA HÉLICE MECANO.....	76
5.4 COMPARACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR	77

5.4.1 COSTO DIRECTO POTENCIALMENTE EVITABLE	77
5.4.2 COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE INTERVENCIÓN	77
5.4.3 COSTO TOTAL DE UN EVENTO DE FALLA.....	78
5.5 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO	78
5.7 SÍNTESIS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA	80
 <u>CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....</u>	 <u>81</u>
 6.1 RESULTADO DEL DESARROLLO DE INGENIERÍA	81
6.2 RESULTADO DEL PROTOTIPADO A ESCALA.....	81
6.3 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO.....	82
6.4 EVALUACIÓN DE REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE DETENCIÓN	82
6.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA INDISPONIBILIDAD	83
6.6 EVALUACIÓN DEL COSTO DE VARADA Y BOTADA	84
6.7 LIMITACIONES DE LOS RESULTADOS	84
6.9 VALIDACIÓN FUTURA REQUERIDA.....	84
6.10 SÍNTESIS DE RESULTADOS	85
CONCLUSIONES.....	86
 <u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	 <u>88</u>

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

Siglas y símbolos relacionados con el proyecto naval, técnico y económico.

Sigla / símbolo	Significado
CAD	Computer Aided Design / Diseño asistido por computador
CNC	Control Numérico Computarizado
CLP	Peso chileno
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
DMLS	Direct Metal Laser Sintering / Sinterizado láser directo de metal
SLM	Selective Laser Melting / Fusión selectiva por láser
RPM	Revoluciones por minuto
A4	Calidad de acero inoxidable apta para ambientes marinos
Ø	Diámetro
mm	Milímetro
m	Metro
HP	Horsepower / potencia del motor
%	Porcentaje
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing / Manufactura aditiva por arco y alambre
LPBF	Laser Powder Bed Fusion / Fusión de lecho de polvo por láser
PLA	Ácido poliláctico; material utilizado en el prototipo a escala 1:2
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics; familia de perfiles utilizada como referencia geométrica
CAPM	Capital Asset Pricing Model / Modelo de valoración de activos de capital
VPN	Valor Presente Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
PRI	Periodo de Recuperación de la Inversión
RBC	Relación Beneficio-Costo

INTRODUCCIÓN

Introducción

La pesca artesanal de la Región de Magallanes depende de sistemas propulsores confiables y de una alta disponibilidad operacional. Las hélices se encuentran expuestas a impactos, corrosión, cavitación, bioincrustación y otros mecanismos de deterioro que pueden obligar a reparar o sustituir el componente. En embarcaciones que operan lejos de puerto, una falla no representa únicamente un costo mecánico: puede involucrar navegación de retorno, coordinación de varadero, varada y botada, reparación, espera por repuestos y pérdida de jornadas de faena.

El presente Trabajo de Título desarrolla la propuesta denominada “Hélice Mecano”, una arquitectura modular compuesta por un núcleo y palas desmontables, orientada a permitir el reemplazo individual del componente dañado. El proyecto comprende el levantamiento geométrico de una hélice real mediante escaneo 3D en OK-SHIP Ingeniería Naval, su reconstrucción y rediseño en Autodesk Fusion 360, la fabricación de un prototipo físico a escala 1:2 en PLA, el análisis de alternativas de manufactura metálica y una evaluación técnico-económica preliminar para su futura validación en embarcaciones artesanales de Magallanes.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Antecedentes del producto a desarrollar

El proyecto se origina a partir de una necesidad de mantenibilidad observada en embarcaciones de pesca artesanal. Cuando una hélice convencional sufre daño relevante, la intervención exigir retirar la embarcación del agua, desmontar el conjunto, reparar o reemplazar la hélice y posteriormente balancearla e instalarla nuevamente. La Hélice Mecano propone dividir el conjunto en un núcleo reutilizable y palas sustituibles individualmente, de manera de concentrar la reparación en el componente efectivamente dañado. La propuesta se encuentra actualmente en fase de diseño y prototipado geométrico. su desempeño estructural e hidrodinámico deberá validarse en etapas posteriores.

1.2 Antecedentes de la empresa vinculada



Figura 1. Identidad corporativa de OK-SHIP SpA. Fuente: OK-SHIP SpA.

1.2.1 Descripción general e historia de OK-SHIP SpA

OK-SHIP SpA es una empresa dedicada a la consultoría e ingeniería naval, orientada a apoyar a armadores y compañías marítimas en materias relacionadas con seguridad marítima, gestión operacional, cumplimiento normativo y desarrollo de proyectos de ingeniería. La empresa presta servicios principalmente en la Región de Magallanes a entidades públicas y privadas vinculadas al sector marítimo (**OK-SHIP SpA, s. f.-a**).

De acuerdo con los antecedentes publicados por la empresa, OK-SHIP inició sus actividades en el año 2021 y registra aproximadamente 250 proyectos ejecutados y más de 33 clientes, antecedentes que permiten evidenciar experiencia práctica dentro del sector marítimo desde el inicio de sus operaciones. (**OK-SHIP SpA, s. f.-b**).

La misión declarada por la organización corresponde a ofrecer servicios profesionales de consultoría e ingeniería naval a la comunidad marítima, mientras que su visión se orienta al fortalecimiento de una cultura de seguridad dentro de dicha comunidad.

1.2.2 Experiencia profesional y dirección técnica

OK-SHIP es dirigida por Pedro Álvarez R. Profesional con experiencia en inspección y auditoría de normativa nacional e internacional relacionada con seguridad marítima y prevención de la contaminación. Anteriormente desarrolló durante más de 13 años funciones en la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante de Chile, realizando inspecciones de naves y artefactos navales, auditorías de terminales marítimos y revisión de proyectos de construcción y reparación. **(OK-SHIP SpA, s. f.-a).**

Asimismo, posee formación como Ingeniero Naval con mención en Construcción Naval, titulado en la Universidad Austral de Chile durante el año 2005. **(OK-SHIP SpA, s. f.-a).**

Este conocimiento técnico constituye un antecedente relevante para la vinculación de la empresa con proyectos relacionados con diseño, mantenimiento, modificación y evaluación de sistemas utilizados en embarcaciones.

La experiencia de la organización en inspección, reparación y análisis de embarcaciones permite complementar el desarrollo de la Hélice Mecano con conocimientos directamente relacionados con las condiciones reales de operación y mantenimiento existentes en el sector marítimo.

1.2.3 Servicios de arquitectura e ingeniería naval

Dentro de sus principales áreas de trabajo, OK-SHIP desarrolla proyectos de arquitectura naval que comprenden diferentes etapas de análisis, cálculo y documentación técnica de embarcaciones y artefactos navales.

Entre las actividades desarrolladas por la empresa se encuentran:

- diseño de naves y artefactos navales
- confección de planos de arquitectura naval

- cálculos y estudios de estabilidad
- cálculos de trinca y elaboración de manuales de sujeción de carga
- cubicaciones de bodegas
- cálculos de remolque y resistencia al avance
- cálculo de escantillonaje
- determinación de áreas de obra viva, obra muerta y cubiertas
- cálculo de volúmenes de estanques y compartimientos
- evaluación de la influencia de pesos incorporados, eliminados o trasladados a bordo
- cálculos de arqueo y re-arqueo
- cálculos de francobordo
- cálculos de numerales de equipo
- cálculos asociados a operaciones de varada y desvarada
- estimación de materiales
- cálculos de potencia

Estas capacidades presentan una relación directa con el presente proyecto, debido a que una futura implementación de la Hélice Mecano requerirá considerar variables propias del sistema propulsor, potencia instalada, geometría de la embarcación y condiciones particulares de operación.

1.2.4 Consultoría, inspección y mantenimiento naval

Otra área de actividad de OK-SHIP corresponde a los servicios de consultoría e inspección. La empresa desarrolla asesorías para terminales marítimos e instalaciones portuarias, inspección técnica de nuevas construcciones, reparaciones y trabajos realizados durante ingresos a dique, además de tasaciones e inspecciones de condición de naves y artefactos navales.

Entre sus capacidades se incluyen también inspecciones asociadas a seguros P&I, mediciones de espesores y calibración de planchaje y cadenas.

La experiencia asociada a reparaciones, inspecciones y permanencias en dique resulta particularmente relevante para la problemática abordada en este Trabajo de Título. Uno de los

objetivos principales de la Hélice Mecano corresponde precisamente a disminuir las intervenciones asociadas al desmontaje completo de una hélice y reducir la dependencia de operaciones de varada frente al daño localizado de una pala.

1.2.5 Capacidad de escaneo 3D e ingeniería inversa

Una de las capacidades tecnológicas de OK-SHIP que presenta mayor relación con el desarrollo del proyecto corresponde a la utilización de un escáner tridimensional **Creaform** destinado a procesos de digitalización e ingeniería inversa.



Figura 2. Escáner 3D portátil Creaform HandySCAN 3D utilizado como referencia de tecnología para procesos de digitalización e ingeniería inversa. Fuente: Creaform (s. f.).

Este equipo permite digitalizar componentes físicos para obtener modelos tridimensionales que posteriormente pueden ser incorporados a flujos de trabajo CAD. Sus aplicaciones incluyen digitalización de estructuras, optimización de diseños existentes, integración de información escaneada a programas de ingeniería, documentación de geometrías para mantenimiento y reparación, generación de planos y obtención de modelos destinados a matrices o fabricación mediante impresión 3D.

Esta capacidad tuvo una aplicación directa en el desarrollo de la Hélice Mecano. El proyecto se inició mediante el escaneo tridimensional de una hélice convencional utilizando el equipamiento disponible en OK-SHIP. Posteriormente, la geometría digital obtenida fue importada a Autodesk Fusion 360, donde se realizó el levantamiento dimensional y la reconstrucción de los principales elementos de la hélice.

De esta manera, la propuesta desarrollada no parte exclusivamente de dimensiones teóricas, sino del análisis de un componente físico real. A partir de dicha información fue posible avanzar posteriormente hacia el rediseño del núcleo, las palas y el sistema de anclaje modular.

1.2.6 Vinculación de OK-SHIP con el proyecto Hélice Mecano

La selección de OK-SHIP como empresa vinculada al presente Trabajo de Título no responde solamente a su relación general con el sector marítimo, sino que existe una vinculación técnica directa entre sus capacidades y el desarrollo realizado.

OK-SHIP cumplió un papel relevante durante la etapa inicial del proyecto al proporcionar infraestructura tecnológica, conocimiento del entorno marítimo y una base técnica desde la cual desarrollar la propuesta.

Adicionalmente, las capacidades que actualmente posee la empresa en materias de arquitectura naval, inspección, digitalización tridimensional, gestión técnica y coordinación de trabajos marítimos permiten plantearla como un potencial actor dentro de una futura etapa de desarrollo y validación de la Hélice Mecano.

En una implementación posterior, el modelo propuesto considera que OK-SHIP podría concentrar actividades de levantamiento geométrico, ingeniería inversa, desarrollo y administración de modelos CAD, coordinación técnica, documentación y seguimiento de pruebas, mientras que procesos industriales especializados como WAAM, mecanizado CNC avanzado, tratamientos térmicos, ensayos no destructivos y balanceo podrían contratarse inicialmente a proveedores externos.

1.3 Antecedentes de la pesca artesanal y uso de hélices

La pesca artesanal en Chile ha sido un pilar económico y cultural para las comunidades costeras. Tradicionalmente, las embarcaciones, con esloras de entre 12 y 18 metros, se han propulsado mediante hélices de paso fijo fabricadas en materiales como bronce o nylon-teflón.

Históricamente, estas hélices han presentado desafíos, incluyendo la necesidad de balanceo adecuado para evitar vibraciones y desgaste prematuro.

Con el tiempo, la tecnología de las hélices ha evolucionado para enfrentar problemas como cavitación, corrosión galvánica e impactos con objetos marinos. Sin embargo, el principal problema persiste: la reparación o reemplazo de hélices de bronce exige retirar la embarcación del agua, generando costos elevados y periodos prolongados de inactividad. La Hélice Mecano busca ser un siguiente paso en esta evolución, al ofrecer una solución modular orientada a reducir costos y tiempos de reparación.



Figura 3. Embarcación pesquera artesanal 3D utilizada como referencia visual del contexto de operación. Fuente: Diseñada por OK-ship, 2024.

1.4 Componentes de la transmisión de la embarcación

La transmisión de una embarcación de pesca artesanal convierte la potencia del motor en propulsión. Sus componentes principales son:

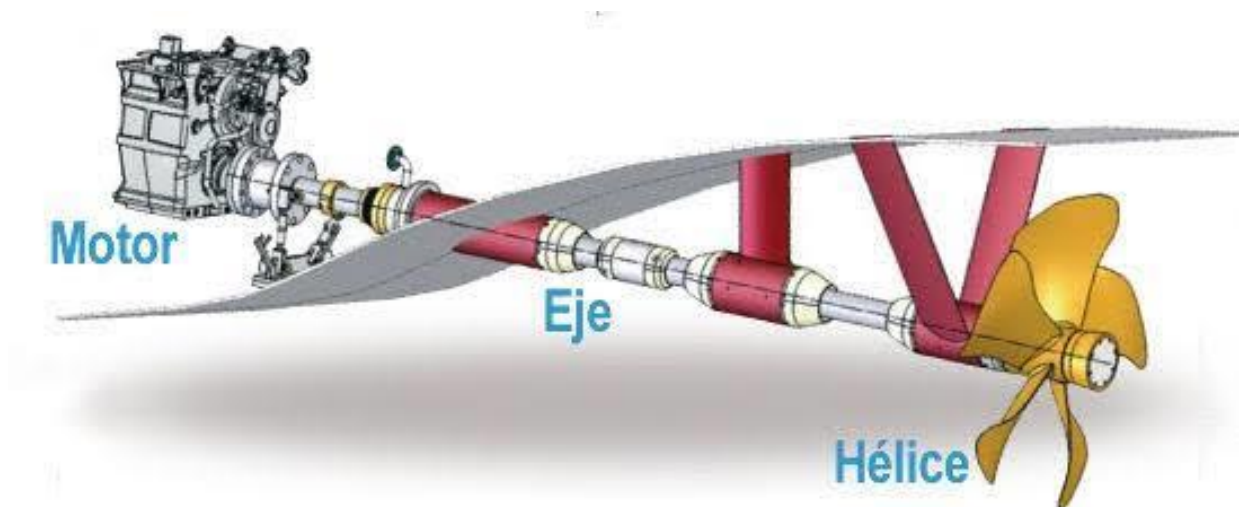


Figura 4. Esquema simplificado del sistema de transmisión de una embarcación: motor, eje y hélice. **Fuente:** Waterjet Motors, 2026.

- **Motor diésel marino:** fuente de energía de la embarcación. En naves artesanales analizadas, la potencia suele variar entre 150 y 700 HP, dependiendo de la eslora y uso.



Figura 5. Motor diésel marino representativo de un sistema de propulsión naval. **Fuente:** NauticExpo 2026.

- **Eje de la hélice:** barra cilíndrica que transfiere la potencia de rotación desde la caja de engranajes hasta la hélice. Debe estar alineada y resistir corrosión y fatiga.
- **Hélice:** componente final de la transmisión. Su rotación genera el empuje necesario para mover la embarcación. Un diseño deficiente puede causar vibraciones, pérdida de eficiencia y daño en la transmisión.



Figura 6. Hélice convencional de tres palas utilizada como referencia visual. Fuente: Mercado libre, 2026.

1.5 Definición del problema

Las hélices en embarcaciones artesanales están expuestas a cavitación, corrosión galvánica, impactos mecánicos y bioincrustación. Estos factores aceleran el deterioro de las palas y pueden reducir la eficiencia del sistema propulsor.

- **Cavitación:** formación y colapso de burbujas en las palas, causando erosión del material.
- **Corrosión galvánica:** interacción entre agua salada y metales distintos, especialmente si no se utilizan ánodos de sacrificio adecuados.
- **Impactos mecánicos:** colisiones con rocas, redes de pesca o desechos marinos.
- **Bioincrustación:** acumulación de organismos marinos que afecta el rendimiento hidrodinámico.



*Figura 7. Hélice metálica utilizada para escaneo con daño y deformación visible en sus palas **Fuente:** Elaboración propia, 2026.*

Actualmente, una reparación relevante puede requerir retirar la embarcación del agua mediante varadero o sistemas de izaje. Como antecedente documental recopilado durante el proyecto, una operación de varada y botada realizada en Punta Arenas en agosto de 2026 registró un valor de \$2.000.000 CLP netos, equivalente a \$2.380.000 CLP con IVA. Este monto corresponde a la maniobra indicada y no incluye necesariamente estadía, reparación, repuestos ni la pérdida económica asociada a los días sin faena.

1.5.1 Proceso convencional de reparación o sustitución de una hélice

Cuando una hélice convencional presenta daños importantes producto de impactos, deformaciones, cavitación u otro tipo de deterioro, su reparación normalmente requiere acceder completamente al sistema propulsor ubicado bajo la línea de flotación de la embarcación.

De manera general, el procedimiento comienza con la identificación del daño y la coordinación del ingreso de la embarcación a un varadero, astillero o instalación equipada con un sistema de izaje, como un travel lift.

