



Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Marítima

Trabajo de titulación
Modalidad Proyecto Investigativo

Diseño y construcción de un Túnel de Cavitación didáctico y funcional para la Carrera de
Ingeniería Marítima.

Autores:

CADENA CRUZ PEDRO FERNANDO
MENÉNDEZ CEDEÑO LUIS RAMÓN

Asesor académico: Ing. Folke Zambrano Vera

Manta – Ecuador

2026 (1)

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante CADENA CRUZ PEDRO FERNANDO, legalmente matriculada en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico 2026-1, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es "Diseño y construcción de un Túnel de Cavitación didáctico y funcional para la Carrera de Ingeniería Marítima".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 24 de julio 2026.

Lo certifico,



Código QR para la verificación de la firma digital del docente tutor(a).

Ing. Folke Zambrano Vera
Docente Tutor
Ingeniería, Industria y Arquitectura

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante MENENDEZ CEDENO LUIS RAMON, legalmente matriculada en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico 2026-1, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es "Diseño y construcción de un Túnel de Cavitación didáctico y funcional para la Carrera de Ingeniería Marítima".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 24 de julio 2026.

Lo certifico,



Código QR para verificar la autenticidad de la firma digital.
FOLKE ZAMBRANO VERA

Ing. Folke Zambrano Vera
Docente Tutor
Ingeniería, Industria y Arquitectura

AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO

Nosotros, **Cadena Cruz Pedro Fernando** y **Menéndez Cedeño Luis Ramón**, identificados con cédula de ciudadanía CC. **095136808-3** y CC. **131666118-8** respectivamente; hacemos constar de manera libre y voluntaria que somos los únicos autores del trabajo titulado: ***“Diseño y construcción de un Túnel de Cavitación didáctico y funcional para la Carrera de Ingeniería Marítima”***. Confirmamos que la presente investigación es original e inédita; y que las posturas, análisis, datos y conclusiones presentadas en ella representan nuestra entera responsabilidad. Garantizamos haber respetado los derechos de propiedad intelectual de terceros, acatando las normas éticas y legales vigentes, por lo que liberamos a la carrera de **Ingeniería Marítima** de la **Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí** de cualquier tipo de reclamo, demanda o acción legal que pudiera surgir al respecto. Asimismo, otorgamos a la institución una licencia no exclusiva para la publicación, divulgación y conservación digital o física del documento con fines puramente académicos, reservándose la responsabilidad de la obra conforme a la normativa institucional.

Manta, 28 de julio del 2026



Cadena Cruz Pedro Fernando

C.I. 095136808-3

Estudiante



Menéndez Cedeño Luis Ramón

C.I. 131666118-8

Estudiante



Ing. Zambrano Vera Folke

C.I. 1311666537

Docente Tutor

DEDICATORIA

Con todo el amor que puedo sentir, a mi Madre y a mi Padre, a mis Abuelos por ser mi primer guía en este mundo, con todos mis errores, siempre estuvieron ahí conmigo.

Cadena Cruz Pedro Fernando

Este logro se lo dedico a mis padres por ser mis guías, los pilares más importantes en mi vida, por su esfuerzo constante y por todo el apoyo incondicional que siempre me han brindado sin importar nada, gracias a ellos soy lo que soy hoy en día y este triunfo es por ustedes y para ustedes.

Menéndez Cedeño Luis Ramón

Agradecimientos

Llegar a esta meta no fue un logro individual, sino el resultado del esfuerzo y amor de quienes caminaron a mi lado.

Mi familia, mi mayor fortaleza. Este fue un verdadero proyecto en conjunto, un logro de todos. Gracias por su apoyo incondicional y por no dejarme decaer nunca.

A mi tutor, el Ing. Folke Zambrano Vera, gracias por su inagotable paciencia, su valiosa guía y por compartir sus enseñanzas con tanta vocación para hacer de este trabajo una realidad.

Al amor de mi vida, mi paz en el caos, mi compañera y apoyo moral. Gracias por tu paciencia infinita, por cada palabra de aliento y por iluminar los días más pesados de esta etapa.

Sin ustedes, esto jamás habría sido posible.

¡Infinitas gracias a todos!

Cadena Cruz Pedro Fernando

Agradezco especialmente a Dios y a mi familia, por ser mis fuerzas y mi guía y permitirme cumplir una meta más de mi vida. También a mis amistades más cercanas por brindarme su amor y su apoyo condicional y hacer de mí una persona con buenos valores.

Agradezco también a mi tutor y docentes que han sido una parte importante de este largo y duro camino estudiantil, por sus enseñanzas y charlas motivacionales que me impulsaron a seguir avanzando y me ayudaron a poder cumplir esta meta.

Menéndez Cedeño Luis Ramón

RESUMEN

El presente trabajo de titulación presenta el diseño y construcción de un túnel de cavitación para ensayos de hélices marinas en aguas abiertas, con un enfoque cuantitativo y desarrollo técnico investigativo, analítico y experimental, dirigido como herramienta didáctica para los estudiantes de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, dentro de este proyecto de tesis se involucraron procesos diseño asistido por computadora, manufactura en Metalmecánica, precisos, técnicos y empíricos; ensayos de Dinámica computacional en ANSYS Fluent y Estructural para calcular la potencia requerida para energizar las Hélices de prueba del Túnel de Cavitación y validar la resistencia mecánica en los ejes de propulsión, se construye elementos mecánicos similares a sistemas propulsor de embarcaciones intraborda típicas, cada elemento fue diseñado para su fácil mantenimiento preventivo y correctivo. Mismos mantenimientos que fortalecerán conocimientos prácticos y teóricos impartidos en la carrera de Ingeniería Marítima. Los modelos de prueba presentados fueron diseñados y fabricados como un ejemplar de las hélices tornillo promedio de la serie B de Wageningen con fines de estudios de la cavitación presente en ellas. Se hizo estudios CFD de las hélices, previo a la construcción de la maquina con el fin de demostrar su importancia no solo visual de la cavitación, sino también para calcular rendimientos propulsivos de todas las Hélices Marinas, en diferentes configuraciones de propulsor en aguas abiertas, tales como Hélices totalmente bajo carena, Hélices de Superficies y Supercavitantes.

Palabras clave: Cavitación, intraborda, Wageningen, CAD, metalmecánica, Núcleo, CFD, relación de avance, Supercavitantes.

ABSTRACT

This degree project presents the design and construction of a cavitation tunnel for open-water testing of marine propellers. The study follows a quantitative approach with an experimental technical development and is intended to serve as a teaching tool for students of the Maritime Engineering program at Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. The thesis project involved computer-aided design processes, precision metalworking and manufacturing procedures, as well as technical and empirical methods. Computational fluid dynamics simulations were conducted using ANSYS Fluent, together with structural analyses, to determine the power required to drive the cavitation tunnel's test propellers and to validate the mechanical strength of the propulsion shafts. Mechanical components resembling the propulsion systems commonly used in inboard-powered vessels were manufactured. Each component was designed to facilitate preventive and corrective maintenance. These maintenance activities will contribute to strengthening the practical and theoretical knowledge acquired by students throughout the Maritime Engineering program. The test models were designed and manufactured as representative specimens of conventional screw propellers from the Wageningen B-series, for the purpose of studying the cavitation phenomena occurring on their blades. Prior to the construction of the equipment, CFD analyses of the propellers were performed to demonstrate that the cavitation tunnel is relevant not only for the visual observation of cavitation, but also for calculating the propulsive performance of different types of marine propellers under various open-water operating configurations, including fully submerged propellers, surface-piercing propellers, and supercavitating propellers.

Keywords: Cavitation, inboard propulsion, Wageningen, CAD, metalworking, hub, CFD, advance ratio, supercavitating propeller.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VII
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	2
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1 CAPÍTULO I: MARCO TEORICO	5
1.1 Cavitación.....	5
1.1.1 Presión de Vapor	5
1.1.2 Eventos favorables para la cavitación.....	6
1.1.3 Ventajas y desventajas de la cavitación	7
1.2 Casos de consecuencias de cavitacion registrados en el ambito maritimo.	8
1.3 Túnel de cavitación	12
1.3.1 Funciones del túnel de Cavitación	14
1.3.2 Recorrido hidrodinámico del túnel de cavitación	15
1.3.3 Patrón de Cavidades en Hélices Marinas.....	17
1.4 Ecuaciones para rendimiento propulsivo de la Hélice en Túneles de Cavitación.....	22

1.5	Características de la propela marina en su rendimiento	25
1.5.1	Diámetro (D)	25
1.5.2	Relación paso diametral (P/D)	26
1.5.3	Coeficiente de área del disco (BAR-EAR)	27
1.5.4	Número de palas (Blades)	27
1.5.5	Caída de la pala (Rake)	28
1.5.6	Angulo de inclinación la pala (Skew)	29
2	CAPÍTULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUNEL DE CAVITACION.....	32
2.1	INTRODUCCION	32
2.2	Análisis de factibilidad del diseño	32
2.3	Requerimientos del Túnel de Cavitación:	33
2.3.1	Escala del prototipo.....	34
2.4	Elección de Materiales De Construcción.	36
2.4.1	Tubería de acero al carbono negro NPS 8, DN 200, cédula 40.	37
2.4.2	Barras de acero Inoxidable AISI 304	38
2.4.3	Bocín Marino Jhonson Cutless Duramax	39
2.4.4	Motor Trifásico 2 HP Norma NEMA.	40
2.4.5	Lista general de materiales varios.	43
2.5	Calculos estructurales previo al diseño	45
2.5.1	Diámetros mínimos en líneas de ejes propulsores.	45

2.5.2	Diámetros mínimos de los pernos usados en las bridas de los acoplamientos.	46
2.5.3	Calculo del espesor minimo de la bocina.	47
2.5.4	Chaveteros de eje propulsor.	47
2.5.5	Calculos estructural de Helices Marinas.	49
2.6	Dimensionamiento del TDC con la ayuda de Solidworks.	50
2.7	Generación de las hélices de prueba.	52
2.8	Procedimientos de mecanización.	56
2.8.1	Estimación de Velocidades de corte seguras para buriles, fresas y brocas.	56
2.8.2	Consideraciones del taller mecánico industrial artesanal.	59
2.8.3	Consideraciones en Maquina Limadora Industrial	59
2.8.4	Consideraciones en roscados.	61
2.8.5	Cálculo de los regímenes de corte en torno, fresadora y cepillo.	63
2.8.6	Tabla de procesos de las piezas mecánicas más rigurosas.	66
2.9	Procedimientos de Corte y Soldadura	77
2.9.1	Experiencias en el proceso de soldadura.	77
2.9.2	Experiencias en el proceso de corte	82
3	CAPÍTULO III: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	84
3.1	Resultados de rendimiento propulsivo presentes en el Túnel Cavitación basados en la Teoría de la Hélice Marina.	84
3.1.1	Establecimiento de practica ejemplar para el Túnel de Cavitación.	86

3.2	Túnel de Cavitación funcional y didáctico.....	97
CONCLUSIONES		98
RECOMENDACIONES.....		99
Bibliografía		101
ANEXOS.		107

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de fases del agua.....	6
Figura 2	Daños causados por cavitación laminar en borde de ataque.....	9
Figura 3	Daños causados en helices de motores fuera de borda.	9
Figura 4	Daños a largo plazo causados por cavitacion en el borde de punta.	10
Figura 5	Situacion favorable a cavitación por Biofouling en propelas marinas.	10
Figura 6	Hélice de superficie supercavitante.	11
Figura 7	Ondas de sonido generadas en el océano.....	12
Figura 8	Túnel de Cavitación convencional.....	14
Figura 9	Túnel de cavitación El Elefante de Plata	15
Figura 10	Cavitación laminar parcial	18
Figura 11	Cavidades típicas de la propela marina.....	19
Figura 12	Mitigación de la cavitación de raíz con rugosidad superficial.....	20
Figura 13	Supercavitacion desarrollada	21

Figura 14	Cavitación en cara de presión	21
Figura 15	Curvas de rendimiento típicas en propelas.	24
Figura 16	Paso y deslizamiento de la Hélice.....	26
Figura 17	Comparaciones de eficiencia en hélices de diferentes palas.....	28
Figura 18	Caída de la pala	29
Figura 19	Diferencias entre hélice radialmente simétrica y con sesgo.	30
Figura 20	Zona de visualización de Túnel de Cavitación MARIN.	35
Figura 21	Especificaciones técnicas de tubo acero	37
Figura 22	Especificaciones técnicas de Bocín Marino.....	40
Figura 23	Dimensiones de Motor Nema 143T.	41
Figura 24	Diagrama ilustrado de la conexión de un motor controlado por un VFD.....	42
Figura 25	Composición electrónica de un VFD clásico.....	42
Figura 26	Características del motor NEMA 143T Trifásico	43
Figura 27	Operaciones de diseño en Solidworks.	52
Figura 28	Transición de diseño CAD a impresión 3D por resina ABS.....	54
Figura 29	Proceso de fundición de hélices Wageningen B series.	55
Figura 30	Proceso final de rectificado en torno y pintura de hélices de aluminio.	56
Figura 31	Rangos de V_C disponibles en el taller.	59
Figura 32	Captura de video de Limadora realizando chavetero interno	61
Figura 33	Diseño de Sistema propulsor de Túnel de Cavitación.	66

Figura 34	Experiencias de alineaciones y acabados en máquinas y herramientas.	69
Figura 35	Proceso de mecanizado para la obtención del sistema propulsor TDC.	72
Figura 36	Construcción y obtención de los productos terminados del sistema propulsor del TDC.	76
Figura 37	Diseño y construcción de zona de visualización de Tunel de Cavitación.....	76
Figura 38	Procedimientos de Soldadura.....	78
Figura 39	Comportamiento térmico visual del charco de soldadura practico.	79
Figura 40	Procesos de corte del acero con oxígeno y gas.	82
Figura 41	Medición de la cuerda de la hélice a escala en 70% de su radio.	86
Figura 42	Rendimiento propulsivo de Wageningen B.3-65	93
Figura 43	Rendimiento propulsivo de Wageningen B.4-70	94
Figura 44	Resultados finales del diseño y construcción del TDC.....	98
Figura 45	Prestaciones novedosas de Bocines Jonhson Cutless	109
Figura 46	Esquema de plantilla para generar cortes inglete a 90°	110
Figura 47	Trazado de plantilla para codos de 90°	110
Figura 48	Unión ingletes realizados con la plantilla de Frankland.	111
Figura 49	Pruebas de rendimiento CFD de hélices Wageningen.	113
Figura 50	Velocidad media del fluido del túnel en regímenes de operación normal.	114