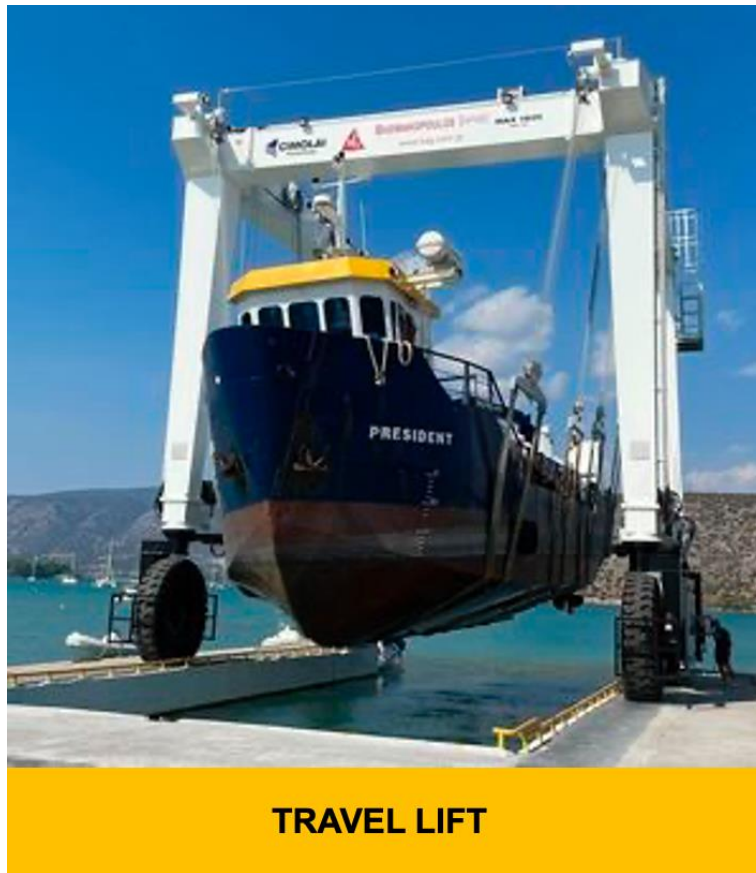


Figura 8. Travel lift utilizado para operaciones de izaje, varada y botada de embarcaciones. Fuente: Nauticexpo, 2026.

Una vez disponible la instalación, la embarcación debe ser retirada del agua y posicionada de forma segura para permitir el acceso al eje y a la hélice. Posteriormente se procede al desmontaje de los elementos de fijación que mantienen la hélice unida al eje y, dependiendo de la configuración del sistema, puede ser necesario utilizar herramientas específicas para retirar la hélice sin dañar el eje, el cono de montaje o sus elementos de transmisión.

Con la hélice desmontada se realiza una inspección destinada a determinar la magnitud del daño. Dependiendo de su estado, el componente puede ser reparado mediante procesos de enderezado, recuperación de material, mecanizado, pulido y posterior balanceo, o bien ser reemplazado completamente cuando el deterioro impide una reparación adecuada.

Antes del montaje también se recomienda inspeccionar el eje, superficies de contacto y elementos de fijación, verificando que no existan daños asociados al impacto.

Una vez reparada o reemplazada la hélice, esta debe ser instalada nuevamente sobre el eje, verificando su correcta fijación y montaje. Finalmente, la embarcación debe ser trasladada nuevamente al agua para realizar comprobaciones de funcionamiento y retornar posteriormente a sus actividades operacionales.

De forma resumida, el procedimiento convencional puede representarse mediante la siguiente secuencia:

Detección del daño → coordinación de varadero o travel lift → traslado de la embarcación → retiro del agua → acceso al sistema propulsor → desmontaje de la hélice → inspección → reparación o reemplazo → balanceo → montaje → revisión → botadura de la embarcación → retorno a operación.

Este procedimiento implica no solamente el costo directo de reparar o adquirir una nueva hélice, sino también costos asociados al izaje, utilización de instalaciones, mano de obra y, principalmente, al periodo durante el cual la embarcación permanece fuera de servicio.

La Hélice Mecano busca reducir parte de estas etapas mediante un sistema modular en el cual una pala dañada pueda ser sustituida individualmente sin desmontar completamente la hélice y, como objetivo de desarrollo, disminuyendo la necesidad de retirar la embarcación del agua.

1.6 Tamaño del proyecto

El proyecto se orienta inicialmente a embarcaciones pesqueras artesanales de más de 12 y hasta 18 m de eslora. El dimensionamiento definitivo de la hélice no se fija únicamente a partir de la eslora, ya que depende también de potencia y régimen del motor, relación de reducción, geometría del casco, diámetro disponible, paso, número de palas y condiciones de operación. Por esta razón, la propuesta se plantea como una arquitectura adaptable y no como una hélice de diámetro único.



Figura 9. Referencias geométricas de eslora y zonas de obra viva y obra muerta de una embarcación. **Fuente:** *Sailandtrip, 2026*.

1.7 Impacto relacionado

- Reducción de residuos metálicos y plásticos al reemplazar solo componentes dañados.
- Ahorro en mantención y tiempos de operación.
- Disminución del impacto ecológico por menor reemplazo completo de hélices.
- Mantención del desempeño propulsivo como criterio de diseño, cuya eficiencia deberá verificarse mediante simulaciones y ensayos comparativos.

1.8 Análisis FODA

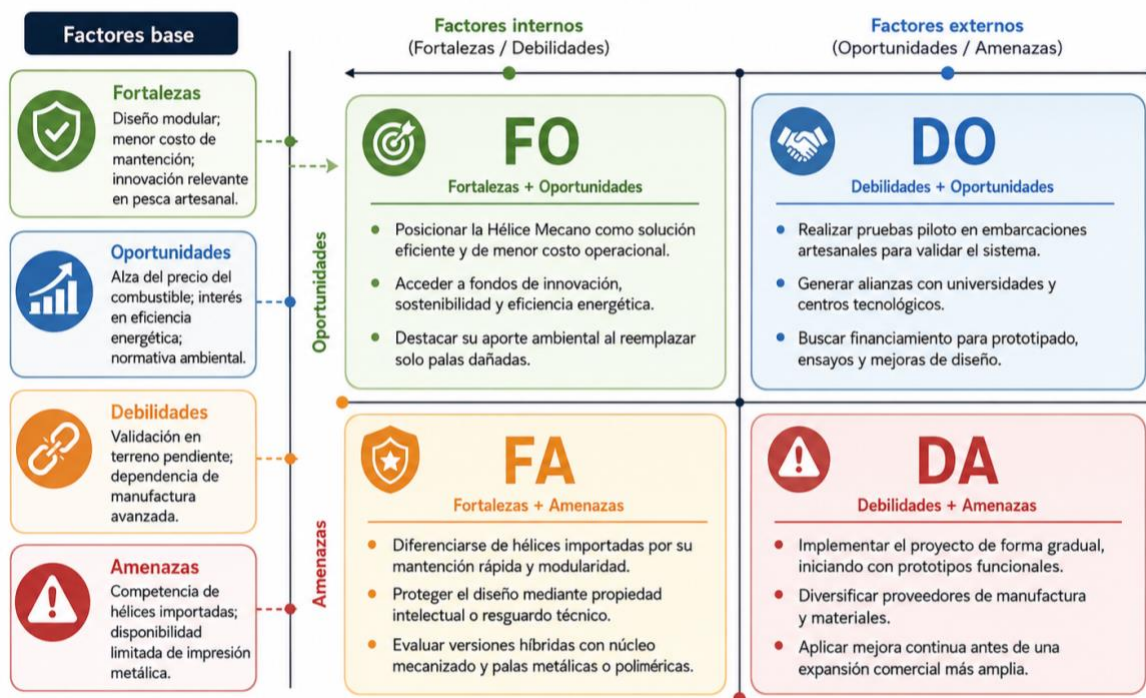


Figura 10. Matriz de estrategias FODA aplicada al proyecto Hélice Mecano. **Fuente:** Elaboración propia, 2026.

1.9 Análisis causa - problema - consecuencia

Causa	Problema central	Consecuencia
Cavitación, corrosión y golpes mecánicos generan desgaste acelerado.	Reemplazos constantes, costos operativos altos y tiempos muertos en faena.	Posible pérdida de desempeño, mayores costos de mantención y pérdida económica por inactividad.

Tabla 1.1. Análisis causa-problema-consecuencia aplicado al proyecto. **Fuente:** Elaboración propia, 2026

1.10 Metodología

1.10.1 Situación sin proyecto

Ante una falla relevante de una hélice convencional, la embarcación puede requerir retorno a puerto, disponibilidad de varadero, varada, desmontaje, reparación o reposición, balanceo, montaje, botada y posterior retorno a faena. El ciclo completo puede generar costos directos y una pérdida importante de disponibilidad operacional.

1.10.2 Situación con proyecto

La propuesta busca permitir el reemplazo individual de la pala dañada, conservando el núcleo y las palas restantes. El objetivo operacional es reducir las etapas de intervención y, cuando las condiciones de seguridad y validación lo permitan, disminuir la necesidad de varar la embarcación. Esta condición todavía debe comprobarse mediante una versión metálica funcional y ensayos controlados.

1.10.3 Método de medición de beneficios y costos

- Comparación del costo total por evento de falla entre el sistema convencional y el sistema modular, incorporando reparación o repuesto, varada/botada y servicios asociados.
- Comparación del tiempo total de indisponibilidad de la embarcación frente a una intervención convencional y una sustitución modular.
- Registro de variables de RPM, vibración, velocidad y consumo durante una futura prueba operacional, sin presentar estas variables como resultados mientras no exista ensayo a escala real.

1.10.4 Indicadores de gestión

- Reducción porcentual del costo total asociado a un evento de falla, una vez disponible el costo real de la intervención modular.
- Tiempo de sustitución de una pala, medido inicialmente en prototipo y posteriormente en una embarcación real.
- Integridad del conjunto modular y del sistema de fijación, pendiente de validación estructural y operacional.
- Variación de consumo de combustible y vibración respecto de una hélice de referencia, pendiente de ensayo comparativo.

1.11 Carta Gantt del proyecto

La planificación del Trabajo de Título considera las actividades efectivamente desarrolladas hasta la etapa de prototipo a escala y, de manera separada, las actividades de validación futura. Las pruebas en embarcación real no se consideran resultados ejecutados en la presente etapa.

Actividad	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6
Levantamiento de información y diagnóstico	X	X				
Diseño CAD del sistema modular		X	X			
Selección de materiales y proveedores		X	X			
Fabricación del prototipo PLA 1:2			X	X		
Ensamble y verificación dimensional				X	X	
Definición del plan de pruebas y variables					X	X
Ajustes finales e informe técnico						X

Tabla 1.2. Carta Gantt del desarrollo del Trabajo de Título. *Fuente: Elaboración propia, 2026.*

CAPÍTULO 2: ESTUDIO DE MERCADO

2.1 Mercado objetivo

El mercado objetivo inicial se concentra en armadores y propietarios de embarcaciones pesqueras artesanales de la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, especialmente en el rango superior a 12 y hasta 18 m de eslora. De acuerdo con el Boletín Sectorial de SERNAPESCA correspondiente al segundo trimestre de 2025, la región registraba 855 embarcaciones extractivas inscritas en el Registro Pesquero Artesanal: 97 unidades entre más de 12 y hasta 15 m y 21 unidades entre más de 15 y hasta 18 m. En consecuencia, el segmento dimensional directamente relacionado con el proyecto alcanza 118 embarcaciones registradas, equivalente aproximadamente al 13,8 % de la flota extractiva artesanal regional. Esta cifra representa un universo técnico potencial y no una estimación de ventas, ya que la adopción depende de compatibilidad del sistema propulsor, frecuencia de fallas, costo y disposición del armador.

2.2 Definición general del producto

La Hélice Mecano corresponde a una propuesta de hélice modular compuesta por un núcleo reutilizable y palas intercambiables. El prototipo desarrollado para este Trabajo de Título fue fabricado en PLA a escala 1:2 con fines geométricos y funcionales. Para una futura versión operativa se propone utilizar materiales metálicos de uso marino y procesos de fabricación que combinen manufactura aditiva, mecanizado CNC, terminación superficial, inspección y balanceo.

2.3 Comprensión del mercado

El mercado actual ofrece dos soluciones principales: hélices de nylon y hélices de bronce. Las primeras presentan bajo costo inicial, pero menor durabilidad y menor reparabilidad. Las segundas ofrecen mayor vida útil y eficiencia, pero requieren procesos de reparación costosos y largos cuando sufren daños importantes.

El mercado no satisface completamente una necesidad clave: una solución que combine durabilidad, eficiencia y mantención rápida a menor costo. La Hélice Mecano se inserta en este vacío mediante un sistema modular que permite reemplazar únicamente las palas dañadas.

2.4 Análisis de demanda

La demanda potencial se relaciona principalmente con la necesidad de disminuir tiempos de inactividad, costos de varadero, dependencia de repuestos completos y pérdida de jornadas productivas. La cavitación, corrosión e impactos se consideran mecanismos de deterioro que pueden originar la intervención, pero el beneficio principal evaluado para la Hélice Mecano corresponde a la mantenibilidad y al reemplazo individual de palas.

2.5 Antecedentes de precios, reparación y disponibilidad de hélices

2.5.1 Antecedentes de precios de hélices y reparación

En Punta Arenas se identifican principalmente dos rangos de hélices utilizadas en embarcaciones artesanales. Las alternativas de menor costo presentan valores aproximados entre \$120.000 y \$500.000 CLP y corresponden principalmente a hélices fabricadas en nylon, generalmente de tres palas. Estas alternativas cumplen con la función básica de propulsión y presentan una construcción más sencilla, siendo utilizadas principalmente debido a su menor costo de adquisición.

Por otra parte, las hélices de bronce, correspondientes a una de las alternativas de uso habitual en embarcaciones de trabajo, presentan valores que pueden situarse aproximadamente entre \$2.000.000 y \$5.000.000 CLP, dependiendo de sus dimensiones, número de palas, paso, material, mecanizado y terminaciones requeridas.

A diferencia de las alternativas de nylon, las hélices de bronce pueden fabricarse con diferentes diámetros, pasos y configuraciones de tres o cuatro palas, permitiendo adecuar sus características al sistema propulsor y a las condiciones de operación de la embarcación. Asimismo, debido a las características del material, una hélice de bronce dañada puede ser reparada, rectificada y posteriormente balanceada, extendiendo su vida útil.

De acuerdo con antecedentes de reparación local recopilados para el proyecto, los procesos de rectificación y balanceo pueden presentar valores referenciales entre \$200.000 y \$400.000 CLP. Por su parte, intervenciones mediante soldadura o reconstrucción de palas dañadas pueden ubicarse aproximadamente entre \$100.000 y \$300.000 CLP, dependiendo de la magnitud del deterioro y de las características particulares de la hélice.

2.5.2 Antecedente de cotización real de hélices

Como antecedente técnico-comercial se dispone de una cotización emitida por MegaMotors con fecha 17 de junio de 2022 para hélices destinadas a las embarcaciones Nahuel y Víctor Gabriel. Los datos informados en dicha cotización se resumen en la siguiente tabla:

Embarcación	N.º de palas	Diámetro	Paso	Giro	Precio cotizado	Plazo de entrega
Nahuel	4	35"	29"	Derecho	\$2.550.000 CLP	90 a 100 días
Víctor Gabriel	4	38"	32"	Derecho	\$2.890.000 CLP	90 a 100 días

Tabla 2.1. Antecedente histórico de cotización de hélices para las embarcaciones Nahuel y Víctor Gabriel. Fuente: MegaMotors (2022).

Los antecedentes anteriores permiten comprobar que una hélice de bronce de cuatro palas y dimensiones cercanas a 35–38 pulgadas representa una inversión de varios millones de pesos. Además, en ambos casos el proveedor indicó un plazo de fabricación y entrega de 90 a 100 días.

Este plazo no debe interpretarse necesariamente como el tiempo total de detención de la embarcación, debido a que el armador puede contar con una hélice de reemplazo o reparar temporalmente el componente existente. No obstante, constituye un antecedente relevante respecto de la disponibilidad de repuestos y de la dependencia de fabricación o suministro de una hélice nueva.

Para efectos de la evaluación de la Hélice Mecano, estos valores constituyen una base comparativa útil frente al sistema modular propuesto, cuyo objetivo es permitir el reemplazo individual de una pala dañada en lugar de sustituir el conjunto completo.



Figura 11. Ejemplos visuales de una hélice metálica de cuatro palas y una hélice polimérica de tres palas. Fuente: Elaboración propia, 2026.

2.5.3 Costo documentado de varada y botada

Como antecedente real de mercado regional, se dispone de una factura electrónica emitida en Punta Arenas el 17 de agosto de 2026 por el servicio de “varada y botada”. El documento registra un valor neto de \$2.000.000 CLP, IVA de \$380.000 CLP y un total pagado de \$2.380.000 CLP. Este valor corresponde a la maniobra indicada y puede incrementarse al incorporar estadía, trabajos mecánicos, servicios de grúa u otras operaciones complementarias.

2.6 Proyección futura

La proyección futura se orienta hacia soluciones de mayor eficiencia energética, reparabilidad, modularidad y menor impacto ambiental. La tendencia de reducción de residuos y el aumento del

costo de operación favorecen tecnologías que permitan extender la vida útil de componentes críticos.

2.7 Oferta y competidores

Competidor / alternativa	Ventaja	Desventaja frente a Hélice Mecano
Hélice de nylon	Menor costo inicial	Menor durabilidad, reparabilidad limitada y poca eficiencia de empuje
Hélice de bronce tradicional	Alta resistencia y buena eficiencia	Reparación lenta y costosa, requiere varado
Reparación convencional en astillero	Servicio conocido por armadores	Tiempo muerto y costo de izaje elevado
Importadores de hélices	Variedad de modelos	Dependencia de stock, importación y compatibilidad

Tabla 2.2. Comparación de alternativas y competidores respecto de la propuesta Hélice Mecano. Fuente: Elaboración propia, 2026.