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ventajas y desventajas de la cavitación	8
Tabla 2	Limitante real de diámetro de helice.	25
Tabla 3	Pasos para un proyecto tecnico.....	32
Tabla 4	Matriz de decision de diseño.	33
Tabla 5	Desempeño del Túnel de Cavitación.	33
Tabla 6	Area Transversal de zona de pruebas.	36
Tabla 7	Propiedades mecanicas aceros inoxidable.	38
Tabla 8	Recomendaciones de mecanizado Acero AISI 304	39
Tabla 9	Inversion en materia prima de materiales varios.	44
Tabla 10	Especificaciones de pernos SAE acerados.....	46
Tabla 11	Dimensiones de las chavetas según rango de diámetros de ejes.....	48
Tabla 12	Ley de espesores para la helice de 4 palas	49
Tabla 13	Espesores minimos para helice de 3 palas	49
Tabla 14	Diseño conceptual del Tunel de Cavitacion.....	50
Tabla 15	Interfaz online de Generador de helices Wageningen B-series.....	53
Tabla 16	Recomendaciones para insertos de carburo.	57
Tabla 17	Herramientas de corte disponibles en el taller.	58
Tabla 18	Rendimientos recomendados en brocas HSS.....	58
Tabla 19	V_C de roscados recomendadas por la normativa DIN 336	62

Tabla 20	Agujeros recomendados para roscas metricas.	62
Tabla 21	Velocidades angulares del torno seguras calculadas según las herramientas usadas, diametros máximos de piezas de trabajo y RPM del torno.....	65
Tabla 22	Hoja de proceso de Acople Rigido de Bidas para ejes propulsores.....	67
Tabla 23	Tabla de procesos de mecanizado de Eje Propulsor.....	70
Tabla 24	Hoja de procesos de sellos piloto de prensa estopa.	73
Tabla 25	Requerimientos tipicos en mecanizados de post fundición de Helices.....	75
Tabla 26	Requerimientos de soldadura.....	77
Tabla 27	Especificaciones de soldadura celulósica E6011	80
Tabla 28	Especificaciones soldadura E6013.....	81
Tabla 29	Especificaciones soldadura E7018.....	81
Tabla 30	Calibracion usada en los manometros de Oxigeno y gas.....	82
Tabla 31	Datos de las helices de pruebas.....	84
Tabla 32	Series polinómicas de la serie B Wageningen.	88
Tabla 33	Obtencion de los coeficientes K_T , K_Q de la helice Wageningen B.3-65	89
Tabla 34	Sumatoria para la obtencion de los coeficientes K_T , K_Q de la helice Wageningen B.4-70.	91
Tabla 35	Rendimiento propulsivo de Helice Wageningen B.3-65.....	92
Tabla 36	Rendimiento propulsivo de Wageningen B.4-70	93
Tabla 37	Resultados teóricos de auditoria energetica de Helice Wageningen B.3-65	95

Tabla 38	Resultados teóricos de auditoria energetica de Helice Wageningen B.4-70	96
Tabla 39	Temperaturas de precalentamiento.	112

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la Cavitación en Hélices Marinas lleva acompañándonos más de un siglo sin ser resuelto a pesar de avances tecnológicos, para entenderla debemos saber que se produce cuando las palas de la hélice giran a altas velocidades, creando una diferencia de presión o fuerza sustentadora como las palas de un avión, En la superficie trasera de la hélice cae tanto la presión que el agua en ese punto se acerca tanto a la presión de vaporización del agua incluso manteniendo una temperatura constante isotérmica de 20 grados; Este vapor de agua si no se controla cuando alcanza zonas de alta presión colapsa y se condensa violentamente implosionando en zonas de presión normal del fluido, generando picaduras, erosiones y fallos estructurales de la hélice. Mas sin embargo el problema no solo radica aquí, se tiene indicios de que también ha llevado alterando los ecosistemas marinos por tanto tiempo. Aproximadamente “50.000 buques mercantes operan continuamente en los océanos del planeta y todos ellos emiten un ruido persistente de baja frecuencia que se propaga durante kilómetros bajo el agua, se acota que la cavitación es energía mecánica desperdiciada” (De Luis, 2026). Muchas instituciones y centros de investigación han tratado de mitigarla, como La Conferencia Internacional de Tanques de Remolque que “es una asociación voluntaria de organizaciones mundiales que tienen la responsabilidad de predecir el rendimiento hidrodinámico de los buques y las instalaciones marinas sobre la base de los resultados de los experimentos físicos y numéricos” (ITTC, 2026), también se cuenta con proyectos como el MinKav de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Kiel en Alemania que su visión es erradicar por completo la Cavitación mediante el diseño de Hélices silenciosas y anticavitación, el proyecto fue empezado a principios de este año y aún está en curso (De Luis, 2026). En esta Tesis se encontrará con el proceso descriptivo de la

construcción de una maquina dedicada para fines investigativos didácticos y académicos de la Cavitación. que permita más de cerca conocer este fenómeno.

ANTECEDENTES

La cavitación en hélices marinas representa una problemática relevante desde sus primeros diseños hasta la actualidad, debido a que afectan el rendimiento y vida útil de la embarcación. En la actualidad se ha descubierto que no solo ha afectado a las tecnologías Navales, sino que ha sido una problemática ambiental marina debido a que “altera a la vida en el mar, por la contaminación acústica que produce, la solución simple a este problema que se ha dado es simplemente disminuir la velocidad, haciendo viajes más largos y costosos para las navieras” (Quesada , 2026).

A nivel costero nacional, esta problemática adquiere valor por su desconocimiento y la presencia de embarcaciones pesqueras e incluso militares que a menudo operan bajo regímenes exigentes propensas a cavitación con desconocimiento del caso. Se sabe también que Ecuador es un país amigable con la naturaleza y amante a la vida; lo menos que se desea es afectar nuestra fauna y ecosistemas marinos con este fenómeno. En embarcaciones militares, hacer difícil su detección en sistemas enemigos por este sonido producido por este suceso.

A nivel mundial, los túneles de cavitación por más de un siglo han sido utilizados como laboratorios Hidrodinámicos para predecir el rendimiento de hélices marinas bajo condiciones de operación en sus etapas primeras etapas de diseño, evitando altos costos de fabricación en el caso de una hélice mal diseñada y simulada, grandes ejemplares de estos son:

- CEHIPAR (Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo).
- (MARIN) Instituto Holandés de Investigación Marítima.
- INSEAN (The Italian Ship Model Basin).

- HSVA (Canal de Hamburgo).
- Canal de Experiencias de Arquitectura naval.
- Le Bassin d'essais des carènes.
- Canal de ensayos hidrodinámicos de Viena.
- Canal de Ensayos Hidrodinámicos de Postdam.
- China Ship Scientific Research Center.
- Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la ETSIN. (ASOCIACIÓN DE INGENIEROS NAVALES Y OCEÁNICOS DE ESPAÑA, 2013)

Los mencionados anteriormente forman parte del ITTC, así como toda institución que se encargue de simular el comportamiento de elementos embarcaciones en regímenes de operación.

En este proyecto se intentó dar un pequeño paso a este tipo de experiencias hidrodinámicas valiosas.

JUSTIFICACIÓN

Una de las motivaciones principales del proyecto surge de la dificultad de determinar de manera sencilla y precisa el rendimiento de una hélice bajo distintas dinámicas de operación. Aunque existan ecuaciones dedicadas a coeficientes hidrodinámicos; estas dependen de procesos experimentales y simulaciones CFD para determinar sus resultados.

Al ser la cavitación de Hélices Marinas un tema poco conocido y estudiado, en nuestro país, el túnel de cavitación propuesto se concibe como el primer paso hacia una calculadora experimental, un canal de experiencias hidrodinámicas de hélices marinas para nuestra Universidad, capaz de convertir el comportamiento físico del propulsor en datos medibles, observables y comparables a la realidad. Al ensayar hélices a escala que conserven sus principales características de diseño, se obtienen coeficientes de rendimiento y patrones de

cavitación intrínsecas en ellas, que ayudan a predecir el comportamiento de real de la hélice a diferentes escalas.

Esto convierte al Túnel de cavitación en el primer paso hacia estudios y canales de experiencias hidrodinámicas para la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un túnel hidrodinámico de cavitación para visualizar la cavitación y evaluar el rendimiento propulsivo de hélices marinas a escala.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un Túnel de Cavitación con criterio de diseño de factibilidad, calidad y precio, considerando que cada elemento pueda conseguirse en el mercado ecuatoriano de manera accesible y económica.
- Fabricar la maquina Hidrodinámica con técnicas de Mecánica Industrial puras en la producción, con el fin de dar el primer paso hacia un canal de experiencias Hidrodinámicas de aguas abiertas para la carrera de Ingeniería Marítima en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.
- Establecer la importancia del uso de esta maquinaria en el diseño de Hélices Marinas, mediante investigación de datos, estudios experimentales y CFD, basados en los métodos estipulados por el “ITTC”, organización que rige estos análisis.

1 CAPÍTULO I: MARCO TEORICO

1.1 Cavitación

La Cavitación es un fenómeno físico presente en nuestro ecosistema y se manifiesta de muchas formas, en el transporte Naval ecuatoriano es desconocida, evitada y buscada a la vez.

Franc y Michel (2005) establecen su definición como:

La aparición de cavidades de vapor en el interior de un medio líquido inicialmente homogéneo, a la vez que depende mucho de las propiedades físicas del líquido.

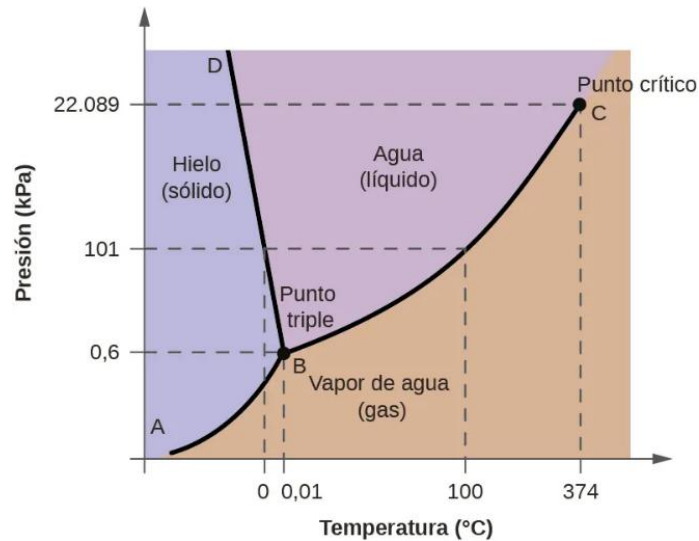
También se define como la ruptura de un medio líquido sometido a presiones muy bajas. Lo cual deja de garantizarse la cohesión del líquido. Esta presente tanto en líquidos en reposo como en líquidos en movimiento. (p. 1)

Este fenómeno muy conocido por ser el terror de los propulsores marinos, ya que acortan su vida útil, erosionando las palas de las hélices y así mismo buscado en otros sistemas para reducir la resistencia en el agua.

1.1.1 *Presión de Vapor*

Considerada una de las propiedades Termodinámicas más importantes involucradas en la Cavitación. El diagrama de fases del agua establece muy bien su comportamiento, dado que separa las regiones líquidas y de vapor. Las transformaciones reversibles como la evaporación y condensación se describen cruzando la curva a una determinada presión de vapor que su vez es función de la temperatura.

Esto explica porque la cavitación en un líquido puede producirse mediante la disminución de la presión a una temperatura constante, se suele confundir con la ebullición con la diferencia que esta última la provoca la variación de temperatura. (Franc y Michel, 2005, p. 2)

Figura 1*Diagrama de fases del agua*

Nota. Grafica sacada de *Química 2ed*, de Flowers et al., 2022, OpenStax. CC BY 4.0.

1.1.2 Eventos favorables para la cavitación

- Reducciones de presión de un flujo cuando existe reducciones del área de sección transversal de una tubería por donde circula el líquido, tales como toberas Venturi, curvaturas pronunciadas en codos de tuberías y caras superiores de palas de hélices y bombas.
- En flujos de cizallamiento debido a grandes fluctuaciones turbulentas de presión, tales como chorros, estelas y manifestaciones similares.
- La naturaleza no estacionaria de ciertos flujos tales como, golpes de ariete en recorridos hidráulicos de control, conductos de centrales hidroeléctricas, líneas de alimentación de combustible para motores Diesel cuando se acelera el fluido da lugar a puntos de baja presión, dando lugar a la cavitación.

- Rugosidad superficial local en las paredes, como la presente en las superficies de concreto de aliviaderos de las represas, bioincrustaciones en la hélice por conchillas (biofouling roughness); estas terminan produciendo estelas locales en las que se desarrollan cavidades adheridas.
- Movimientos vibratorios de las paredes como en los sistemas de refrigeración líquida de motores Diesel, se generan campos de presión oscilantes que se adhieren a un campo de presión uniforme ya existente, de manera analítica, la oscilación de la cavitación probablemente aparezca en la fase negativa de la oscilación uniforme.
- Cuerpos sólidos que son acelerados súbitamente por un impacto dentro de un líquido en reposo, más críticos cuando tienen bordes afilados. La aceleración que experimenta el líquido para rodear los bordes provoca presiones bajas (Franc y Michel, 2005, p. 5).

1.1.3 Ventajas y desventajas de la cavitación

La cavitación resulta un fenómeno desconocido y evitado como mencionamos anteriormente debido a los colapsos violentos que produce cuando esta ingresa en zonas de alta presión y se condensa. Franc y Michel (2005) la comparan analógicamente con “las holguras mecánicas, cuando los mecanismos chocan abruptamente cuando estas desaparecen. más sin embargo en ciertos sistemas pueden permitirse cierto grado de cavitación desarrollada, solo cuando es manejada bajo control. (Franc y Michel, 2005, p. 6)

Tabla 1*Ventajas y desventajas de la cavitación*

Ventajas	Desventajas
• “Limpieza de superficies con chorros cavitantes o ultrasonido.”^a • “Dispersión de partículas en un medio líquido.”^a • “Limitación del caudal en flujos limitados debido al desarrollo de supercavidades.”^a • “Dispositivos supercavitantes ranurados presentan una notoria elevación de la máxima eficiencia en velocidades angulares y lineales mayores que la del diseño, reduciendo el arrastre viscoso.”^b	• “Reducción de sustentación y aumento de resistencia en perfiles hidrodinámicos, a la vez que esto produce pérdidas de energía y eficiencia en turbomáquinas.”^a • “Fuerzas no deseadas en estructuras solidas.”^a • “Generación de ruido y vibraciones.”^a • “Erosión de las paredes en cavitación desarrollada, cuando la diferencia de velocidad entre el líquido y la pared solida es elevada.”^a

Nota. Tabla desarrollada a partir de los datos de ^aFranc y Michel (2005, p. 6). ^bOsorio et al. (2007, pp. 7-15)

1.2 Casos de consecuencias de cavitacion registrados en el ambito maritimo.

A continuación, se establece casos típicos de las consecuencias de la cavitación a largo y a corto plazo de hélices marinas.

Figura 2

Daños causados por cavitación laminar en borde de ataque.



Nota. Cavitación laminar en el inicio del borde de ataque de una hélice con tobera y hélice de sistema propulsor Schottel Azimutal. Una de las cavidades más típicas en este tipo de propulsores de maniobras y presentes en embarcaciones tipo remolcador. Adaptado de *DAÑOS CAUSADOS POR CAVITACIÓN*, por ^aBELZONA (2008); ^bCaptain propeller (2025), <https://captainpropeller.com/es/blog/propeller-cavitation-solutions/>. CC BY 2.0.

Figura 3

Daños causados en hélices de motores fuera de borda.