2.8 Variables que afectan la demanda

- Costo del combustible y necesidad de mejorar eficiencia propulsiva.
- Frecuencia de golpes con redes, rocas, desechos y objetos marinos.
- Disponibilidad de varaderos o talleres navales en la zona.
- Ingreso estacional de la pesca artesanal.
- Precio de materiales como bronce, acero inoxidable y polvo metálico para impresión 3D.

2.9 Definición del usuario y cliente

- **Usuario:** pescador artesanal que utiliza la embarcación en su trabajo diario y experimenta directamente problemas de cavitación, golpes y detenciones.
- **Cliente:** dueño de la embarcación o armador que decide la compra según costo, durabilidad, ahorro esperado y facilidad de mantención.

2.10 Modelo de negocio Canvas en formato canva

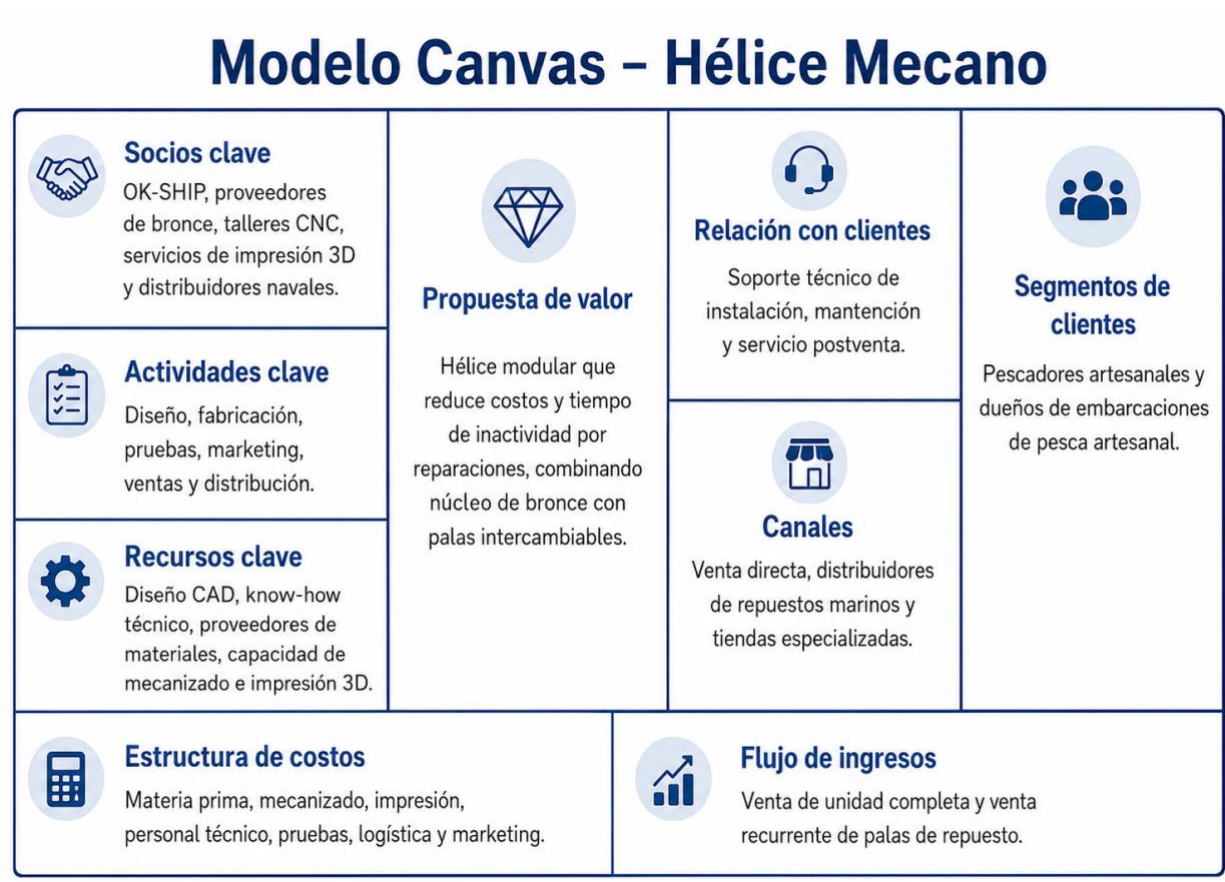


Figura 12. Modelo Canvas aplicado a la propuesta Hélice Mecano. Fuente: Elaboración propia, 2026.

2.11 Cuantificación estimada del mercado

La cuantificación del mercado se establece a partir de la flota extractiva inscrita en el Registro Pesquero Artesanal de Magallanes. SERNAPESCA informó 855 embarcaciones extractivas para el segundo trimestre de 2025. De ellas, 97 unidades correspondían a la categoría de más de 12 y hasta 15 m, y 21 unidades a la categoría de más de 15 y hasta 18 m. Por lo tanto, el segmento dimensional inicialmente abordado por el proyecto comprende 118 embarcaciones. Esta cantidad se utiliza como referencia del mercado técnico potencial. La demanda efectiva deberá determinarse mediante compatibilidad de eje y hélice, características del motor, frecuencia de daños, disposición de pago y validación comercial con armadores.

CAPÍTULO 3: ESTUDIO TÉCNICO

3.1 Objetivos técnicos del producto

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de hélice modular con palas intercambiables para embarcaciones artesanales, orientada a reducir los costos de mantenimiento y los tiempos de inactividad operacional, manteniendo como criterio de diseño la compatibilidad con el sistema propulsor y la futura validación de su desempeño.

Objetivos específicos

- Levantar y reconstruir digitalmente la geometría de una hélice convencional mediante escaneo 3D e ingeniería inversa en Autodesk Fusion 360, obteniendo una base dimensional para el desarrollo del sistema modular.
- Diseñar una arquitectura de hélice modular compuesta por un núcleo reutilizable, palas desmontables y un sistema de unión mediante corredera o encastre complementado con elementos de fijación mecánica, orientado al reemplazo individual de las palas.
- Fabricar y verificar un prototipo físico a escala 1:2 mediante impresión 3D en PLA, evaluando la geometría del conjunto, el ajuste entre componentes, el montaje y desmontaje de las palas y la accesibilidad del sistema de fijación.
- Definir una ruta tecnológica para la futura fabricación de una versión metálica funcional, evaluando materiales, manufactura aditiva WAAM y LPBF/DMLS, mecanizado CNC, acabado superficial, inspección y balanceo.
- Evaluar preliminarmente el impacto operacional y económico de la Hélice Mecano respecto de una hélice convencional, considerando tiempos de detención, costos de varada y botada, mantenimiento y valor de producción potencial no realizada.
- Establecer los requerimientos técnicos, normativos y experimentales necesarios para una futura validación del sistema en una embarcación real, incluyendo resistencia estructural, balanceo, vibraciones, RPM, consumo, procedimiento de sustitución de pala y condiciones de seguridad.

La Hélice Mecano debe cumplir con los siguientes requerimientos técnicos:

- Núcleo de bronce fijado de forma segura al eje de la hélice.
- Sistema de acople y desacople de palas individuales mediante elementos mecánicos seguros.
- Resistencia a corrosión, cavitación, impactos y bioincrustación.
- Compatibilidad con mantención en muelle y reducción de necesidad de varado.

3.3 Descripción y selección del proceso

El diseño considera un núcleo central fabricable en una aleación de bronce de uso naval, cuya especificación definitiva deberá seleccionarse a partir de resistencia, corrosión y compatibilidad galvánica. Las palas se diseñan como elementos desmontables unidos al núcleo mediante un sistema de corredera o encastre complementado por fijaciones mecánicas. La manufactura se define según el tipo de componente:

- Núcleo: mecanizado CNC para controlar concentricidad, alojamientos de las palas, superficies de contacto y perforaciones de fijación.
- Palas: manufactura aditiva metálica mediante WAAM como alternativa principal para componentes de mayor tamaño; LPBF/DMLS se mantiene como alternativa cuando la geometría sea compatible con el volumen de fabricación y se privilegie una mayor precisión inicial.
- Ensamble: sistema modular orientado al reemplazo individual de una pala. Para la evaluación preliminar se adopta un tiempo de intervención de 5 horas como hipótesis de diseño, pero este valor no corresponde a una medición en embarcación y deberá validarse experimentalmente.

La selección del proceso responde a la necesidad de fabricar geometrías complejas y mantener acabados superficiales controlados. La cavitación deberá evaluarse posteriormente mediante simulaciones y ensayos.

3.4 Selección de equipos

- Sistema de manufactura aditiva metálica WAAM para la futura fabricación de palas. El sistema LPBF/DMLS se mantiene como alternativa para componentes de menores dimensiones.

Alternativa 1: MX3D M1 (WAAM)

La **MX3D M1** es un sistema de manufactura aditiva metálica por **WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)**. Trabaja depositando alambre metálico mediante un arco eléctrico y un sistema robotizado, por lo que está pensada para fabricar piezas medianas a grandes. Según el fabricante, el sistema M1 tiene una envolvente de fabricación de **2.200 × 1.400 × 1.700 mm**, admite piezas de hasta **750 kg** y alcanza tasas de deposición de **2 a 8 kg/h**. Además, MX3D señala que sus sistemas cuentan con aprobación de Lloyd's Register, algo bien relevante para sectores industriales y marítimos. Permite fabricar una pala de gran tamaño más rápido que los sistemas de lecho de polvo y después terminarla con mecanizado CNC y pulido.

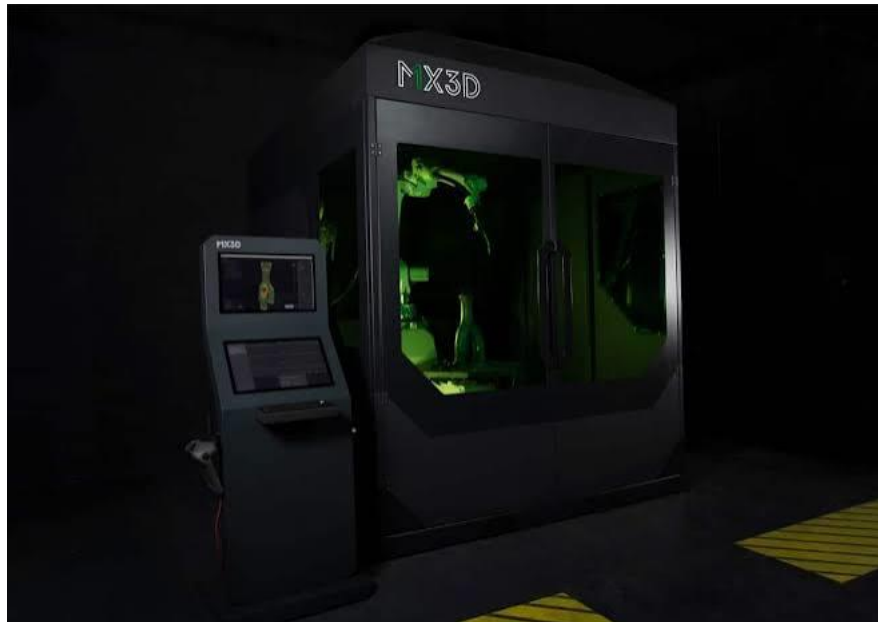


Figura 13. Sistema de manufactura aditiva metálica MX3D M1 basado en tecnología WAAM. Fuente: MX3D (2026).

Alternativa 2: EOS M 400-4 (LPBF/DMLS) alta precisión.

- La **EOS M 400-4** es una impresora metálica Fusión de Lecho de Polvo por Láser (LPBF, por sus siglas en inglés Laser Powder Bed Fusion), también asociada comercialmente al proceso DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Utiliza cuatro láseres de 400 W y posee un volumen de fabricación de **400 × 400 × 400 mm**. EOS la presenta como una plataforma de alta productividad para aplicaciones industriales, con hasta 4 veces mayor productividad respecto de configuraciones más simples, y compatible con materiales como aceros inoxidables, aceros

herramienta y superaleaciones. Ofrece mucha precisión geométrica, pero su volumen de trabajo puede limitar la fabricación de palas grandes en una sola pieza.



Figura 14. Sistema EOS M 400-4 basado en tecnología LPBF/DMLS. Fuente: EOS GmbH (2026).

- Torno y/o centro de mecanizado CNC para el núcleo y alojamientos de fijación: se utilizará para obtener la geometría final del núcleo, controlar diámetros, concentricidad y superficies de acople, además de mecanizar alojamientos de palas y perforaciones asociadas a los elementos de fijación. El uso de CNC permite mantener tolerancias repetibles antes del ensamble y balanceo final.
- Herramientas de pulido y abrasivos para acabado superficial: se emplearán después de la manufactura aditiva y del mecanizado con el objetivo de eliminar irregularidades, rebabas y marcas de proceso. Se consideran lijas de granulometría progresiva, discos abrasivos, herramientas rotativas y elementos de pulido fino, buscando alcanzar una superficie uniforme y controlada para la interacción hidrodinámica.
- Equipos de prueba en terreno: tacómetro óptico láser para registrar las revoluciones del eje; sistema de caudalímetros para determinar el consumo efectivo del motor diésel; y medidor portátil de vibraciones para evaluar el comportamiento del eje, soportes, rodamientos y transmisión antes y después de instalar la Hélice Mecano.

3.5 Determinación de insumos

- PLA para la fabricación del prototipo geométrico y funcional a escala 1:2. Este material no se considera apto para operación real en ambiente marino.

- Aleación de bronce de uso naval para el futuro núcleo funcional, cuya especificación definitiva deberá seleccionarse considerando resistencia mecánica, corrosión y compatibilidad galvánica.
- Alambre metálico certificado para WAAM, compatible con la aleación seleccionada para las palas y con el procedimiento de fabricación definido por el proveedor.
- Polvo metálico certificado cuando se utilice LPBF/DMLS como alternativa de fabricación.
- Pernos y elementos de fijación resistentes a la corrosión. Las dimensiones M10/M12 actualmente consideradas son preliminares y deberán confirmarse mediante cálculo estructural, geometría definitiva y ensayo.
- Consumibles de mecanizado, abrasivos y elementos de pulido para el acabado dimensional y superficial.
- Recubrimientos y sistemas de protección compatibles con el ambiente marino, cuya aplicación deberá definirse según la aleación final y el sistema de protección catódica de la embarcación.

3.6 Programa de trabajo y proceso productivo

1. Levantamiento geométrico de una hélice convencional mediante escaneo 3D.
2. Importación de la geometría a Autodesk Fusion 360 y reconstrucción dimensional.
3. Desarrollo del núcleo modular, raíces de pala, correderas y fijaciones.
4. Incorporación y ajuste del perfil hidrodinámico de referencia en las palas.
5. Fabricación del prototipo a escala 1:2 mediante impresión 3D en PLA.
6. Ensamble, revisión de interferencias y evaluación geométrica del sistema modular.
7. Selección de tecnología y material para una futura versión metálica funcional.
8. Fabricación metálica, mecanizado, pulido, inspección y balanceo en una etapa posterior.
9. Pruebas en tierra y ensayo controlado en embarcación.
10. Ajustes finales y validación técnica.

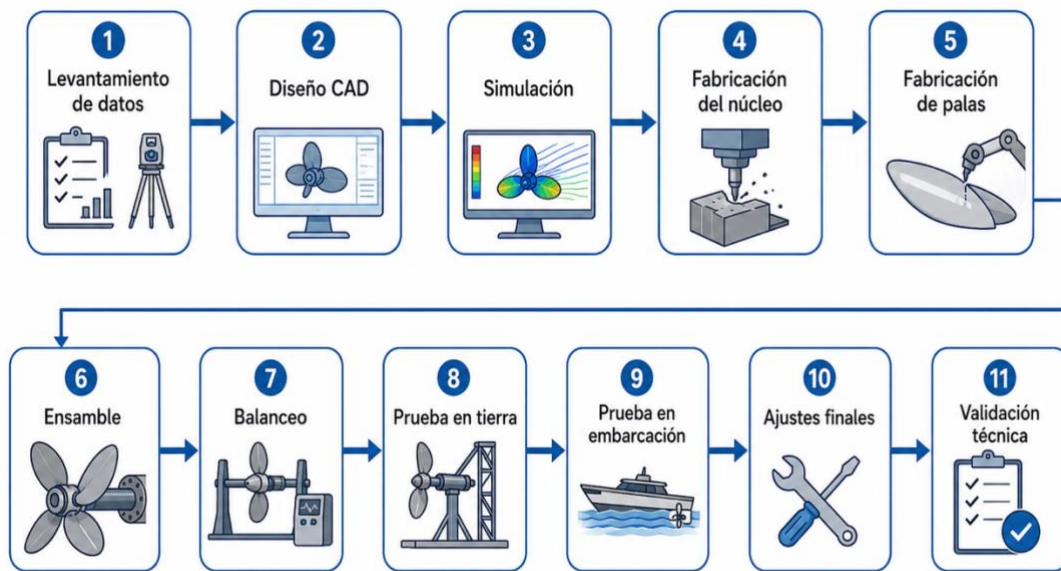


Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de desarrollo y validación propuesto para la Hélice Mecano. **Fuente:** *Elaboración propia, 2026.*

3.7 Ingeniería de detalle y fabricación del prototipo

El desarrollo de la Hélice Mecano se inició a partir del levantamiento geométrico de una hélice convencional, realizado mediante tecnología de escaneo tridimensional disponible en las instalaciones de **OK-SHIP Ingeniería Naval, en Punta Arenas**. Esta etapa permitió obtener una representación digital de la geometría original de la hélice, generando una base de referencia para el posterior proceso de ingeniería inversa y rediseño del sistema propulsor.

3.7.1 Levantamiento geométrico mediante escaneo 3D

Como primera etapa del desarrollo se realizó la digitalización de una hélice utilizada como referencia para el proyecto. Para ello se empleó un escáner 3D perteneciente a OK-SHIP, con el propósito de capturar la geometría exterior del componente y disponer de información dimensional de mayor precisión que la obtenida únicamente mediante mediciones manuales.