Nota. Debido a las maniobras de pesca y navegación rápidas, operación en calados cortos, ventilación y desconocimiento de navegación por parte de sus propietarios; estas hélices suelen sufrir daños de cavitación contundente a corto plazo. Lleva el mismo patrón de daño causado por la cavitación en la punta de la pala. Adaptado de *Efectos producidos por la*

cavitación, por Navegación Costera, 2012, <https://navegacioncostera.blogspot.com/2012/03/la-cavitacion.html>. CC BY 2.0.

Figura 4

Daños a largo plazo causados por cavitacion en el borde de punta.



Nota. Si bien la cavitación mencionada no fue la causante de las fracturas directamente, si influyó mucho en la debilitación del material en las puntas de las palas ocasionando esta erosión a largo plazo. Adaptado de *Efectos producidos por la cavitación*, por ^aNavegación Costera (2012); ^bMAUCOUR-FRANCE (2026), <https://navegacioncostera.blogspot.com/2012/03/la-cavitacion.html>; <https://www.maucour.fr/en/propellers-repairing-service-en>. CC BY 2.0.

Figura 5

Situacion favorable a cavitación por Biofouling en propelas marinas.



Nota. “El propietario de este yate solo podía alcanzar una velocidad de un nudo navegando a toda máquina” agregó Beeson (2016). Adaptado de *Hélices con biofouling*, por ^aBeeson, 2016; ^bFondear, 2010, <https://www.yachtingmonthly.com/sailing-skills/difference-fouling-make-54330>; https://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores_Helices/Helices_Reparar/Helices_Reparar.asp. Todos los derechos reservados.

Figura 6

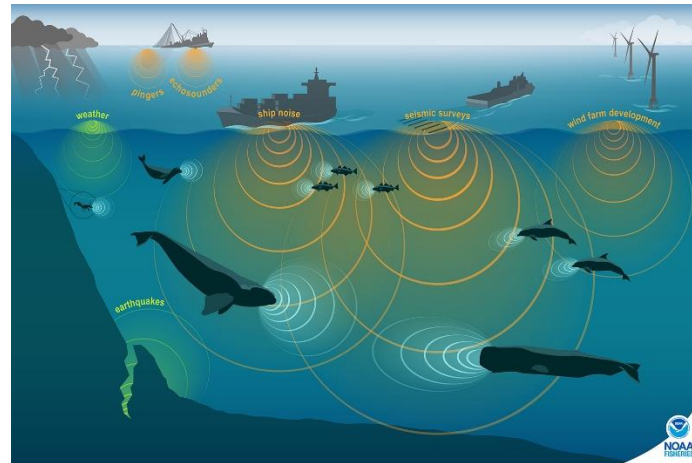
Hélice de superficie supercavitante.



Nota. Hélice de superficie, su eficiencia es notoria en regímenes de altas RPM, su borde de ataque es tan afilado que utiliza la cavitación y la ventilación a su favor para reducir drásticamente el arrastre viscoso del agua, generando menos resistencia; ideal para embarcaciones con alta potencia y velocidad. Adaptado de *Hélices de superficie*, por Yachting News, 2024, <https://www.yachtingnews.com/es/>. Todos los derechos reservados.

Figura 7

Ondas de sonido generadas en el océano.



Nota. El medio ambiente marino no es para menos importante una consecuencia aislada de la cavitación y ruido generado por la actividad marina del hombre en los mares, ha llevado alterando el comportamiento, viajes migratorios y estresando todas las actividades de las especies marinas por años, sin ser solucionada. Obtenido de *Ocean Noise*, por NOAA Fisheries, 2026, <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise>. CC BY 4.0

1.3 Túnel de cavitación

Un túnel de cavitación es

Un canal cerrado en el que el circula agua mediante un impulsor, mientras que un motor acciona la hélice modelo. Se incorporan bombas de vacío para modificar la presión interna y alcanzar condiciones de similitud de cavitación. La hélice modelo objeto de estudio y la instrumentación principal se ubican en la sección de ensayo, una parte específicamente acondicionada del túnel.

La geometría interna de un túnel de cavitación suele presentar una configuración anular, con secciones transversales cuadradas o circulares cuyas dimensiones varían a lo largo del circuito (Bocanegra et al., 2025).

Se indican los parámetros físicos y desempeño del fluido que se debe simular en un túnel de cavitación real son el Número de Froude, Número de Reynolds, Número de Weber, Coeficiente de avance, y Número de Cavitación, también se acota que en una situación de flujo real, al utilizar un modelo para representar una hélice a escala real, es imposible satisfacer simultáneamente todos estos parámetros físicos. (Carlton, 2007, p. 235)

Número de Froude, Relación entre fuerzas inerciales con gravitacionales. (Rapp, 2017)

$$Fn = \frac{V_a}{\sqrt{g * D}} \quad (1)$$

Número de Reynolds, relaciona fuerzas inerciales con fuerzas viscosas del fluido.

$$Re = \frac{\rho * V_a * D}{\nu} \quad (2)$$

Número de Weber, relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas producidas por la tensión superficial. (Rapp, 2017)

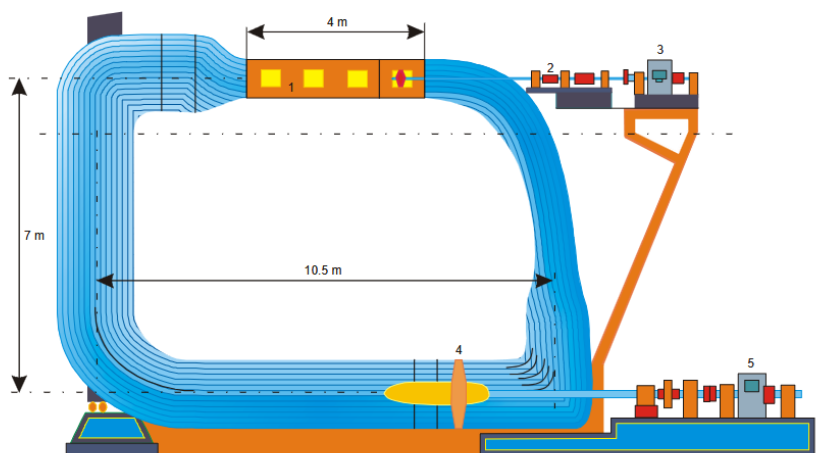
$$We = \frac{\rho V_a^2 D}{S} \quad (3)$$

Se adhiere la importancia de agregar el Número de Froude debido a su influencia al inicio de la cavitación de vortice de punto en distintas posiciones radiales. Para mejorar la simulación del campo de presión sobre el disco de la hélice; se propone utilizar un número de cavitación nominal basado en la posición 0.7R, cuando la pala se encuentra en el punto muerto superior. (Carlton, 2007, pp. 235-239)

En condiciones de operación reales de los túneles de cavitación, resulta difícil agregar este parámetro físico como el número de Froude y Weber, por eso se da esa pequeña sugerencia en los análisis de cavitación.

Figura 8

Túnel de Cavitación convencional.



Nota. Siendo: **1.** sección de ensayo; **2.** Dinamómetro de empuje y torque; **3.** Motor de hélice; **4.** Impeler de flujo axial y generador de corriente marina; **5.** Motor del impulsor. Sacado de *Large Cavitation Tunnel* [Plano], por MARIN, 2005, <https://www.marin.nl/en/about/facilities-and-tools/basins/cavitation-tunnel>.

1.3.1 Funciones del túnel de Cavitación

Toda maquinaria está diseñada para un propósito y los Túneles de Cavitación no son la excepción, por lo que las funciones actuales del Túnel De Cavitación de MARIN (2026) son las funciones estándar que estos ofrecen:

- Estudios de visualización de la cavitación, mediciones de origen de cavitación y pruebas de rendimiento propulsivo incorporando diseños de cascos por delante de la hélice para simular campos de estela reales.