El proceso de escaneo permitió generar una representación tridimensional de la hélice original, conservando las principales características geométricas del núcleo y de las palas. La información obtenida sirvió como punto de partida para analizar dimensiones, proporciones y superficies relevantes del componente existente.

Posteriormente, el archivo digital generado fue llevado al programa Autodesk Fusion 360, donde se realizó el procesamiento y análisis de la geometría obtenida. A partir de este modelo se tomaron las medidas necesarias para reconstruir y parametrizar los principales elementos de la hélice, especialmente el núcleo central y las palas.

Esta metodología permitió que el diseño de la propuesta modular no se desarrollara únicamente a partir de dimensiones teóricas, sino que tuviera como referencia una geometría correspondiente a un componente físico real.



*Figura 16. Modelo tridimensional obtenido a partir del escaneo de la hélice utilizada como referencia geométrica.
Fuente: Elaboración propia a partir del levantamiento realizado en OK-SHIP, 2026.*

3.7.2 Reconstrucción y análisis dimensional en Fusion 360

Una vez importada la geometría obtenida mediante escaneo 3D, se procedió a realizar el análisis dimensional y la reconstrucción del modelo utilizando Autodesk Fusion 360.

En esta etapa se identificaron y registraron las principales dimensiones correspondientes al diámetro general de la hélice, dimensiones del núcleo, longitud y ancho de las palas, zonas de unión y proporciones geométricas requeridas para desarrollar el nuevo diseño.

A diferencia de la hélice original, constituida como un elemento integral, el concepto desarrollado en este proyecto considera una configuración modular formada por un núcleo central

independiente y palas desmontables, permitiendo que cada pala pueda ser reemplazada individualmente en caso de daño.

Por esta razón, el proceso de modelado no consistió exclusivamente en reproducir la hélice escaneada, sino en utilizarla como referencia geométrica para posteriormente desarrollar una nueva arquitectura mecánica compatible con los objetivos de mantenibilidad y modularidad establecidos para la Hélice Mecano.

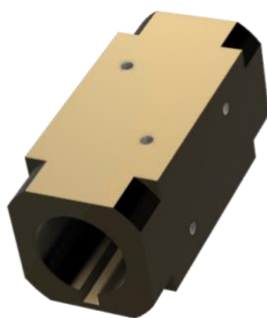


Figura 17. Modelado CAD del núcleo modular desarrollado en Autodesk Fusion 360. Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.7.3 Incorporación del perfil NACA 4412

Para controlar la geometría transversal de las palas se incorporó al proceso de diseño un perfil perteneciente a la familia NACA de cuatro dígitos, específicamente el perfil **NACA 4412**.

La designación NACA 4412 corresponde a una geometría cuya línea media presenta una curvatura máxima equivalente al 4 % de la cuerda, localizada aproximadamente al 40 % de esta desde el borde de ataque, mientras que el espesor máximo corresponde al 12 % de la longitud de cuerda.

Para incorporar esta geometría dentro de Autodesk Fusion 360 se utilizó un complemento destinado a la generación de perfiles NACA. Mediante esta herramienta Airfoil Generator for Autodesk Fusion, fue posible introducir el perfil y utilizarlo como referencia para definir las secciones transversales de la pala durante el proceso de modelado tridimensional.

En el prototipo se utilizó el perfil NACA 4412 como referencia, Sin embargo, la arquitectura paramétrica del diseño permite incorporar otros perfiles NACA o geometrías de pala diferentes

en futuras configuraciones, sin modificar el principio de funcionamiento del núcleo modular ni del sistema de anclaje.

Esta característica permite que la Hélice Mecano no quede limitada a una única geometría de pala, sino que pueda adaptarse a diferentes diámetros de hélice, potencias de motor y condiciones de operación, manteniendo como objetivo conservar las características propulsivas requeridas por cada embarcación.

Por lo tanto, el sistema modular permite combinar un núcleo y mecanismo de anclaje estandarizado con palas geométricamente adaptables, facilitando el desarrollo de diferentes configuraciones según los requerimientos técnicos de cada sistema propulsor.

A partir de estas secciones se desarrolló la geometría tridimensional de la pala, adaptando progresivamente su longitud, orientación y transición hacia la raíz para permitir su conexión con el núcleo modular.



Figura 18. Modelado CAD de la pala modular y de su zona de ensamble. Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.7.4 Diseño del núcleo y sistema de anclaje modular

Una vez definida la geometría general de la pala, se procedió al desarrollo de uno de los elementos principales del proyecto: el núcleo modular y su sistema de unión con las palas.

El núcleo fue rediseñado tomando como referencia las dimensiones obtenidas a partir de la hélice escaneada. Sin embargo, se modificó su configuración original con el objetivo de incorporar alojamientos destinados a recibir individualmente cada una de las palas.

El concepto seleccionado considera una unión mecánica de tipo corredera o encastre, donde la raíz de cada pala se introduce en un alojamiento mecanizado en el núcleo. Esta geometría permite que parte de las cargas transmitidas entre la pala y el núcleo sean soportadas directamente por las superficies de contacto del ensamble, evitando depender exclusivamente de los elementos roscados.

Una vez posicionada la pala en su alojamiento, el conjunto se asegura mediante elementos de fijación mecánica, permitiendo impedir el desplazamiento relativo y el desacople durante el funcionamiento.

De esta manera, la propuesta busca generar un sistema desmontable que permita retirar únicamente una pala dañada y sustituirla por otra sin necesidad de reemplazar completamente la hélice.

La geometría del núcleo, los alojamientos, las raíces de las palas y los puntos de fijación fueron desarrollados íntegramente en Fusion 360, donde también se verificaron interferencias y condiciones de montaje antes de proceder con la fabricación física del modelo.



Figura 19. Ensamble frontal CAD del conjunto modular. Fuente: Elaboración propia, 2026.



Figura 20. Montaje CAD del conjunto modular sobre el eje de referencia. Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.7.5 Fabricación del prototipo a escala 1:2

Finalizada la etapa de modelado tridimensional, se fabricó un prototipo físico a escala 1:2 respecto de la geometría definida para el proyecto. La reducción de escala permitió materializar el conjunto utilizando los medios disponibles para el Trabajo de Título y disminuir el consumo de material y el tiempo de impresión.

El prototipo fue producido mediante impresión 3D en PLA, fabricándose de manera independiente el núcleo y las palas. Su finalidad es validar la materialización geométrica del concepto modular, el ajuste de las piezas, el funcionamiento de la corredera, la accesibilidad de las fijaciones y el procedimiento de armado y desarmado.



Figura 21. Vistas del prototipo físico a escala 1:2, mostrando palas, núcleo y sistema de acople. Fuente: Elaboración propia, 2026.

El prototipo no reproduce las cargas estructurales ni las condiciones hidrodinámicas de una hélice a escala real. En consecuencia, debe considerarse un prototipo geométrico y funcional de demostración. Los pernos definitivos todavía deben ser instalados y ensayados antes de considerar validado el sistema de fijación.



Figura 22. Vista explosionada reales del conjunto modular, mostrando palas, núcleo y elementos geométricos de acople. Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.7.6 Resultado de la etapa de prototipado

El proceso desarrollado permitió transformar una hélice física convencional en un modelo digital de referencia y, posteriormente, utilizar dicha información para desarrollar una solución modular propia.

Con la fabricación del prototipo se logró materializar la arquitectura propuesta para la Hélice Mecano y disponer de un modelo físico que permite explicar y demostrar el principio de funcionamiento del sistema. Esta etapa constituye la base para posteriores desarrollos orientados al dimensionamiento estructural, selección definitiva de materiales, fabricación a escala real, balanceo, simulaciones hidrodinámicas y validación experimental.

3.7.7 Propuesta de fabricación de palas mediante manufactura aditiva metálica

La fabricación realizada durante el presente Trabajo de Título corresponde a un prototipo geométrico y funcional elaborado mediante impresión 3D en PLA a escala 1:2. Su propósito fue comprobar físicamente la geometría general del conjunto, el sistema de corredera, los alojamientos de las palas y el principio de montaje y desmontaje.

Debido a que el PLA no posee las propiedades mecánicas ni la resistencia requerida para operar como material definitivo en una hélice marina, una futura etapa funcional deberá considerar la fabricación de las palas en material metálico.

Para esta etapa se propone evaluar tecnologías de manufactura aditiva metálica, principalmente Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) y Laser Powder Bed Fusion (LPBF/DMLS). La selección de estos procesos se relaciona con la posibilidad de fabricar geometrías complejas directamente desde los modelos CAD desarrollados en Autodesk Fusion 360, incluyendo la variación de sección de la pala, su torsión, perfil hidrodinámico y raíz destinada al sistema de anclaje modular.

La manufactura aditiva no se plantea como un proceso aislado, sino como parte de una estrategia híbrida de fabricación. Luego de obtener la preforma metálica, la pala deberá someterse a operaciones posteriores de mecanizado CNC, tratamiento térmico cuando corresponda, inspección dimensional, acabado superficial, pulido y balanceo.

Por lo tanto, la manufactura aditiva metálica constituye una alternativa para avanzar desde el prototipo PLA desarrollado en este trabajo hacia una segunda generación funcional del sistema, cuya selección tecnológica se analiza comparativamente en el apartado siguiente.

3.7.8 Selección de tecnología de manufactura aditiva metálica

Para la fabricación futura de las palas se analizaron dos tecnologías principales: WAAM y LPBF/DMLS. Ambas permiten producir componentes metálicos a partir de modelos digitales, pero presentan diferencias importantes en cuanto a volumen de fabricación, tasa de deposición, precisión inicial, rugosidad superficial y necesidad de postprocesado.

3.7.8.1 Alternativa mediante WAAM

La tecnología **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)** utiliza alambre metálico como material de aporte, el cual es fundido mediante un arco eléctrico y depositado sucesivamente siguiendo trayectorias definidas a partir del modelo CAD.

Su principal ventaja para la Hélice Mecano corresponde a la capacidad de fabricar componentes metálicos de mayores dimensiones y con altas tasas de deposición. Esto resulta especialmente relevante para palas destinadas a hélices de embarcaciones pesqueras, cuyas dimensiones pueden superar el volumen disponible en impresoras metálicas de cámara cerrada.

Como referencia industrial se considera el sistema MX3D M1, cuya envolvente de fabricación permite producir piezas de gran tamaño y trabajar con una estrategia cercana a la forma final. En este enfoque, la pala se fabrica inicialmente con sobrematerial y posteriormente se mecaniza mediante CNC hasta alcanzar la geometría y terminación superficial requeridas.

La aplicación de WAAM en componentes navales presenta además antecedentes como el proyecto WAAMPeller, en el cual se fabricó una hélice naval mediante manufactura aditiva por arco. Este antecedente demuestra la factibilidad de integrar WAAM con procesos posteriores de mecanizado, inspección, pulido y balanceo para aplicaciones marítimas.

3.7.8.2 Alternativa mediante LPBF/DMLS

La tecnología Laser Powder Bed Fusion (**LPBF/DMLS**) utiliza polvo metálico distribuido en capas sucesivas, las cuales son fundidas selectivamente mediante láser hasta completar la geometría del componente.

Su principal ventaja corresponde a la elevada precisión geométrica y a la capacidad de reproducir detalles complejos directamente desde el proceso de fabricación. Esto puede resultar favorable para palas de menores dimensiones o componentes donde se requiera un mayor nivel de detalle inicial.

Como referencia se considera la EOS M 400-4, cuyo volumen de fabricación es aproximadamente de $400 \times 400 \times 400$ mm. Esta característica representa también una de sus principales limitaciones para el presente proyecto, debido a que una pala de gran tamaño podría superar las dimensiones disponibles en la cámara de fabricación.

Por esta razón, LPBF/DMLS se considera una alternativa técnicamente válida, especialmente para componentes de menor tamaño o aplicaciones donde la precisión inicial sea prioritaria, pero no constituye la primera opción para palas de grandes dimensiones.

3.7.8.3 Comparación de tecnologías

Característica	WAAM	LPBF/DMLS
Materia prima	Alambre metálico	Polvo metálico
Tamaño de fabricación	Alto	Limitado por cámara
Tasa de deposición	Alta	Menor para piezas grandes
Precisión inicial	Media	Alta
Rugosidad superficial	Mayor	Menor
Necesidad de mecanizado	Alta	Media
Aplicación en piezas grandes	Alta	Limitada
Fabricación individual de palas	Alta	Alta
Compatibilidad con producción modular	Alta	Alta
Aplicación naval demostrada	Sí	Sí
Selección para el proyecto	Principal	Alternativa

Tabla 3.1. Comparación preliminar entre tecnologías WAAM y LPBF/DMLS. Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.7.8.4 Selección y justificación

A partir de la comparación realizada, se propone utilizar **WAAM como alternativa principal para una futura fabricación de las palas metálicas de la Hélice Mecano.**

La selección se fundamenta principalmente en:

- mayor capacidad para fabricar componentes de gran tamaño;

- mayor tasa de deposición para piezas voluminosas;
- compatibilidad con estrategias de fabricación híbrida;
- posibilidad de dejar sobrematerial para mecanizado CNC;
- capacidad de producir individualmente una pala de reemplazo;
- existencia de antecedentes de aplicación en componentes navales.

La tecnología **LPBF/DMLS** se mantiene como alternativa cuando las dimensiones del componente sean compatibles con el volumen de fabricación disponible o cuando se requiera una mayor precisión geométrica directamente desde el proceso aditivo.

En ambos casos, la fabricación deberá complementarse con mecanizado, control dimensional, inspección, acabado superficial y balanceo antes de una eventual instalación en una embarcación.

La selección de WAAM debe considerarse **preliminar**, debido a que la decisión definitiva dependerá del material seleccionado, dimensiones finales de la pala, disponibilidad de proveedores, costos de fabricación y resultados de los futuros análisis estructurales y ensayos.

3.7.8.5 Estimación preliminar del tiempo de fabricación

Para evaluar preliminarmente el tiempo de fabricación mediante WAAM puede utilizarse la relación entre la masa de material depositado y la tasa de deposición del sistema.

$$t = m / R$$

Donde:

- (t): tiempo teórico de deposición [h].
- (m): masa de material a depositar [kg].
- (R): tasa de deposición [kg/h].

Considerando, a modo de ejemplo, una pala terminada de aproximadamente 6 kg y un sobrematerial de fabricación equivalente al 25 %, la masa total depositada sería:

$$m = 6 \times 1,25$$

$$m = 7,5 \text{ kg}$$

Si se adopta una tasa de deposición conservadora entre 2 y 5 kg/h:

$$t_{\text{mín.}} = 7,5 / 5 = 1,5 \text{ h}$$

$$t_{\text{máx.}} = 7,5 / 2 = 3,75 \text{ h}$$

Por lo tanto, el tiempo efectivo de deposición podría encontrarse preliminarmente entre:

1,5 a 3,75 horas por pala

Para un conjunto de tres palas, esto representaría aproximadamente entre:

4,5 a 11,25 horas

Estos valores corresponden exclusivamente al tiempo de deposición y no representan el tiempo total necesario para disponer de una pala terminada.

Posteriormente se deberán considerar etapas adicionales como preparación del archivo, enfriamiento, tratamiento térmico, mecanizado CNC, pulido, inspección dimensional y balanceo.

De manera preliminar, se estima que un conjunto de tres palas podría requerir aproximadamente entre dos y cuatro jornadas efectivas de trabajo considerando fabricación y postprocesado, siempre que las instalaciones y proveedores correspondientes se encuentren disponibles.

Los valores anteriores deberán ser posteriormente reemplazados por resultados obtenidos mediante cotización y simulación del proceso de fabricación utilizando la geometría definitiva del proyecto.

3.7.8.6 Justificación de la tecnología seleccionada

La selección de WAAM para la futura fabricación de las palas de la Hélice Mecano se fundamenta principalmente en cuatro aspectos.

En primer lugar, permite fabricar componentes metálicos de mayores dimensiones sin depender de una cámara de impresión limitada.

En segundo lugar, presenta elevadas tasas de deposición, lo que disminuye el tiempo necesario para generar piezas de gran volumen.

En tercer lugar, permite trabajar mediante una estrategia híbrida, combinando manufactura aditiva con mecanizado CNC. De esta forma, la impresión genera una geometría cercana a la forma definitiva, mientras que el mecanizado permite alcanzar las tolerancias, dimensiones y terminaciones superficiales requeridas por el perfil hidrodinámico.

Finalmente, la tecnología resulta especialmente coherente con el concepto modular de la Hélice Mecano, debido a que cada pala constituye un componente independiente.

Esto permite mantener almacenados digitalmente los archivos CAD de las diferentes configuraciones de pala y fabricar únicamente el componente requerido en caso de daño.

De esta manera, no sería necesario fabricar nuevamente una hélice completa frente al deterioro de una sola pala.

El procedimiento propuesto sería:

Detección de daño → identificación de pala requerida → selección del archivo CAD → fabricación mediante WAAM → mecanizado CNC → pulido → inspección → balanceo → instalación en el núcleo existente.

Por lo tanto, la manufactura aditiva no solamente constituye una alternativa de fabricación, sino que complementa directamente el objetivo principal del proyecto, basado en disminuir los tiempos de mantenimiento y permitir el reemplazo individual de componentes.

La selección de WAAM debe considerarse preliminar y deberá ser validada en una etapa posterior mediante ensayos de materiales, análisis estructural, inspecciones de calidad, evaluación de resistencia a fatiga y corrosión, y pruebas operacionales antes de implementar el sistema en condiciones reales de navegación.

3.7.9 Aprovechamiento de material y propiedades de la manufactura aditiva metálica

La manufactura aditiva metálica permite generar una geometría cercana a la forma final utilizando material solamente en las zonas requeridas por la pieza. En WAAM, la pala se construye mediante deposición de alambre y se deja sobrematerial para mecanizado posterior; esta estrategia puede disminuir la cantidad de material removido respecto de fabricar completamente la pala desde un bloque macizo. En LPBF/DMLS, el polvo no fundido puede recuperarse y reutilizarse cuando su condición y el procedimiento del fabricante lo permiten.

El beneficio anterior debe expresarse como mayor aprovechamiento de materia prima y no como un aumento intrínseco de la densidad del metal. La densidad depende principalmente de la aleación; el proceso influye en la porosidad, defectos y microestructura. Por esta razón, una futura

pala funcional deberá someterse a controles destinados a verificar su integridad interna y calidad de fabricación.

Asimismo, debido a la construcción capa a capa, las propiedades mecánicas pueden presentar anisotropía asociada a la orientación de fabricación, trayectoria de deposición y ciclos térmicos. La orientación, tratamientos térmicos y estrategia de postprocesado deberán definirse considerando las cargas cíclicas y la resistencia a fatiga requeridas por la pala.

La arquitectura modular agrega una ventaja adicional: cada pala puede conservarse como un repuesto digital asociado a su archivo CAD y fabricarse individualmente cuando sea necesario, evitando producir nuevamente el conjunto completo.

3.7.10 Acabado superficial y consideraciones asociadas a cavitación

La fabricación mediante tecnologías de manufactura aditiva no debe considerarse por sí misma como un procedimiento capaz de eliminar el fenómeno de cavitación. La cavitación corresponde principalmente a un fenómeno hidrodinámico producido cuando determinadas regiones del flujo alrededor de la pala alcanzan presiones suficientemente bajas para provocar la formación de vapor.

Por esta razón, su aparición depende de variables tales como la geometría de la hélice, distribución de presión sobre las palas, velocidad de rotación, velocidad de avance de la embarcación, carga aplicada y características del flujo incidente.

Sin embargo, la manufactura aditiva presenta una ventaja importante al permitir reproducir geometrías complejas y optimizadas con un elevado nivel de control, posibilitando desarrollar perfiles y distribuciones geométricas destinadas a mejorar el comportamiento hidrodinámico.

Debe considerarse además que las superficies obtenidas directamente mediante algunos procesos de impresión metálica pueden presentar rugosidad y pequeñas irregularidades producto de la construcción capa a capa. Estas condiciones hacen necesario incorporar un proceso posterior de mecanizado y pulido.

En una pala de hélice, el acabado superficial resulta particularmente relevante debido a su interacción directa con el flujo de agua. Por esta razón, se propone que las palas metálicas sean impresas inicialmente con un pequeño sobrematerial destinado al postprocesado, permitiendo

posteriormente mecanizar y pulir las superficies hasta alcanzar la geometría definitiva definida en el modelo CAD.

De este modo, el beneficio esperado de la manufactura aditiva no corresponde a eliminar directamente la cavitación, sino a aumentar la libertad de diseño y la capacidad de reproducir una geometría hidrodinámica controlada, un adecuado acabado superficial y posterior validación experimental, puede ser optimizada para reducir la susceptibilidad a fenómenos de cavitación.

3.7.11 Proceso propuesto de fabricación de una pala metálica

El procedimiento propuesto para una futura fabricación puede resumirse mediante las siguientes etapas:

Modelo CAD definitivo → simulación estructural e hidrodinámica → selección de material → preparación del archivo para manufactura aditiva → definición de orientación y soportes → fabricación metálica mediante LPBF o WAAM → tratamiento térmico → eliminación de soportes → mecanizado CNC de zonas críticas → rectificado y pulido de superficies hidrodinámicas → control dimensional → inspección de defectos → balanceo → montaje sobre el núcleo → ensayo en banco → ensayo en embarcación.

Esta metodología permitiría avanzar desde el prototipo fabricado en PLA durante el presente Trabajo de Título hacia una segunda generación funcional de la Hélice Mecano, fabricada en materiales metálicos y destinada posteriormente a ensayos estructurales e hidrodinámicos en condiciones reales de operación.

3.8 Control de calidad y pruebas en terreno

Los controles siguientes corresponden al plan de validación de una futura versión metálica funcional. No deben interpretarse como ensayos ya ejecutados sobre el prototipo PLA a escala 1:2.

- Verificación dimensional de alojamientos y acoples.
- Control de balance estático y dinámico del conjunto.
- Revisión de torque de pernos y fijación mecánica.
- Medición de vibración, RPM, velocidad de avance y consumo de combustible.
- Inspección de desgaste por cavitación y corrosión después de ciclos de prueba.

3.9 Capital de trabajo

El capital de trabajo de una futura etapa funcional deberá considerar materia prima, fabricación tercerizada, mecanizado CNC, tratamientos y terminaciones, elementos de fijación, inspección, balanceo, seguridad, buceo y logística para las pruebas.

3.10 Puesta en marcha

La puesta en marcha corresponde a una etapa futura. Se propone iniciar con pruebas controladas en tierra y posteriormente efectuar un ensayo en una embarcación de Magallanes, registrando RPM, vibración, velocidad, consumo y comportamiento del sistema. También deberá cronometrarse el procedimiento real de sustitución de una pala.

3.11 Inversión inicial y costos de imprevistos

La inversión requerida para avanzar desde el prototipo PLA hacia una unidad metálica funcional deberá determinarse mediante cotizaciones de fabricación, mecanizado, inspección, balanceo, fijaciones, servicios de buceo y pruebas. No se fija un porcentaje de imprevistos definitivo hasta disponer de dicha base de costos. La estrategia propuesta privilegia la tercerización en la fase inicial para evitar una inversión prematura en maquinaria de alto valor.

CAPÍTULO 4: ASPECTOS ADMINISTRATIVOS Y LEGALES

4.1 Estructura organizacional

Para el desarrollo y validación del prototipo se requiere un equipo técnico multidisciplinario:

- Jefe de proyecto / coordinador técnico.
- Diseñador mecánico CAD.
- Técnico metalmecánico.
- Operador CNC.
- Operador o proveedor de impresión 3D metálica.
- Responsable de pruebas en terreno y registro de datos.



Figura 23. Organigrama propuesto para la etapa de desarrollo y validación de la Hélice Mecano.

Fuente: Elaboración propia, 2026.

4.2 Cargos, perfiles y remuneraciones

Para la etapa de validación se requiere un equipo multidisciplinario. No todos los cargos deben incorporarse como personal permanente: fabricación metálica, mecanizado, tratamientos,

inspección y balanceo pueden contratarse como servicios externos mientras el volumen de producción no justifique su internalización.

Cargo	Perfil requerido	Remuneración referencial
Jefe de proyecto	Ingeniería mecánica/naval o fabricación industrial; coordinación de prototipos.	\$1.500.000 CLP/mes
Diseñador mecánico	Dominio CAD, modelado 3D, planos y tolerancias.	\$1.100.000 CLP/mes
Técnico metalmecánico	Montaje, ajuste, medición y terminaciones.	\$900.000 CLP/mes
Operador CNC	Mecanizado de precisión y control dimensional.	\$1.100.000 CLP/mes
Responsable pruebas	Medición de RPM, vibración, consumo y seguridad operacional.	\$1.000.000 CLP/mes

Tabla 4.1. Cargos, perfiles y remuneraciones referenciales para la etapa de desarrollo y validación. Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes referenciales del mercado laboral chileno, 2026.

4.3 Responsabilidades administrativas

- Control de compras de materiales y contratación de servicios externos.
- Registro de costos por prototipo, prueba y reparación.
- Gestión de seguridad del equipo en taller y muelle.
- Coordinación con armador o embarcación piloto.
- Documentación de resultados para respaldo técnico.

4.4 Permisos y autorizaciones requeridas

La futura instalación y prueba de una versión funcional de la Hélice Mecano deberá ejecutarse de acuerdo con las disposiciones de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR). El Decreto Ley N.º 2.222, Ley de Navegación, establece que DIRECTEMAR es la Autoridad Marítima encargada de aplicar y fiscalizar la normativa relacionada con la navegación y seguridad marítima; a nivel local, estas funciones son ejercidas por las Gobernaciones Marítimas y Capitanías de Puerto dentro de sus respectivas jurisdicciones.

Para el presente proyecto deberán considerarse separadamente las autorizaciones relacionadas con la modificación del sistema propulsor, las pruebas de funcionamiento y la ejecución de trabajos de buceo profesional.

4.4.1 Aprobación de la modificación del sistema propulsor

En caso de instalar la Hélice Mecano sobre una embarcación existente, deberá determinarse si la modificación altera antecedentes técnicos previamente aprobados correspondientes al sistema propulsor de la nave. Para las naves menores con cubierta resulta aplicable la Circular Marítima D.G.T.M. y M.M. O-72/023, que establece el procedimiento para la presentación y aprobación de proyectos de construcción, modificación y regularización.

Esta circular define como Proyecto de Modificación aquel mediante el cual se presentan antecedentes para el sancionamiento técnico de la Autoridad Marítima cuando una nave existente es modificada respecto de sus planos o manuales previamente aprobados. Asimismo, establece que antes o durante la etapa inicial de la modificación, el armador, interesado o profesional competente deberá presentar mediante la plataforma digital de DIRECTEMAR los planos y antecedentes técnicos correspondientes.

Para el segmento analizado en este proyecto, correspondiente a embarcaciones de **12 a 18 m de eslora**, la Circular O-72/023 contempla expresamente requerimientos para proyectos de modificación. Los antecedentes exigibles dependerán del alcance específico de la modificación, pero incluyen especificaciones técnicas y los planos que correspondan. Dentro de las especificaciones técnicas se deben informar, entre otros antecedentes, las **características del sistema de propulsión y gobierno**.

Por consiguiente, antes de efectuar una prueba operacional de la Hélice Mecano en una embarcación real, el proyecto deberá ser presentado a DIRECTEMAR cuando su instalación implique una modificación de los antecedentes aprobados del sistema propulsor. La tramitación deberá efectuarse mediante la plataforma de proyectos de naves menores y quedar sometida a revisión técnica de la autoridad correspondiente.

Complementariamente, deberá considerarse la Circular O-71/010, que establece las normas sobre construcción, equipamiento, inspecciones y demás exigencias de seguridad aplicables a naves y artefactos navales menores.

4.4.2 Inspecciones y autorización para pruebas

La Circular O-72/023 establece inspecciones durante los procesos de construcción o modificación de una nave menor. Dentro de la inspección final se contempla específicamente la revisión

del asentamiento del cono de la hélice, instalación de las máquinas y líneas de ejes, junto con otros sistemas de la embarcación.

Una vez cumplidas las etapas anteriores, deberán efectuarse las correspondientes Pruebas de Puerto y Pruebas de Mar. Las pruebas de puerto consideran la verificación del funcionamiento de los sistemas de propulsión, gobierno y otros equipos, mientras que las pruebas de mar evalúan el funcionamiento y operación de dichos sistemas en navegación. La propia Circular O-72/023 establece que estas pruebas forman parte del reconocimiento requerido para la emisión del correspondiente **Certificado de Navegabilidad de la embarcación menor**.

Para el caso de la Hélice Mecano, una futura validación operacional deberá, por tanto, ser coordinada con la Autoridad Marítima correspondiente, definiendo previamente el programa de prueba, condiciones de seguridad, embarcación utilizada y antecedentes técnicos del sistema instalado.

Las inspecciones de puerto son efectuadas por personal de Máquinas y Construcción Naval de la Comisión Local de Inspección de Naves (CLIN) correspondiente a la jurisdicción, mientras que las pruebas de mar de una nave menor son realizadas por el Inspector de Naves Menores de la **SUBCLIN** correspondiente.

4.4.3 Autorización para sustitución de una pala mediante buceo profesional

Una de las características propuestas para la Hélice Mecano corresponde a la posibilidad futura de sustituir una pala con la embarcación a flote. Debido a que esta operación implicaría efectuar un trabajo bajo la línea de flotación, deberá tratarse como una faena de buceo profesional.

El Reglamento de Buceo para Buzos Profesionales, D.S. (M) N.º 752 de 1982, publicación TM-035 de DIRECTEMAR, establece que sus disposiciones son aplicables a las actividades submarinas profesionales efectuadas en aguas de jurisdicción nacional. Su artículo 602 dispone expresamente que, para ejecutar trabajos submarinos, el interesado debe solicitar el permiso correspondiente a la Autoridad Marítima Local.

Para conceder dicha autorización, la Autoridad Marítima debe verificar que las matrículas de los buzos y los certificados de inspección y vigencia de los equipos de buceo se encuentren vigentes. Además, todo trabajo de buceo debe contar con un Supervisor de Buceo, quien queda identificado en la autorización y es responsable de la faena.

La tramitación se complementa mediante la Circular A-42/002 de DIRECTEMAR, que establece las normas y formularios para actividades de buceo profesional. Para trabajos generales de buceo profesional, la solicitud se presenta a la Autoridad Marítima Local y debe identificar, entre otros antecedentes, el lugar de trabajo, profundidad, descripción de la faena, contratista y Supervisor de Buceo.

Por lo tanto, una futura operación de sustitución submarina de una pala de la Hélice Mecano deberá considerar como mínimo:

- autorización de la Autoridad Marítima Local.
- contratista de buceo habilitado cuando corresponda.
- buzos con matrícula profesional vigente.
- Supervisor de Buceo registrado en la autorización.
- equipos de buceo con certificados de inspección y vigencia.
- descripción previa del trabajo submarino a realizar.
- definición del lugar, fecha, horario y condiciones de la faena.
- procedimiento de seguridad para impedir la activación o rotación accidental del sistema propulsor durante la intervención.

Los primeros requisitos se encuentran establecidos directamente por la normativa de buceo. El bloqueo e inmovilización del sistema propulsor deberá formar parte del procedimiento técnico de seguridad desarrollado específicamente para la Hélice Mecano y ser coordinado con el contratista y la Autoridad Marítima antes de ejecutar la prueba.

4.4.4 Diferencia entre mantenimiento programado y buceo de emergencia

DIRECTEMAR dispone además de la **Circular A-42/005**, que regula la posibilidad de autorizar a determinadas personas de la dotación de una nave pesquera para efectuar inmersiones cuando se declara una situación de emergencia, por ejemplo ante el acorbatamiento de una hélice o una pérdida de propulsión.

Sin embargo, esta disposición no debe utilizarse como fundamento para el procedimiento normal de reemplazo de palas de la Hélice Mecano, debido a que está orientada específicamente a situaciones de emergencia.

En condiciones normales de mantenimiento, inspección o validación del proyecto, el cambio submarino de una pala deberá planificarse como **trabajo de buceo profesional previamente autorizado**, de conformidad con el D.S. (M) N.º 752 y la Circular A-42/002.

Para pruebas reales en embarcación se recomienda validar previamente permisos o autorizaciones con el armador, administrador del muelle, astillero o autoridad marítima correspondiente, especialmente si se realizan pruebas en agua con modificaciones en el sistema propulsor.

4.5 Normativa técnica y legal aplicable

- Requisitos y autorizaciones de la Autoridad Marítima/DIRECTEMAR que resulten aplicables a modificaciones, pruebas y operación del sistema propulsor de la embarcación seleccionada.
- Procedimientos de seguridad para trabajos en taller, izaje, mecanizado, montaje y operaciones de buceo o intervención bajo la línea de flotación.
- Gestión de residuos metálicos, consumibles, abrasivos, polímeros y recubrimientos conforme a la normativa ambiental y de seguridad vigente.
- Evaluación de compatibilidad galvánica entre núcleo, palas, fijaciones y sistema de protección catódica de la embarcación.
- Como referencia técnica para una futura fabricación aditiva metálica pueden considerarse estándares y guías de clasificación aplicables, como DNV-ST-B203, sin asumir que su sola mención constituye una certificación del producto.

4.6 Responsabilidades legales y riesgos

El proyecto debe dejar establecido que se trata de un prototipo en fase de validación. Cualquier instalación en embarcación debe realizarse con consentimiento del propietario y bajo condiciones controladas, evitando comprometer la seguridad de navegación hasta contar con pruebas suficientes de balance, resistencia y fijación.

4.7 Estrategia de implementación y financiamiento del proyecto

La implementación industrial de la Hélice Mecano requiere considerar que determinadas tecnologías propuestas para su fabricación, particularmente los sistemas de manufactura aditiva metálica, representan inversiones de capital elevadas. La adquisición inmediata de equipamiento especializado para impresión metálica, mecanizado CNC, tratamientos térmicos, inspección y balanceo no resulta económicamente conveniente durante una etapa inicial de desarrollo, principalmente debido a que el proyecto aún se encuentra en fase de prototipado y validación.

Por esta razón, se propone una estrategia de implementación progresiva, donde las primeras unidades funcionales sean fabricadas mediante la contratación de servicios especializados externos, reduciendo significativamente la inversión inicial y permitiendo concentrar los recursos disponibles en la validación técnica del producto.

4.7.1 Estrategia inicial mediante fabricación tercerizada

Durante la primera etapa de implementación no se considera necesaria la adquisición de una planta completa de manufactura aditiva metálica. En su lugar, se propone que OK-SHIP Ingeniería Naval actúe como entidad coordinadora del desarrollo técnico, manteniendo internamente aquellas actividades relacionadas con levantamiento de información, escaneo tridimensional, ingeniería inversa, diseño CAD, modificaciones del producto, coordinación de fabricación, montaje y evaluación del prototipo.

Las operaciones que requieran maquinaria de elevado valor podrían ser contratadas a empresas, universidades o centros tecnológicos especializados.