- Medir fluctuaciones de presión en casco.
- Mediciones de ruido de la hélice en régimen Cavitación.
- Medir fuerzas y torques en toberas, palas, hidroalas y todo tipo de apéndices en embarcaciones.
- Estudio de rendimiento propulsivo para Hélices de alta Velocidad, tales como las hélices de Superficie Supercavitantes (p.1).

1.3.2 Recorrido hidrodinámico del túnel de cavitación

A continuación, se detalla el comportamiento hidráulico dentro de las tuberías de un túnel de cavitación promedio basándonos en el prototipo creado por la compañía ABB Zamech Marine de Eblag (Polonia) y dirigido para un centro vietnamita de investigación apodado el Elefante de Plata (Tadeusz y Agnieszka, 2006, p. 11).

Figura 9

Túnel de cavitación El Elefante de Plata



Nota. Recorrido Hidrodinámico de Túnel de Cavitación. Tomado de “El Elefante de Plata” (p. 12), por K. Tadeusz y G. Agnieszka, 2006, *Derroche de ingenio*, Revista ABB 3/2006.

- a) **Motor eléctrico:** Encargado de energizar el Túnel de cavitación, el motor promedio ofrece alta potencia y su régimen de revoluciones son 1500 hasta 1750 RPM, es acoplado flexiblemente a una caja reductora de 1;5 para elevar el momento de fuerza.
- b) **Hélice impulsora del agua:** El agua del túnel es impulsada por una hélice de paso variable, con velocidad máxima de 200 RPM, permitiendo controlar el caudal del túnel a gusto del investigador.
- c) **Primer difusor:** Después del impulsor se encuentra un reductor de tuberías invertido, que actúa como difusor y permite reducir la presión del sistema y eliminar turbulencias en el flujo.
- d) **Resorbedor con rejilla enderezadora:** Estabiliza el flujo. Su propósito es inducir un flujo limpio antes de ingresar en la zona de visualización.
- e) **Codos del túnel:** Dentro del codo se integra aletas internas, ayudan a guiar el flujo y reducir turbulencias
- f) **Concentrador o confusor:** Este reductor estabiliza las turbulencias del codo, aumenta la presión en las secciones de visualización, volviendo el flujo lo más laminar posible.
- g) **Zona de visualización:** Esta zona estará equipada con la mayor cantidad de sensores de presión y velocidad posibles, cámaras de alta velocidad, Hidrófonos, luces estroboscópicas, ventanas de material transparentes como vidrios, etc. Aquí se registran todos los resultados que el investigador quiere observar en la Cavitación de hélices.
- h) **Segundo difusor:** Disminuye la presión y velocidad antes de continuar a las siguientes partes del Túnel.

- i) **Elementos de desaireación en el codo:** Sirven como purga de aire de los gases acumulados en las pruebas de Cavitación.
- j) **Tanque de compensación:** Sirve de ayuda para controlar los parámetros físicos de operación del Túnel, tales como la presión Hidrostática, sabiendo que la Cavitación depende de esta fenómeno resulta muy importante controlarlo. (Tadeusz y Agnieszka, 2006, p. 12)

1.3.3 *Patrón de Cavidades en Hélices Marinas.*

La compleja Geometría de la hélice manifiesta la cavitación en diferentes lugares de esta. Debido a sus altas velocidades angulares; sus palas generan una diferencia de presión y fuerza de sustentadora, por lo que una buena práctica de análisis de este fenómeno se realiza mediante:

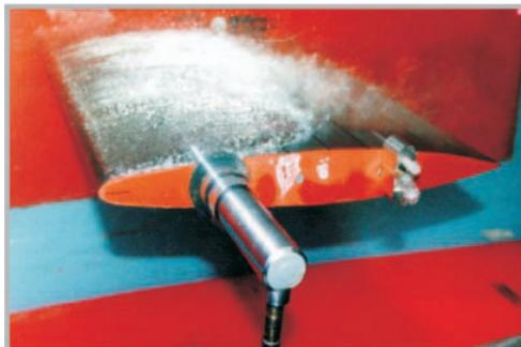
Bocetos y fotografías de los patrones de cavitación en los informes de prueba, también se utilizan términos descriptivos que contengan la ubicación, tamaño, estructura y dinámica de la cavidad, en la descripción se debe referir adecuadamente a la dinámica de la cavitación dominante, además las descripciones deben limitarse a las más comúnmente conocidas” (Alves Pereira et al., 2024, p. 3),

Todos los patrones de cavidades en hélices que históricamente se han registrado en túneles de cavitación son:

- **Cavitación de lámina:** Se inicia a lo largo del borde de ataque y se cierra sobre la superficie del perfil a lo largo de la cuerda. Normalmente es delgada, lisa, transparente y espumosa en la región de cierre. Puede volverse inestable, por ejemplo, cuando aumenta el ángulo de ataque del flujo. También puede comenzar alrededor de la sección de máximo espesor (Alves Pereira et al., 2024, p. 4).

Figura 10

Cavitación laminar parcial



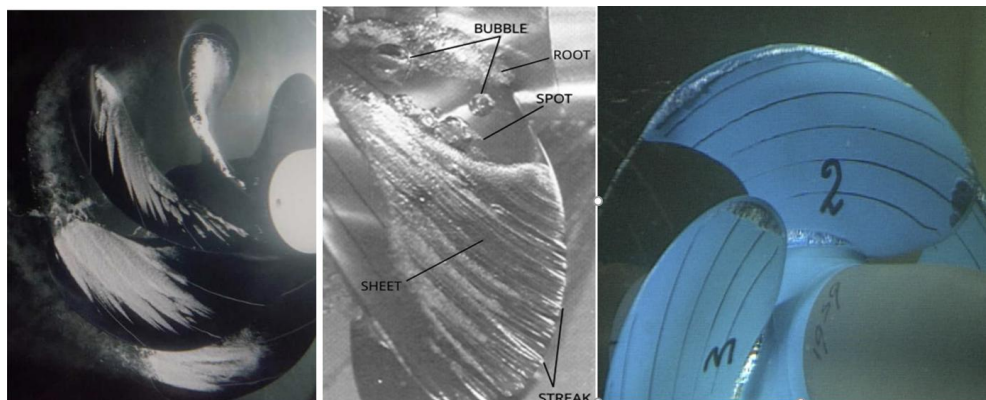
Nota. Obtenido de “Diseño de una hélice supercavitante” (p. 9), por S. Kinnas, 1996, *Ciencia & Tecnología de Buques*, 1 (1).

- **Cavitación de nube:** Generalmente se desarrolla a partir de la ruptura de una cavitación de lámina inestable. Se reconoce por la formación de bolsas de vapor con apariencia de nube, que son liberadas en la estela de la cavidad tipo lámina.
- **Cavitación de estría:** Es una forma especial de cavitación de burbuja, estrecha y alargada. Por lo general, se forma en puntos aislados de rugosidad y otras imperfecciones en la superficie de la pala o en el borde de ataque.
- **Cavitación de burbuja:** La cavitación de burbuja grande suele aparecer de forma aislada y desplazarse a lo largo del lado de succión, también llamado dorso del perfil.

La cavitación de burbujas pequeñas es indicativa de hélices cuyas secciones de pala presentan una distribución suave del coeficiente de presión, es decir, sin un pico de succión pronunciado (Alves Pereira et al., 2024, p. 4).

Figura 11

Cavidades típicas de la propela marina.