De esta manera, el proceso productivo inicial se estructuraría de la siguiente forma:

OK-SHIP Ingeniería Naval

- Levantamiento mediante escaneo 3D.
- Ingeniería inversa.
- Modelamiento en Autodesk Fusion 360.
- Diseño del núcleo y palas.
- Generación de planos.
- Preparación de archivos para fabricación.
- Coordinación de proveedores.

- Ensamble del conjunto.
- Pruebas y seguimiento del prototipo.

Proveedor de manufactura aditiva

- Fabricación metálica de las palas mediante LPBF, WAAM u otra tecnología técnicamente compatible.
- Eliminación de soportes y preparación inicial de la pieza.

Maestranza especializada

- Fabricación y mecanizado del núcleo.
- Mecanizado final de las palas.
- Elaboración de alojamientos y correderas.
- Perforaciones y terminaciones dimensionales.

Proveedor de servicios especializados

- Tratamientos térmicos.
- Inspección dimensional y no destructiva.
- Pulido de superficies.
- Balanceo del conjunto.

La utilización de terceros permite transformar una elevada inversión inicial en maquinaria en un costo variable asociado a cada prototipo o unidad fabricada.

Este modelo resulta especialmente adecuado durante las primeras etapas del proyecto debido a que permite fabricar una primera hélice funcional, realizar pruebas, corregir el diseño y determinar la existencia de demanda efectiva antes de efectuar inversiones industriales de mayor magnitud.

4.7.2 Participación de armadores como socios de validación

Una segunda alternativa para financiar el desarrollo corresponde a establecer acuerdos de colaboración con armadores de embarcaciones pesqueras artesanales de la Región de Magallanes.

Los armadores representan potenciales usuarios finales de la Hélice Mecano y, por consiguiente, pueden participar no solamente como compradores futuros, sino también como colaboradores durante la etapa de validación.

Se propone establecer un modelo de desarrollo conjunto, donde uno o más armadores puedan aportar recursos económicos, acceso a embarcaciones, información operacional o infraestructura para realizar pruebas.

Los aportes pueden adoptar diferentes modalidades:

- Aporte económico directo para la fabricación del prototipo.
- Facilitación de una embarcación para realizar las pruebas.
- Financiamiento parcial de una pala o conjunto de palas.
- Aporte de información relacionada con daños y mantenimiento de hélices.
- Apoyo logístico durante instalación y pruebas.
- Participación en ensayos de navegación.

Como contraparte, el armador participante podría recibir beneficios tales como acceso preferente a las primeras unidades, participación en las pruebas de desarrollo, condiciones comerciales preferenciales o utilización experimental del sistema una vez cumplidos los requisitos de seguridad correspondientes.

Este mecanismo disminuye el riesgo económico del desarrollador y, simultáneamente, permite validar la solución directamente con sus potenciales usuarios.

4.7.3 Participación de empresas locales

Además de los armadores, el proyecto puede incorporar empresas vinculadas con la industria marítima de Punta Arenas y la Región de Magallanes.

Entre los potenciales participantes se consideran maestranzas, astilleros, talleres navales, empresas pesqueras, proveedores marítimos, empresas de buceo comercial y servicios de mantenimiento de embarcaciones.

Estas empresas podrían contribuir mediante aportes monetarios o aportes valorizados.

Un aporte valorizado corresponde a un servicio, equipo, personal o infraestructura proporcionado al proyecto sin necesidad de realizar un desembolso equivalente en dinero.

Por ejemplo, una maestranza podría aportar horas de mecanizado CNC; una empresa de buceo podría colaborar en las pruebas de sustitución submarina de las palas; un armador podría disponer

una embarcación para validación y OK-SHIP podría aportar horas de ingeniería y utilización de su equipamiento de escaneo.

De esta forma, el costo total del desarrollo puede distribuirse entre diferentes actores, disminuyendo la cantidad de recursos económicos que debe aportar una sola entidad.

4.7.4 Financiamiento mediante instrumentos públicos

El desarrollo de una futura versión metálica funcional de la Hélice Mecano podría complementarse mediante instrumentos públicos de apoyo a la innovación, desarrollo productivo y fortalecimiento de empresas. Sin embargo, estos mecanismos corresponden a **fondos concursables sujetos a bases, requisitos de admisibilidad, evaluación y disponibilidad presupuestaria**, por lo que no deben considerarse como financiamiento asegurado del proyecto.

Para el presente Trabajo de Título se analizaron convocatorias recientes que presentan relación potencial con distintas etapas de desarrollo de la propuesta. El estado de cada instrumento se indica expresamente con el objetivo de diferenciar las convocatorias vigentes de aquellas utilizadas únicamente como antecedentes.

4.7.4.1 CORFO – Crea y Valida 2026

El instrumento Crea y Valida, administrado por CORFO, tiene como objetivo apoyar el desarrollo de productos, servicios o procesos innovadores que requieran actividades de investigación y desarrollo, desde una etapa de prototipo hasta su validación técnica a escala productiva o comercial.

La convocatoria correspondiente al año 2026 contempló proyectos individuales, con un subsidio máximo de **\$180.000.000 CLP**, y **proyectos colaborativos, con un máximo de \$220.000.000 CLP**. Los porcentajes de cofinanciamiento informados alcanzaron hasta un 80 % para micro y pequeñas empresas, 60 % para empresas medianas y 40 % para grandes empresas.

La convocatoria incorporó una etapa obligatoria de presentación de perfil cuyo cierre fue el **9 de junio de 2026**, mientras que la etapa de postulación definitiva finalizó el **4 de agosto de 2026**. En consecuencia, **a la fecha de elaboración de este informe, 31 de agosto de 2026, la convocatoria Crea y Valida 2026 se encuentra cerrada.**

Para la Hélice Mecano, este instrumento se considera un antecedente de una línea de financiamiento potencialmente compatible con una futura etapa de desarrollo y validación,

principalmente para la fabricación del prototipo metálico, ejecución de actividades de I+D y validación técnica. Una eventual postulación dependerá de que CORFO abra una nueva convocatoria y de que la entidad postulante cumpla las bases vigentes en ese momento.

4.7.4.2 Gobierno Regional de Magallanes – INDESPA

Otro antecedente regional corresponde al Programa de Transferencia Fomento Pesca Artesanal de la Región de Magallanes, desarrollado mediante convenio entre el Gobierno Regional de Magallanes y el Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala (INDESPA).

El programa contempló líneas relacionadas con renovación de equipamiento, infraestructura, diversificación productiva, capacitación, asistencia técnica y fortalecimiento de las capacidades productivas del sector pesquero artesanal.

Dentro de este programa se realizó durante 2025 una convocatoria específica denominada “Equipamiento para el mejoramiento productivo para armadores y armadoras artesanales”, dirigida a armadores con inscripción vigente en el Registro Pesquero Artesanal de la Región de Magallanes.

Este antecedente presenta interés para la Hélice Mecano porque demuestra la existencia de mecanismos regionales de apoyo dirigidos directamente a armadores y a mejoras productivas de embarcaciones. Sin embargo, no corresponde afirmar que el proyecto pueda acceder directamente a estos recursos, ya que las bases de cada convocatoria establecen quién puede actuar como beneficiario.

En una futura convocatoria de características similares, una estrategia posible sería evaluar la participación de un armador artesanal elegible como beneficiario o usuario de validación, mientras OK-SHIP y otros proveedores participarían en las actividades técnicas del proyecto, siempre que las nuevas bases permitan dicha estructura.

El programa y las convocatorias mencionadas se incorporan, por lo tanto, como antecedentes regionales de financiamiento y no como recursos actualmente disponibles o adjudicados a la Hélice Mecano.

4.7.4.3 SERCOTEC – Crece Sostenible Magallanes 2026

Durante 2026, SERCOTEC desarrolló la convocatoria Crece Sostenible, Región de Magallanes y la Antártica Chilena, destinada a micro y pequeñas empresas y cooperativas que incorporaran prácticas sostenibles dentro de sus procesos productivos.

Las bases establecieron un financiamiento comprendido entre **\$7.000.000 y \$9.000.000 CLP netos**, con un aporte empresarial obligatorio equivalente al 10 % del subsidio otorgado. Entre los gastos financiables se contemplaron activos, habilitación de infraestructura, asistencia técnica, capacitación, materias primas, materiales y determinadas acciones asociadas a sostenibilidad.

La convocatoria se orientó a empresas de la Región de Magallanes con inicio de actividades en primera categoría y ventas netas anuales entre **200 UF y 25.000 UF**, además de los restantes requisitos establecidos en las bases.

El instrumento resulta relevante como antecedente debido a que una futura etapa del proyecto podría incorporar elementos relacionados con eficiencia de recursos, economía circular, aprovechamiento de materiales o tecnologías productivas sostenibles. Sin embargo, su eventual utilización dependerá de la apertura de una nueva convocatoria y del cumplimiento de su focalización y requisitos.

Por lo tanto, Crece Sostenible 2026 se utiliza únicamente como antecedente de un instrumento regional reciente y no como fuente de financiamiento actualmente disponible para el proyecto.

Estado de los instrumentos analizados

Instrumento	Institución	Uso dentro del proyecto
Crea y Valida 2026	CORFO	Antecedente para futura etapa de I+D y validación
Fomento Pesca Artesanal Magallanes	GORE Magallanes / INDESPA	Antecedente regional

Equipamiento para armadores Magallanes 2025	INDESPA / GORE Magallanes	Antecedente para eventual participación con armadores
Crece Sostenible Magallanes 2026	SERCOTEC	Antecedente para futuras convocatorias empresariales

Tabla 4.2. Instrumentos públicos considerados como antecedentes para una futura etapa de financiamiento del proyecto. Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes institucionales de CORFO, INDESPA y SERCOTEC, consultados al 31 de agosto de 2026.

Los instrumentos analizados demuestran que existen mecanismos públicos que pueden ser compatibles con distintas etapas futuras del proyecto. No obstante, ninguno de los fondos anteriores se considera adjudicado, comprometido ni disponible de manera automática para la Hélice Mecano.

En consecuencia, la estrategia financiera propuesta mantiene como escenario base la fabricación tercerizada y la participación de actores privados, mientras que los subsidios públicos se consideran una fuente complementaria y contingente, sujeta a futuras convocatorias, cumplimiento de requisitos y adjudicación mediante concurso.

4.7.5 Estrategia de financiamiento propuesta por etapas

Considerando el nivel actual de desarrollo de la Hélice Mecano, se propone dividir el financiamiento en diferentes etapas.

Etapas 1: Desarrollo y prototipado

Esta etapa corresponde al trabajo actualmente realizado y considera:

- Escaneo 3D.
- Diseño CAD.
- Ingeniería del sistema.
- Desarrollo del sistema de anclaje.
- Fabricación del prototipo PLA escala 1:2.

En esta fase se utilizan principalmente recursos propios, infraestructura disponible y apoyo técnico de OK-SHIP.

Etapla 2: Primer prototipo metálico funcional

Una vez validada la geometría y funcionamiento mecánico del prototipo, se propone obtener financiamiento para fabricar una primera unidad metálica.

En esta etapa los recursos podrían provenir de:

- OK-SHIP.
- Uno o más armadores interesados.
- Empresas pesqueras.
- Maestranzas y proveedores locales mediante aportes valorizados.
- Fondos públicos de innovación y pesca artesanal.

La fabricación mediante terceros permitiría evitar la adquisición de maquinaria industrial durante esta fase.

Etapla 3: Validación en embarcación

Una vez fabricada la primera unidad metálica se deberán realizar pruebas controladas relacionadas con:

- Montaje.
- Balanceo.
- Resistencia del sistema de fijación.
- Sustitución de palas.
- Tiempo requerido para efectuar el mantenimiento.
- Pruebas de operación.
- Inspección posterior al funcionamiento.

La participación de un armador resulta especialmente importante durante esta etapa debido a la necesidad de disponer de una embarcación representativa para efectuar las pruebas.

Etapla 4: Fabricación de serie inicial

En caso de obtener resultados satisfactorios se podrá desarrollar una serie limitada de hélices destinada a diferentes embarcaciones de prueba.

Durante esta etapa se podrá determinar con mayor precisión:

- Costo unitario.

- Tiempo de fabricación.
- Vida útil.
- Costos de mantenimiento.
- Demanda potencial.
- Cantidad anual de unidades requeridas.

Etapas 5: Evaluación de inversión productiva propia

Solamente una vez demostrada la existencia de una demanda suficiente se recomienda evaluar la adquisición de maquinaria especializada.

La decisión entre continuar tercerizando o internalizar parte del proceso deberá realizarse comparando el costo por unidad de ambas alternativas.

Puede expresarse mediante:

$$C_T = Q \times C_{\text{terc}}$$

donde:

- (C_T) : costo anual mediante fabricación tercerizada.
- (Q) : cantidad anual de unidades fabricadas.
- (C_{terc}) : costo de fabricación tercerizada por unidad.

Para producción propia:

$$C_P = C_F + (Q \times C_V)$$

donde:

- (C_P) : costo anual de fabricación propia.
- (C_F) : costos fijos y amortización de maquinaria.
- (C_V) : costo variable de fabricación por unidad.

La adquisición de maquinaria será económicamente conveniente cuando:

$$C_P < C_T$$

Es decir:

$$C_F + (Q \times C_V) < Q \times C_{\text{terc}}$$

De esta manera, la decisión de adquirir una impresora metálica u otra maquinaria industrial no se basa exclusivamente en la disponibilidad de la tecnología, sino en el volumen efectivo de producción requerido.

4.7.6 Modelo de implementación recomendado

Para la etapa actual del proyecto, el modelo recomendado corresponde a una combinación de financiamiento público, participación privada y fabricación tercerizada.

Una estructura preliminar podría considerar:

OK-SHIP: ingeniería, administración y coordinación técnica.

Armador asociado: embarcación, experiencia operacional, pruebas y eventualmente aporte económico.

Empresa pesquera o colaborador privado: financiamiento parcial del prototipo.

Proveedor de manufactura aditiva: fabricación metálica de palas.

Maestranza: mecanizado del núcleo y postprocesado.

Universidad o centro tecnológico: simulaciones, ensayos y apoyo en validación.

CORFO / GORE Magallanes / INDESPA / otros instrumentos: cofinanciamiento de las etapas de desarrollo, validación o implementación cuando las condiciones de las convocatorias permitan la postulación.

Este modelo permite reducir considerablemente la barrera de entrada del proyecto. En lugar de requerir una inversión inicial elevada destinada a adquirir una línea completa de fabricación, los recursos pueden concentrarse inicialmente en producir y validar una cantidad limitada de unidades funcionales.

Una vez demostrado que la Hélice Mecano reduce los tiempos de reparación, evita o disminuye la necesidad de varado y representa un beneficio económico para los armadores, se dispondrá de antecedentes técnicos y comerciales suficientes para justificar una eventual inversión productiva de mayor escala.

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

El presente capítulo evalúa la conveniencia económica de la propuesta Hélice Mecano respecto de una hélice convencional utilizada en embarcaciones artesanales. El análisis se concentra en los costos directamente asociados a una falla de hélice, el costo de varada y botada, el tiempo de detención de la embarcación y el valor económico de la producción que potencialmente deja de realizarse durante el periodo de inactividad. Debido a que el prototipo metálico funcional aún no ha sido fabricado, la evaluación financiera definitiva del producto deberá completarse una vez obtenidos los costos reales de fabricación del núcleo, de las palas y del servicio de sustitución.

5.1 Criterios de evaluación económica y financiera

5.1.1 Base de evaluación

La evaluación se desarrolla mediante una comparación incremental entre dos alternativas: el sistema convencional, en el cual una falla puede exigir retirar la embarcación del agua, desmontar la hélice y repararla o sustituirla. También el sistema modular propuesto, cuyo objetivo es permitir el reemplazo individual de una pala, conservando el núcleo y las demás palas en servicio. El criterio principal de comparación corresponde al costo total asociado a cada evento de falla y al tiempo de inactividad generado.

5.1.2 Moneda y tratamiento del IVA

Los valores monetarios se expresan en pesos chilenos (CLP). Cuando existe respaldo mediante factura, se presenta tanto el valor neto como el desembolso total incluido IVA. Para una evaluación financiera empresarial definitiva, los flujos deberán trabajar de forma consistente con el tratamiento tributario aplicable y con la posibilidad de utilizar el IVA como crédito fiscal. Por esta razón, no se deben mezclar valores netos y valores con IVA dentro de un mismo flujo de caja sin realizar previamente dicho ajuste.

5.1.3 Horizonte de evaluación

Para una futura evaluación de inversión se propone mantener un horizonte de análisis de diez años, sujeto a validación de la vida útil efectiva del núcleo modular y de las condiciones de operación de las embarcaciones. No obstante, la comparación desarrollada en este capítulo se

presenta principalmente por evento de falla, ya que el beneficio de la solución depende de la frecuencia de daños y reparaciones que experimente cada embarcación.

5.1.4 Tasa de descuento

La tasa de descuento no debe fijarse de forma arbitraria. Para la evaluación financiera definitiva se propone calcular el costo de capital mediante el modelo CAPM (Capital Asset Pricing Model), incorporando posteriormente los ajustes que correspondan al riesgo del proyecto y a su estructura de financiamiento.

$$k_e = R_f + \beta \cdot (R_m - R_f)$$

Donde k_e corresponde al costo del patrimonio; R_f , a la tasa libre de riesgo; β , al coeficiente de riesgo sistemático; y $(R_m - R_f)$, a la prima de riesgo de mercado.