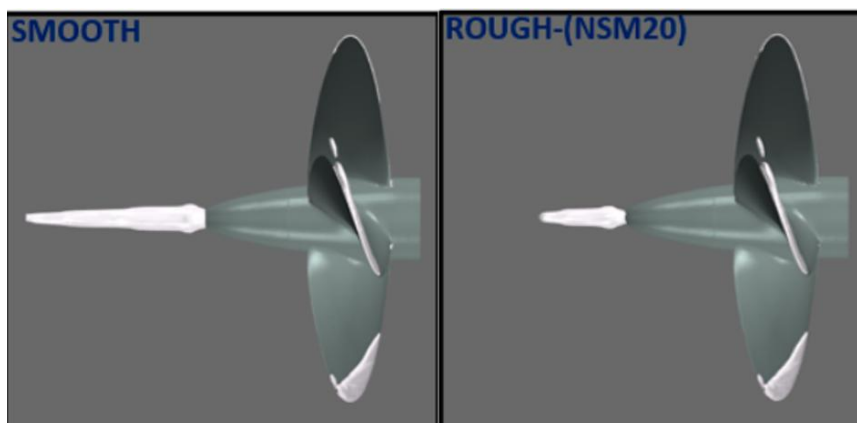
Nota. Figura 5.a. “Cavitación de burbujas pequeñas y estrías.”; Figura 5.b. “Cavitación del borde de ataque, cavitación en estrías, cavitación de burbujas grandes y cavitación de raíz.”; Figura 5.c. “Vórtice adherido del borde de ataque, vórtice de punta, cavitación de lámina en el borde de ataque y cavitación de raíz.” Adaptado de *Cavitation Events*, de Alves Pereira et al., 2024, ITTC. Todos los derechos reservados.

- **La cavitación de vórtice en el borde de ataque:** Ocurre a lo largo de dicho borde, generalmente bajo condiciones de sobrecarga.
- **La cavitación de vórtice de punta adherida:** Aparece muy cerca de la punta de la pala, a menudo unida a ella; puede ser intermitente en su inicio y estable cuando se desarrolla.
- **La cavitación de vórtice de punta desprendida:** Se inicia aguas abajo de la punta de la pala; puede ser estable o presentar estallidos.
- **La cavitación de vórtice libre entre hélice y casco:** Se extiende desde el casco hasta el disco de la hélice, bajo condiciones de baja velocidad y alta carga, por ejemplo, con coeficientes de avance muy bajos (Alves Pereira et al., 2024, p. 4).
- **Cavitación de raíz:** “Es una cavitación tridimensional y espesa que ocurre en la raíz de la pala. Se observa comúnmente en hélices de paso controlable, conocidas como CPP”

(Alves Pereira et al., 2024, p. 4). Por otro lado, existen investigaciones donde estas cavidades pueden reducirse mediante la incorporación de rugosidad superficial en el núcleo raíz de la hélice, mitigando hasta un 50% del vórtice generado con hélices de superficies lisas (Sezen & Atlar, 2022).

Figura 12

Mitigación de la cavitación de raíz con rugosidad superficial



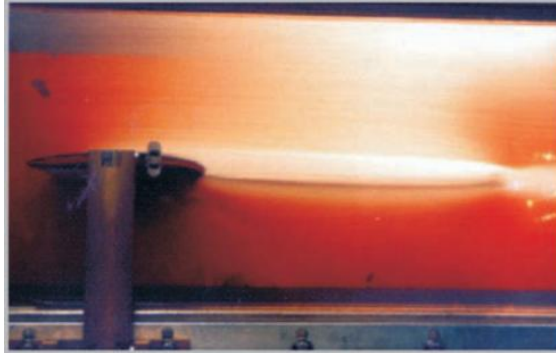
Nota. Adaptado de “Mitigation of Hub Vortex Cavitation with Application of Roughness.” (p. 13), por Sezen y Atlar, 2022, *J. Mar. Sci. Eng.*, 10 (10).

- **Supercavitación:** “Se presenta cuando “la cavitación laminar crece de tal manera que envuelve todo el cuerpo sólido” (Osorio et al., 2007, p. 9), la región de cierre de la cavidad se cierra aguas abajo pasando el borde de salida de la hélice.

Este fenómeno “es deseable ya que reduce el arrastre viscoso bajo el agua, operando a altas velocidades. Para fortalecerlo se puede usar ventilación” (Senocak, 2002, como se citó en Osorio et al., 2007). Un método para que la supercavitación sea estable en el perfil hidrodinámico se adhieren “cavitadores ranurados en forma de V a lo largo de la pala de la hélice” (Kudo et al., 2001, como se citó en Osorio et al., 2007).

Figura 13

Supercavitacion desarrollada



Nota. Obtenido de “Diseño de una hélice supercavitante” (p. 9), por S. Kinnas, 1996, *Ciencia & Tecnología de Buques*, 1 (1).

- **Cavitación en cara de presión:** Esta cavidad “generalmente aparece primero cerca del borde de ataque de la sección. Esta se produce debido a un ángulo de incidencia negativo en condiciones de velocidad de estela baja. Esta cavitación desaparece a medida que aumentan las revoluciones de la hélice y el deslizamiento” (Tupper, 2013, p. 188).

Figura 14

Cavitación en cara de presión



Nota. Adaptado de “Prediction of Underwater Radiated Noise from Propeller Cavitation During Concept Design” (p. 8), por Lafeber et al., 2022, *7th International Symposium of Marine Propulsors*, 17-21.

1.4 Ecuaciones para rendimiento propulsivo de la Hélice en Túneles de Cavitación

El método preferido por muchos investigadores cuando analizan el desempeño de las propelas marinas en aguas abiertas es expresar adimensionalmente el empuje y el torque utilizando como referencia la velocidad rotacional nominal de la hélice. (Hentschel, 2019, p. 16)

Las siguientes ecuaciones son las principales usadas para expresar los resultados del desempeño de una helice en aguas abiertas.

- ***Coefficiente de empuje***, cuantifica el empuje producido por la hélice en relación con su velocidad de rotación y su diámetro (Oliveira , 2025):

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

- ***Coefficiente de torque***, describe la resistencia rotacional experimentada en la hélice (Oliveira , 2025)

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (5)$$

- ***Coefficiente de avance***, “relaciona la velocidad de avance de la embarcación con la velocidad de rotación de la hélice” (Oliveira , 2025).

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (6)$$

- ***Eficiencia en aguas abiertas***, expresa la eficacia con la que la hélice transforma la potencia de suministrada por el motor en empuje útil. Un valor elevado de este valor

indica que la hélice genera empuje eficientemente, con pérdidas mínimas de energía.

(Oliveira , 2025)

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} * \frac{K_T}{K_Q} \quad (7)$$

- **Numero de Reynolds**, basado en la distancia de la cuerda de la hélice al 70% del radio, véase ecuación (). (Hentschel, 2019, p. 17)

$$Re = \frac{C_{0.7R} * \sqrt{V_A^2 + 0.7\pi n D^2}}{\nu} \quad (8)$$

- **Numero de Cavitación**, Analiza la probabilidad de que ocurra cavitación, en una zona local de la hélice. (Oliveira , 2025, p. 4)

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{0.5\rho V^2} \quad (9)$$

Siendo:

- **T**: Fuerza de empuje expresada en N.
- **ρ** : densidad del fluido expresada en kg/m³
- **n**: velocidad de rotación expresada en Hz.
- **D**: diámetro de la hélice en m.
- **Q**: el par torsional de la hélice.
- **V_A**: es la velocidad del flujo de entrada o velocidad de avance velocidad del carro de remolque.
- **ν** : viscosidad cinemática del agua
- **R**: Radio de la propela marina medido desde el centro de la hélice.
- **p_∞** : la presión en infinitos puntos locales o de la corriente libre de agua