5.1.5 Indicadores de evaluación

Una vez cerrados los costos de fabricación y el flujo de ingresos del producto, la evaluación financiera deberá considerar los siguientes indicadores:

$$VPN = -I_0 + \sum [FC_t / (1 + k)^t]$$

$$0 = -I_0 + \sum [FC_t / (1 + TIR)^t]$$

$$RBC = \text{Valor presente de beneficios} / \text{Valor presente de costos}$$

El periodo de recuperación de la inversión (PRI) se determinará acumulando los flujos netos hasta recuperar la inversión inicial. Estos indicadores no se presentan todavía como resultados definitivos, debido a que faltan datos esenciales de costo y comercialización de la Hélice Mecano.

5.2 Antecedentes económicos del sistema convencional

5.2.1 Costo documentado de varada y botada

Como antecedente real del mercado regional se dispone de una factura electrónica emitida en Punta Arenas con fecha 17 de agosto de 2026 por el servicio de “varada y botada” de una embarcación. El documento registra un valor neto de \$2.000.000 CLP, un IVA de \$380.000 CLP y un monto total pagado de \$2.380.000 CLP.

Concepto	Valor	Antecedente
----------	-------	-------------

Varada y botada – valor neto	\$2.000.000	Factura electrónica, 17-08-2026
IVA 19%	\$380.000	Factura electrónica, 17-08-2026
Desembolso total	\$2.380.000	Factura electrónica, 17-08-2026

Tabla 5.1. Antecedente documental de costo de varada y botada. Fuente: Cotización factura Megamotors 2026.

El valor anterior corresponde únicamente al servicio indicado en la factura. La estadía en varadero, trabajos mecánicos, uso de grúa, mano de obra especializada u otros servicios pueden generar costos adicionales. En consecuencia, \$2.380.000 CLP debe entenderse como un costo directo documentado de la maniobra completa de varada y botada para el caso analizado, y no como el costo total de una reparación de hélice.

5.2.2 Costos de reparación y reposición de hélices

Los antecedentes recopilados durante el proyecto indican que una intervención local de rectificación y balanceo puede presentar valores referenciales entre \$200.000 y \$400.000 CLP. Cuando existe daño en una pala y es necesario soldar o reconstruir material, se identifican valores aproximados adicionales entre \$100.000 y \$300.000 CLP, dependiendo de la magnitud del daño y de las características de la hélice.

En consecuencia, una reparación que combine reconstrucción de una pala con rectificación y balanceo puede alcanzar de forma referencial entre \$300.000 y \$700.000 CLP, sin considerar la maniobra de varada y botada ni la pérdida operacional asociada al tiempo de detención.

Como antecedente comercial histórico, una cotización de MegaMotors de fecha 17 de junio de 2022 registró una hélice de cuatro palas de 35 pulgadas de diámetro y paso 29 pulgadas para la embarcación Nahuel por \$2.550.000 CLP, y una hélice de cuatro palas de 38 pulgadas de diámetro y paso 32 pulgadas para la embarcación Víctor Gabriel por \$2.890.000 CLP. Para ambos casos se informó un plazo de entrega de 90 a 100 días. Estos valores constituyen evidencia histórica y no deben utilizarse como precios vigentes de 2026 sin actualización.

5.2.3 Tiempo de detención operacional

El tiempo de detención asociado a una falla de hélice no depende únicamente de la duración de la reparación mecánica. En las condiciones de operación de embarcaciones pesqueras de la Región de Magallanes, el ciclo completo puede incluir navegación desde la zona de pesca hasta puerto,

espera por disponibilidad de varadero o taller, varada, desmontaje de la hélice, reparación o sustitución, balanceo, montaje, botada y posterior retorno a la zona de operación.

Para establecer un rango operacional representativo se utilizó como fuente primaria una entrevista a Fernando Arias Díaz, armador con más de 40 años de experiencia en el rubro pesquero y en la operación de embarcaciones en la Región de Magallanes.

De acuerdo con la experiencia operacional del informante, una falla relevante de hélice puede generar un periodo total de detención de aproximadamente 7 a 15 días en condiciones habituales, pudiendo extenderse hasta alrededor de 30 días cuando existen dificultades asociadas a disponibilidad de varadero, reparación, obtención de repuestos, condiciones meteorológicas u otras restricciones operacionales.

Asimismo, Fernando Arias Díaz indicó que, dependiendo de la ubicación de la embarcación en la zona de pesca, el retorno hasta puerto puede requerir aproximadamente 40 horas de navegación, tiempo sujeto a variaciones asociadas a distancia, condiciones meteorológicas, estado del mar, marea y velocidad efectiva de navegación.

Debido a que estos antecedentes corresponden a experiencia operacional directa y no a una estadística oficial aplicable a toda la flota, los valores se utilizan como rangos referenciales para la construcción de escenarios de evaluación económica, y no como tiempos estándar para todas las embarcaciones artesanales de Magallanes.

Escenario	Tiempo de detención	Interpretación
Inferior	7 días	Condición favorable de retorno, disponibilidad y reparación
Intermedio	15 días	Condición operacional representativa utilizada para comparación
Superior	30 días	Condición desfavorable por esperas, reparación, repuestos o condiciones ambientales

Tabla 5.2. Escenarios referenciales de tiempo de detención operacional por falla relevante de hélice. Fuente: Elaboración propia a partir de entrevista a Fernando Arias Díaz, 2026.

Según Fernando Arias Díaz, armador con más de 40 años de experiencia en el rubro, una falla relevante de hélice puede generar detenciones aproximadas de 7 a 15 días y, en situaciones desfavorables, extenderse hasta alrededor de 30 días (F. Arias Díaz, comunicación personal, 25 de mayo 2026)

Asimismo, el informante reporta trayectos de retorno a puerto que pueden alcanzar aproximadamente 40 horas de navegación, dependiendo de la ubicación y de las condiciones operacionales (F. Arias Díaz, comunicación personal, 25 de mayo 2026)

Antecedente	Información
Informante	Fernando Arias Díaz
Calidad del informante	Armador
Experiencia	Más de 40 años en el rubro pesquero
Zona de experiencia	Región de Magallanes
Fecha	25 de mayo 2026
Medio	Presencial
Antecedente 1	Detención habitual por falla relevante de hélice: aprox. 7–15 días
Antecedente 2	Situaciones desfavorables: hasta aprox. 30 días
Antecedente 3	Retorno desde zona de pesca: hasta aprox. 40 h de navegación
Uso en el proyecto	Construcción de escenarios de evaluación económica

*Tabla 5.3. Registro de antecedentes de la entrevista operacional utilizada en la evaluación económica. **Fuente:** Elaboración propia a partir de entrevista a Fernando Frias Díaz, 25 de mayo de 2026.*

5.2.4 Valor bruto de producción potencial no realizada

Para dimensionar económicamente la relevancia del tiempo de detención se utilizaron antecedentes comerciales correspondientes al año 2026 proporcionados por Blue Ocean SpA, empresa de la Región de Magallanes, mediante facturas de comercialización utilizadas como respaldo documental del proyecto. A partir de estos antecedentes se adoptó, para efectos del caso de evaluación, un volumen diario referencial de 550 kg de producto y un valor promedio de comercialización de \$9.500 CLP por kilogramo.

Debido a que estos valores provienen de antecedentes comerciales específicos y pueden variar según especie, temporada, calidad del producto y condiciones de mercado, se utilizan como **referencia para construir el escenario económico del proyecto y no como un valor universal para toda la actividad pesquera regional.**

El valor bruto diario de producción potencial se determina mediante:

$$\text{VBD} = \text{Qd} \times \text{Pkg}$$

$$\text{VBD} = 550 \text{ kg/día} \times \$9.500/\text{kg}$$

$$\text{VBD} = \$5.225.000 \text{ CLP/día}$$

Este monto corresponde a **valor bruto de producción potencial** y no a utilidad neta, debido a que no descuenta costos variables asociados a la operación de la embarcación.

Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes comerciales proporcionados por Blue Ocean Seafood SpA mediante facturas correspondientes al año 2026.

Escenario de detención	Cálculo	Valor bruto potencial no realizado
7 días	$7 \times \$5.225.000$	\$36.575.000
15 días	$15 \times \$5.225.000$	\$78.375.000
30 días	$30 \times \$5.225.000$	\$156.750.000

Tabla 5.4. Valor bruto de producción potencial no realizada según tiempo de detención. Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes comerciales de Blue Ocean Seafood SpA, 2026.

5.3 Estructura de costos propuesta para la Hélice Mecano

Para comparar económicamente ambas alternativas es necesario determinar el costo completo del sistema modular y, de manera separada, el costo de una intervención de reemplazo de pala. La estructura económica propuesta considera como mínimo los siguientes componentes:

- Costo de fabricación del núcleo metálico, incluyendo material, mecanizado CNC, alojamientos, correderas y terminaciones.
- Costo de fabricación de una pala metálica mediante el proceso seleccionado, incluyendo materia prima, manufactura aditiva, sobrematerial, mecanizado, pulido y control dimensional.
- Costo de los elementos de fijación, pernos y sistemas de seguridad mecánica.

- Costo de inspección y balanceo del conjunto.
- Costo de logística y disponibilidad de palas de repuesto.
- Costo de la operación de sustitución, incluyendo buzo u otro servicio especializado cuando corresponda.

$$C_m = C_n + N \cdot C_p + C_f + C_b + C_l$$

Donde C_m corresponde al costo inicial del sistema Mecano; C_n , al costo del núcleo; C_p , al costo unitario de pala; N , al número de palas; C_f , a fijaciones; C_b , a balanceo y control; y C_l , a logística y servicios asociados.

$$C_{int,M} = C_p + C_{sust} + C_{ins}$$

Donde $C_{int,M}$ corresponde al costo de una intervención modular; C_p , al costo de la pala de repuesto; C_{sust} , al costo del servicio de sustitución; y C_{ins} , a inspección, ajuste y control posterior.

5.4 Comparación económica preliminar

5.4.1 Costo directo potencialmente evitable

Si la futura validación demuestra que el cambio de una pala puede realizarse con la embarcación en el agua y bajo condiciones seguras, la propuesta podría evitar la maniobra de varada y botada en determinados eventos de daño. Para el caso documentado, ello representa un costo directo potencialmente evitable de \$2.000.000 CLP netos, equivalente a un desembolso de \$2.380.000 CLP incluido IVA. Esta cifra no se presenta como ahorro garantizado, ya que depende de la factibilidad técnica, normativa y operacional de realizar el reemplazo sin varar la embarcación.

5.4.2 Comparación del tiempo de intervención

Para el sistema modular se adopta preliminarmente un tiempo de intervención de 5 horas. Esta estimación incluye preparación, inmovilización segura del sistema propulsor, acceso al conjunto, retiro de fijaciones, extracción de la pala dañada, instalación de la pala de reemplazo, ajuste e inspección final. Este tiempo es un supuesto de diseño y deberá medirse posteriormente en una prueba real.

$$RT = [(TC - TM) / TC] \cdot 100$$

Escenario convencional	TC	TM Mecano	Reducción calculada	Condición
7 días	168 h	5 h	97,0 %	Preliminar
15 días	360 h	5 h	98,6 %	Preliminar
30 días	720 h	5 h	99,3 %	Preliminar

Tabla 5.5. Reducción preliminar del tiempo de detención bajo el supuesto de una sustitución modular de 5 horas.

Fuente: *Elaboración propia, 2026.*

Los resultados anteriores representan una comparación de escenarios y no una medición experimental. Su utilidad es mostrar la sensibilidad del proyecto frente al tiempo de detención. La ventaja económica real dependerá de que el procedimiento modular pueda ser ejecutado en condiciones seguras y de que la pala de reemplazo se encuentre disponible cuando ocurra la falla.

5.4.3 Costo total de un evento de falla

Para evitar comparar únicamente el precio de una hélice o de una pala, se propone utilizar el costo total del evento de falla:

$$CTC = Cv + Cr + Co$$

$$CTM = Cp + Csust + Co,M$$

Donde CTC corresponde al costo total del evento convencional; Cv, al costo de varada y botada; Cr, al costo de reparación o reposición; Co, al efecto económico asociado al periodo de inactividad; CTM, al costo total del evento modular; Cp, al costo de la pala; Csust, al costo de sustitución; y Co,M, al efecto económico del tiempo de intervención modular.

Esta formulación muestra que el beneficio central del proyecto no depende exclusivamente de fabricar una pala más barata que una hélice convencional. Una reducción significativa del tiempo fuera de servicio puede tener un efecto económico mayor que el ahorro directo sobre el componente mecánico.

5.5 Evaluación financiera del proyecto

La evaluación financiera de un proyecto requiere disponer de flujos de caja contruidos a partir de antecedentes cuantificables y trazables. Para calcular indicadores como Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) y Relación Beneficio-Costo (RBC), es necesario conocer como mínimo la inversión inicial, costos de

fabricación, costos operacionales, precio de venta, volumen de ventas esperado y tasa de descuento aplicable.

En el estado actual de desarrollo de la Hélice Mecano, dichos antecedentes aún no se encuentran completamente disponibles. El presente Trabajo de Título alcanzó una etapa de diseño, ingeniería inversa y prototipado geométrico-funcional a escala 1:2 en PLA, mientras que la fabricación de una versión metálica funcional corresponde a una etapa posterior.

Para la construcción del flujo financiero se propone la siguiente estructura mínima:

- Inversión inicial de ingeniería, prototipado y validación.
- Costo unitario del núcleo y de cada pala.
- Precio de venta del sistema completo y de la pala de repuesto.
- Cantidad de sistemas y palas proyectadas por año.
- Costos administrativos y comerciales.
- Capital de trabajo.
- Impuestos y depreciaciones cuando correspondan.
- Valor residual al final del horizonte.
- Tasa de descuento calculada y justificada mediante CAPM u otro costo de capital aplicable.

5.6 Análisis de sensibilidad

La variable de mayor impacto preliminar corresponde al tiempo total de detención de la embarcación. Por esta razón, se utilizaron tres escenarios: 7 días como escenario inferior, 15 días como escenario intermedio y 30 días como escenario superior. También deberá realizarse sensibilidad sobre el costo de fabricación de la pala, frecuencia anual de fallas, valor de la producción diaria y costo del servicio de sustitución.

Variable	Escenario bajo	Escenario base	Escenario alto
Detención convencional	7 días	15 días	30 días
Valor bruto diario	\$5.225.000	\$5.225.000	\$5.225.000
Tiempo Mecano	5 h*	5 h*	5 h*
Costo pala Mecano	Pendiente	Pendiente	Pendiente
Frecuencia de fallas/año	Pendiente	Pendiente	Pendiente

Tabla 5.6. Variables y escenarios considerados para el análisis de sensibilidad preliminar. Fuente: Elaboración propia, 2026.

***Tiempo estimado de diseño, pendiente de validación experimental.**

5.7 Síntesis de la evaluación económica

Los antecedentes disponibles permiten establecer que una falla de hélice genera un impacto económico compuesto por costos mecánicos directos y costos operacionales asociados a la detención de la embarcación. La factura analizada demuestra un desembolso de \$2.380.000 CLP por la maniobra de varada y botada, mientras que la reparación local puede agregar cientos de miles de pesos. Sin embargo, el componente potencialmente dominante corresponde a la interrupción de la faena: bajo el caso referencial de 550 kg diarios a \$9.500 por kilogramo, el valor bruto de producción potencial no realizada alcanza \$36.575.000 en 7 días y \$156.750.000 en 30 días.

En este contexto, la propuesta modular presenta una oportunidad económica relevante si logra sustituir una pala en un periodo sustancialmente menor y sin necesidad de varar la embarcación. La magnitud definitiva del beneficio no puede establecerse hasta contar con el costo real de la pala modular, costo de sustitución, frecuencia de fallas y margen económico efectivo de la operación. Por lo tanto, la evaluación actual debe considerarse preliminar y orientada a identificar las variables críticas que deberán ser validadas en la siguiente etapa del proyecto.

CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación de resultados se estructura diferenciando los antecedentes efectivamente obtenidos durante el Trabajo de Título de aquellos que corresponden a estimaciones de diseño o validaciones futuras. Esta distinción resulta fundamental debido a que el prototipo construido corresponde a una demostración geométrica y funcional a escala 1:2 en PLA, mientras que las variables de resistencia estructural, comportamiento hidrodinámico, vibraciones, consumo de combustible y durabilidad requieren una versión metálica a escala real y pruebas controladas en una embarcación.

6.1 Resultado del desarrollo de ingeniería

El desarrollo permitió transformar una hélice convencional analizada mediante escaneo 3D en una propuesta modular modelada digitalmente. A partir del levantamiento realizado con equipamiento de OK-SHIP, la geometría fue llevada a Autodesk Fusion 360, donde se reconstruyeron dimensiones relevantes del núcleo y las palas y se desarrolló un nuevo sistema compuesto por un núcleo independiente, raíces de pala desmontables, alojamientos tipo corredera y elementos de fijación mecánica.

El diseño digital también permite modificar la geometría hidrodinámica de las palas según los requerimientos de cada aplicación. El perfil NACA 4412 fue utilizado como referencia de modelado durante el desarrollo, pero no se establece como un perfil universal para todas las embarcaciones. La arquitectura CAD permite incorporar otros perfiles o geometrías sin modificar el principio de modularidad del núcleo y del sistema de anclaje.

6.2 Resultado del prototipado a escala

Se fabricó un prototipo completo a escala 1:2 mediante impresión 3D en PLA. La finalidad de esta pieza corresponde a comprobar la materialización física del diseño, visualizar el conjunto, verificar la relación geométrica entre núcleo y palas y evaluar preliminarmente el concepto de desmontaje individual.

El prototipo no constituye una validación estructural ni hidrodinámica. El PLA fue utilizado por su facilidad de fabricación y bajo costo y no se considera apto para operar como material definitivo de una hélice marina. Asimismo, la fijación mediante los pernos definitivos aún debe ser

implementada y ensayada, por lo que no corresponde afirmar que el sistema de anclaje se encuentre validado bajo carga.

Aspecto	Estado actual	Alcance del resultado
Modelo CAD modular	Desarrollado	Resultado obtenido
Núcleo y palas escala 1:2	Fabricados en PLA	Resultado obtenido
Sistema de corredera	Incorporado en el diseño/prototipo	Verificación geométrica preliminar
Resistencia estructural	Sin ensayo a escala real	Pendiente
Comportamiento hidrodinámico	Sin prueba en embarcación	Pendiente
Vibración y consumo	Sin medición real	Pendiente

Tabla 6.1. Estado de validación de los principales componentes del proyecto. *Fuente: Elaboración propia, 2026.*

6.3 Evaluación del proceso de mantenimiento

En el sistema convencional, una falla relevante de hélice puede generar una cadena de actividades que incluye retorno a puerto, coordinación de varadero, varada, desmontaje, reparación o reposición, balanceo, montaje, botada y navegación de regreso a faena. En las condiciones operacionales recopiladas para Magallanes, el ciclo completo puede representar entre 7 y 30 días de detención.

La propuesta Hélice Mecano modifica este enfoque al concentrar la intervención en el componente dañado. El procedimiento proyectado considera inmovilización segura del eje, acceso al conjunto, retiro de las fijaciones, extracción de una pala, instalación de una pala de repuesto, aplicación del ajuste requerido y verificación final. Para efectos de evaluación se adopta una duración preliminar de 5 horas.

Sistema convencional	Sistema modular propuesto
Detección del daño → retorno a puerto → espera/varadero → varada → desmontaje de hélice → reparación o reemplazo → balanceo → montaje → botada → regreso a faena	Detección del daño → inmovilización del eje → acceso al conjunto → retiro de una pala → instalación de repuesto → ajuste → inspección → retorno a operación

Tabla 6.2. Comparación conceptual del proceso de mantenimiento. *Fuente: Elaboración propia, 2026.*

6.4 Evaluación de reducción del tiempo de detención

La reducción porcentual del tiempo se calcula mediante:

$$RT = [(TC - TM) / TC] \cdot 100$$

Donde TC es el tiempo total asociado al evento convencional y TM el tiempo estimado para la intervención modular.

Detención convencional	Equivalente en horas	Intervención modular*	Reducción	Interpretación
7 días	168 h	5 h	97,0 %	Escenario inferior
15 días	360 h	5 h	98,6 %	Escenario intermedio
30 días	720 h	5 h	99,3 %	Escenario superior

Tabla 6.3. Reducción preliminar del tiempo de detención bajo el supuesto de una intervención modular de 5 horas.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que, bajo los escenarios considerados, la mayor oportunidad del sistema modular se relaciona con la disminución del tiempo total de indisponibilidad y no únicamente con la reducción del tiempo de trabajo mecánico. No obstante, estos porcentajes deberán recalcularse una vez realizada una prueba operacional real.

6.5 Evaluación económica de la indisponibilidad

El caso operacional utilizado considera una producción promedio referencial de 550 kg diarios y un valor de \$9.500 CLP por kilogramo. A partir de estos valores, el valor bruto diario de producción potencial alcanza \$5.225.000 CLP. La exposición económica asociada a la detención se determina mediante:

$$VBPNR = D \cdot Qd \cdot Pkg$$

Detención	Valor bruto potencial no realizado	Observación
7 días	\$36.575.000	Escenario inferior
15 días	\$78.375.000	Escenario intermedio
30 días	\$156.750.000	Escenario superior

Tabla 6.4. Valor bruto de producción potencial asociado a distintos periodos de detención. **Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes comerciales de Blue Ocean Seafood SpA, 2026.**

Estos montos no deben interpretarse como utilidad perdida. Corresponden al valor bruto de producción potencial que dejaría de realizarse bajo el supuesto utilizado. Para convertirlos en pérdida económica neta debe descontarse el efecto de costos variables evitados y utilizarse el margen real de la operación. Aun con esta limitación, los valores muestran que el impacto de una detención prolongada puede superar ampliamente los costos mecánicos directos de la falla.

6.6 Evaluación del costo de varada y botada

La evidencia documental recopilada durante el proyecto registra un costo de \$2.000.000 CLP netos, equivalente a \$2.380.000 CLP con IVA, por una maniobra de varada y botada en Punta Arenas durante agosto de 2026. Este valor constituye un costo directo que podría ser evitado en aquellos eventos donde la Hélice Mecano logre sustituir una pala con la embarcación en el agua.

Por lo tanto, la modularidad genera una doble fuente potencial de beneficio: por una parte, evita sustituir componentes que permanecen en condiciones de servicio; por otra, puede reducir o eliminar costos asociados a la extracción de la embarcación del agua. Ambas ventajas deben validarse mediante un procedimiento seguro de sustitución y mediante la aprobación de las condiciones operacionales y normativas que correspondan.

6.7 Limitaciones de los resultados

Los resultados obtenidos corresponden a una etapa de desarrollo de concepto y prototipado. El proyecto aún no dispone de una pala metálica a escala real ni de pruebas de navegación, por lo que no es posible afirmar experimentalmente una mejora de eficiencia propulsiva, reducción de consumo, resistencia frente a cavitación, vida útil o capacidad de soportar las cargas reales de operación. Del mismo modo, el tiempo de reemplazo de 5 horas corresponde a una estimación que deberá ser verificada mediante una prueba controlada.

La evaluación económica también presenta limitaciones: el valor de \$5.225.000 diarios representa producción bruta potencial y no utilidad neta; la cotización de hélices de MegaMotors corresponde al año 2022; y todavía no se dispone del costo real de fabricación de la pala y del núcleo modular. Estas limitaciones deben mantenerse explícitas para evitar presentar como resultados medidos aquellos antecedentes que todavía corresponden a estimaciones.

6.9 Validación futura requerida

La siguiente etapa del proyecto deberá considerar, en orden progresivo:

1. Definición y fabricación de una pala metálica representativa mediante el proceso seleccionado.
2. Inspección dimensional, control de defectos, tratamiento y mecanizado/acabado superficial según corresponda.
3. Análisis estructural y verificación de la zona de raíz, corredera y fijaciones.

4. Balanceo estático y dinámico del conjunto.
5. Prueba en tierra con sistema propulsor controlado.
6. Prueba en embarcación bajo condiciones previamente definidas.
7. Registro comparativo de RPM, vibración, velocidad, consumo y comportamiento del conjunto.
8. Cronometraje real del procedimiento de sustitución de pala y registro del costo completo de la intervención.
9. Actualización de la evaluación financiera con costos reales de fabricación, frecuencia de fallas y margen económico de la faena.

6.10 Síntesis de resultados

El resultado principal del Trabajo de Título corresponde al desarrollo de una arquitectura modular de hélice y a su materialización mediante un prototipo físico a escala 1:2. Los antecedentes económicos y operacionales recopilados muestran que el problema abordado no se limita al costo del componente dañado, sino que está fuertemente condicionado por el tiempo de inactividad y por las maniobras necesarias para acceder a una hélice convencional.

Bajo los escenarios analizados, una detención convencional de 7 a 30 días contrasta con una intervención modular estimada en 5 horas, lo que representa reducciones teóricas del tiempo de indisponibilidad entre 97,0 % y 99,3 %. Adicionalmente, existe un costo documentado de \$2.380.000 CLP por varada y botada que podría ser evitado en aquellos casos donde el reemplazo de una pala pueda realizarse con la embarcación en el agua. Estos resultados deben entenderse como evidencia del potencial de la solución y no como validación final del desempeño del producto.

La conclusión técnica de esta etapa es que la propuesta presenta fundamentos suficientes para avanzar a una fase de validación metálica y operacional. El siguiente hito crítico consiste en fabricar una pala funcional, verificar el sistema de fijación y cuantificar mediante ensayos reales el tiempo de sustitución, comportamiento estructural, balance, vibraciones y desempeño de la hélice. La evaluación económica definitiva deberá actualizarse simultáneamente con los costos reales de dicha fabricación.

Conclusiones

El análisis del contexto técnico y operativo permitió establecer que el problema abordado no corresponde únicamente al precio de una hélice dañada. En el segmento de embarcaciones artesanales de más de 12 y hasta 18 m de Magallanes, una falla relevante puede involucrar navegación de retorno, disponibilidad de varadero, reparación, balanceo y pérdida de jornadas productivas. SERNAPESCA registró 118 embarcaciones extractivas dentro de este rango de eslora durante el segundo trimestre de 2025, constituyendo el universo técnico inicial considerado por el proyecto.

La evaluación de alternativas de fabricación permitió definir una ruta tecnológica coherente con el estado de desarrollo. El prototipo se fabricó en PLA a escala 1:2 únicamente para validar geometría y modularidad. Para una futura versión funcional se propone evaluar una aleación metálica apta para ambiente marino y utilizar WAAM como alternativa principal para palas de mayor tamaño, complementada con mecanizado CNC, inspección, pulido y balanceo; LPBF/DMLS se mantiene como alternativa cuando las dimensiones y requisitos de precisión lo justifiquen.

El objetivo de diseño se materializó mediante una arquitectura compuesta por núcleo independiente, palas desmontables y una unión tipo corredera o encastre complementada por fijaciones mecánicas. El levantamiento mediante escaneo 3D en OK-SHIP y el modelado en Autodesk Fusion 360 permitieron generar un prototipo físico completo a escala 1:2. Esta etapa valida la materialización geométrica del concepto, pero no constituye una validación estructural, hidrodinámica ni de seguridad operacional.

La comparación económica y operacional muestra que el principal potencial de la Hélice Mecano se relaciona con la reducción de la indisponibilidad. Los antecedentes recopilados sitúan la detención convencional entre 7 y 30 días, mientras que para la intervención modular se adopta preliminarmente una estimación de 5 horas. Bajo dichos escenarios, la reducción teórica del tiempo se encuentra entre 97,0 % y 99,3 %. Además, se dispone de un costo documentado de \$2.380.000 CLP con IVA por una maniobra de varada y botada en Punta Arenas. Estos resultados representan potenciales beneficios y deberán ser confirmados mediante una prueba real del sistema.

La evaluación financiera definitiva permanece abierta debido a que todavía no se dispone de cotizaciones completas y trazables para la pala metálica, núcleo, fijaciones, inspección, balanceo y servicio de sustitución. Por esta razón, no se presentan como resultados definitivos un precio de venta, VPN, TIR, PRI o RBC. La metodología y estructura de cálculo quedan definidas para completar dichos indicadores cuando se incorporen los costos pendientes.

En síntesis, el Trabajo de Título permite concluir que la arquitectura modular desarrollada presenta fundamentos técnicos y económicos suficientes para justificar una segunda etapa de validación. El siguiente hito crítico consiste en fabricar una versión metálica funcional, verificar estructuralmente la raíz, corredera y fijaciones, balancear el conjunto y realizar ensayos controlados que permitan medir el tiempo real de sustitución, vibraciones, RPM, consumo y comportamiento hidrodinámico.

BIBLIOGRAFÍA

Autodesk, Inc. (2024). *Airfoil Generator for Autodesk Fusion*. Autodesk App Store. <https://apps.autodesk.com/FUSION/en/Detail/HelpDoc?appId=1569210467479959341&appLang=en&os=Win64>

Carlton, J. (2018). *Marine Propellers and Propulsion* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://shop.elsevier.com/books/marine-propellers-and-propulsion/carlton/978-0-08-100366-4>

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante [DIRECTEMAR]. (1999). *Circular Marítima O-71/010: Establece normas sobre construcción, equipamiento, inspecciones y otras exigencias de seguridad que deben cumplir las naves y artefactos navales menores*. Armada de Chile. <https://www.directemar.cl/directemar/marco-normativo/circulares-maritimas/establece-normas-sobre-construccion-equipamiento-inspecciones-y-otras>

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante [DIRECTEMAR]. (2006). *Circular Marítima A-42/002: Establece las normativas y formularios para actividades de buceo profesional*. Armada de Chile. <https://www.directemar.cl/directemar/marco-normativo/circulares-maritimas/establece-las-normativas-y-formularios-para-actividades-de-buceo>

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante [DIRECTEMAR]. (2011). *Circular Marítima A-42/005: Imparte instrucciones para autorizar al personal que se desempeña a bordo de las naves de pesca para realizar buceos en caso sea declarada una emergencia*. Armada de Chile. <https://www.directemar.cl/directemar/marco-normativo/circulares-maritimas/imparte-instrucciones-para-autorizar-al-personal-que-se-desempena-a>

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante [DIRECTEMAR]. (2024). *Circular Marítima O-72/023: Establece procedimiento y exigencias para la presentación y aprobación de proyectos de construcción, modificación, regularización, anexos de estabilidad y manual de sujeción de la carga en línea, de naves menores con cubierta y de artefactos navales de apoyo a la acuicultura*. Armada de Chile. <https://www.directemar.cl/o-72-023-establece-procedimiento-y-exigencias-para-la-presentacion-y>

DNV. (2025). *DNV-ST-B203: Additive manufacturing*. Det Norske Veritas. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-b203-additive-manufacturing/>

EOS GmbH. (2026). *EOS M 400-4: Metal additive manufacturing system*. EOS. <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-printers/eos-m-400-4>

Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala [INDESPA]. (2025). *Equipamiento para el mejoramiento productivo para armadores y armadoras artesanales, Región de Magallanes*. Gobierno de Chile. <https://www.indespa.cl/concursos/magallanes-xxx-0/>

Instituto Nacional de Desarrollo Sustentable de la Pesca Artesanal y de la Acuicultura de Pequeña Escala [INDESPA]. (s. f.). *Programa Transferencia Fomento Pesca Artesanal, Región de Magallanes y Antártica Chilena. Código BIP N.º 40058999-0*. Gobierno de Chile. <https://www.indespa.cl/nuestros-programas/?open=2>

International Towing Tank Conference [ITTC]. (2024). *Visual Description and Measurement of Cavitation Events. Recommended Procedure 7.5-02-03-03.2, Revision 03*. ITTC. <https://ittc.info/media/11816/75-02-03-032.pdf>

Ministerio de Defensa Nacional. (1978). *Decreto Ley N.º 2.222: Ley de Navegación*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=6855>

Ministerio de Defensa Nacional. (1982). *D.S. (M) N.º 752: Reglamento de Buceo para Buzos Profesionales (TM-035)*. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. <https://www.directemar.cl/directemar/marco-normativo/reglamentos>

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (2026, 22 de mayo). *Corfo abre convocatorias para que Pymes impulsen sus capacidades de innovación y lideren proyectos I+D*. Gobierno de Chile. <https://www.economia.gob.cl/2026/05/22/corfo-abre-convocatorias-para-que-pymes-impulsen-sus-capacidades-de-innovacion-y-lideren-proyectos-id.htm>

MX3D. (2026). *M1 Industrial Metal 3D Printer: WAAM system*. MX3D. <https://mx3d.com/industrial-metal-3d-printer/>

OK-SHIP SpA. (s. f.-a). *Quiénes somos*. OK-SHIP SpA. <https://ok-ship.cl/quienes-somos>

OK-SHIP SpA. (s. f.-b). *Consultoría e Ingeniería Naval*. OK-SHIP SpA. <https://ok-ship.cl/>

OK-SHIP SpA. (s. f.-c). *Nuestros servicios*. OK-SHIP SpA. <https://ok-ship.cl/servicios>

OK-SHIP SpA. (s. f.-d). *Proyectos*. OK-SHIP SpA. <https://ok-ship.cl/proyectos>

Pinkerton, R. M. (1937). *Calculated and measured pressure distributions over the midspan section of the N.A.C.A. 4412 airfoil* (NACA Report No. 563). National Advisory Committee for Aeronautics. NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930091638>

RAMLAB. (2017). *RAMLAB unveils world's first class approved 3D printed ship's propeller*. Rotterdam Additive Manufacturing LAB. <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/>

Servicio de Cooperación Técnica [SERCOTEC]. (2026). *Crece Sostenible, Región de Magallanes y la Antártica Chilena 2026*. Gobierno de Chile. <https://www.sercotec.cl/convocatoria/crece-sostenible-region-de-magallanes-y-la-antartica-chilena-2026/>

Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura [SERNAPESCA]. (2025). *Boletín sectorial Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, segundo trimestre 2025*. Gobierno de Chile. https://www.sernapesca.cl/app/uploads/2025/08/boletin_sectorial_region_de_magallanes_-_2do_trimestre_2025.pdf

Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura [SERNAPESCA]. (2026). *Estadísticas oficiales de pesca y acuicultura correspondientes al año 2025*. Gobierno de Chile. <https://www.sernapesca.cl/>

Subsecretaría de Pesca y Acuicultura [SUBPESCA]. (s. f.). *Información y normativa del sector pesquero artesanal*. Gobierno de Chile. <https://www.subpesca.cl/portal/normativa/Actividades-Reguladas/Pesca-artesanal/>

DOCUMENTOS Y FUENTES PRIMARIAS DEL PROYECTO

MegaMotors. (2022, 17 de junio). *Cotización comercial de hélices para las embarcaciones Nahuel y Víctor Gabriel* [documento comercial no publicado].

Corporación de Pescadores Artesanales y Armadores Barranco Amarillo. (2026, 17 de agosto). *Factura electrónica N.º 8934 por servicio de varada y botada* [documento comercial no publicado].

Blue Ocean Seafood SpA. (2026). *Facturas comerciales utilizadas como respaldo del volumen diario de producto y precio de comercialización en la Región de Magallanes* [documentos comerciales no publicados].

Frias Díaz, F. (2026, agosto). *Entrevista sobre tiempos de detención y operación de embarcaciones pesqueras en la Región de Magallanes* [comunicación personal]. Armador con más de 40 años de experiencia en el rubro pesquero.