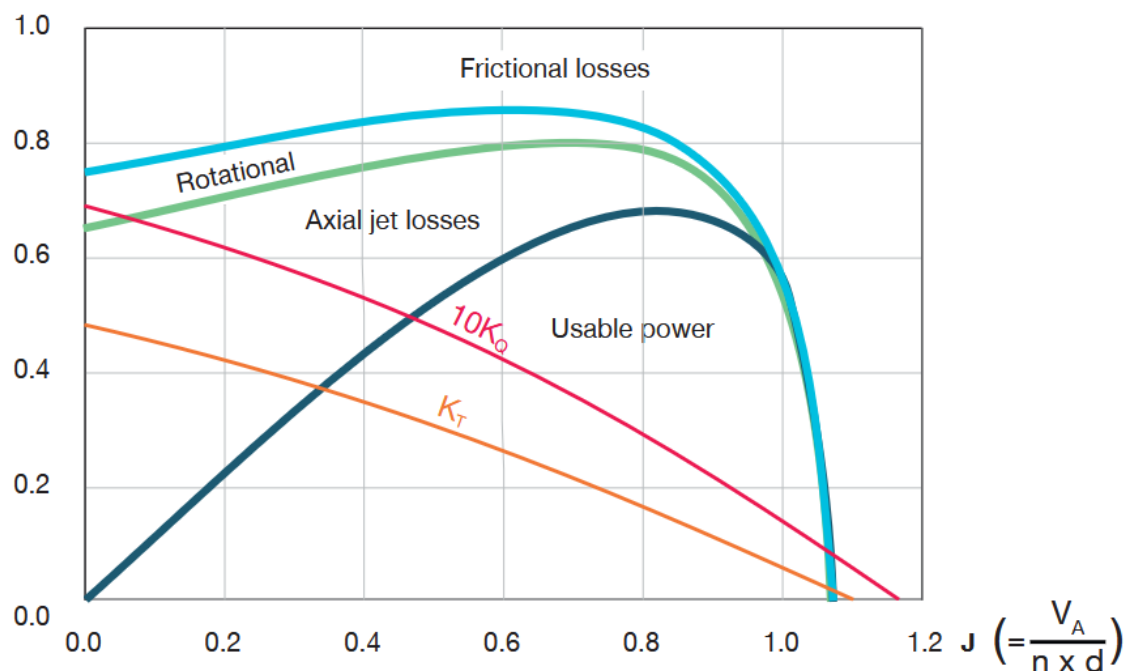
- p_v : es la presión de vapor del agua
- V : es la velocidad local del flujo.

Notas. En procedimientos de tracción de punto fijo sobre bolardo; J tiende a cero, la hélice se sobrecarga al máximo en estas pruebas y actúa como una bomba axial de alto caudal; las curvas de rendimientos en esta prueba se hacen en función del número de cavitación y el coeficiente de torque, con probabilidades más altas a cavitación en números bajos de σ y altos coeficientes de K_T . (ITTC, 2017, pp. 11-17)

Los valores de K_T , K_Q y η_o respecto a J se representan en un gráfico y se conocen en las curvas de rendimiento de la hélice en aguas abiertas. (Hentschel, 2019, p. 17)

Figura 15

Curvas de rendimiento típicas en propelas.



Nota. Los parámetros de torque y empuje son muy altos demandando mucha energía desperdiciada en J muy bajos. Adaptado de “Propeller propulsion” (p. 23), por MAN Energy solutions, 2023, *Basic principles of ship propulsion*, 1 (1).

1.5 Características de la propela marina en su rendimiento

1.5.1 Diámetro (D)

Característica que interviene mayormente en la eficiencia y reducción del consumo de combustible, cuando se diseña una embarcación con el mayor diámetro posible. Pero tiene sus limitantes; Se sabe que la hélice debe estar siempre sumergida pero muchas embarcaciones tienen calados distintos como buques graneleros y petroleros que navegan en condiciones de lastre, otra limitante que tienen, son las holguras entre las puntas de la pala y las partes inferiores del casco, ya que una hélice demasiado cerca del casco genera muchos niveles de ruido y vibración. (MAN Energy Solutions, 2023)

Tabla 2

Limitante real de diámetro de helice.

Tipo de buque	Relación diámetro de hélice y calado
Graneleros y petroleros	$d/T_d \approx 0.65$
Buques portacontenedores	$d/T_d \approx 0.75$
Buques de carga voluminosa y alta velocidad	$d/T_d \approx 0.85$

Nota. Obtenida de “Propeller propulsion” (p. 17), por MAN Energy solutions, 2023, *Basic principles of ship propulsion*, 1 (1).

Se puede observar en la Tabla (2), los coeficientes de diseño en calado versus el diámetro de la hélice, los cuales limitan el diámetro de la misma. Una hélice que excede estos límites está

condenada a cargas fluctuantes, cavitación de vórtice en la punta y vibraciones debido a las turbulencias de la estela del buque.

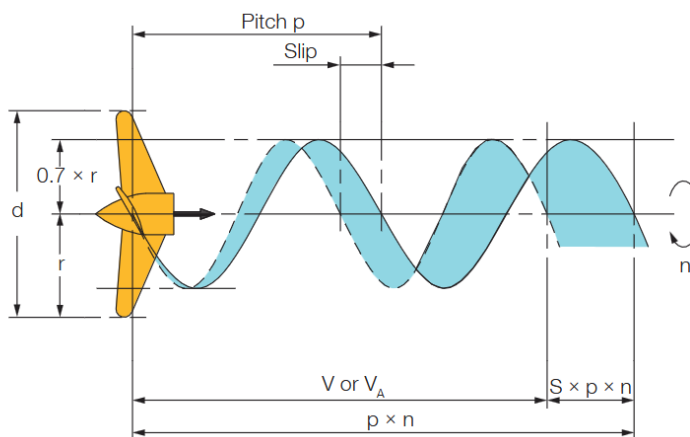
1.5.2 Relación paso diametral (P/D)

Expresa la relación entre el paso de la hélice y su diámetro, siendo el paso, la distancia teórica que la hélice avanzaría al atornillarse en el agua en una revolución, ignorando que existe deslizamientos en el agua, debido que no es un material sólido y esta termina cediendo hacia popa.

El paso no es constante a lo largo de la pala, por lo que es una constante calcular el paso de una hélice en el 70% de su radio con la expresión $0.7 \times R$, un paso optimo elegido por el diseñador depende de la RPM de diseño del motor y diámetro de la hélice. (MAN Energy Solutions, 2023)

Figura 16

Paso y deslizamiento de la Hélice.



Nota. Adaptado de “Propeller propulsion” (p. 17), por MAN Energy solutions, 2023, *Basic principles of ship propulsion*, 1 (1).

1.5.3 Coeficiente de área del disco (BAR-EAR)

Conocido también como área expandida de las palas, define el área desarrollada por la superficie de las palas de la hélice en relación con el área ocupada por todo su disco. Se recomienda un equilibrio de este coeficiente, ni tan pequeño para que produzca cavitación erosiva ni tan grande que incremente la resistencia por fricción de la hélice.

En hélices sometidas a cargas normales, es habitual encontrar valores comprendidos entre 0.40 y 0.60. En los portacontenedores de una sola hélice con cargas elevadas, este valor alcanza hasta 1.0. Para disponer del área necesaria en estos casos, debe aumentarse el número de palas. (MAN Energy Solutions, 2023)

1.5.4 Número de palas (Blades)

Las hélices pueden construirse de 2 hasta 7 palas, siendo menor el número de palas mayor será la eficiencia de la hélice, sin embargo, por motivos de resistencia estructural y vibraciones se usan hélices de 4 hasta 6 palas, siendo las de 4 más comunes, las de 3 palas están destinadas para buques de baja potencia, ejemplares de estos tenemos a los metaneros de doble hélice con cargas propulsivas reducidas.

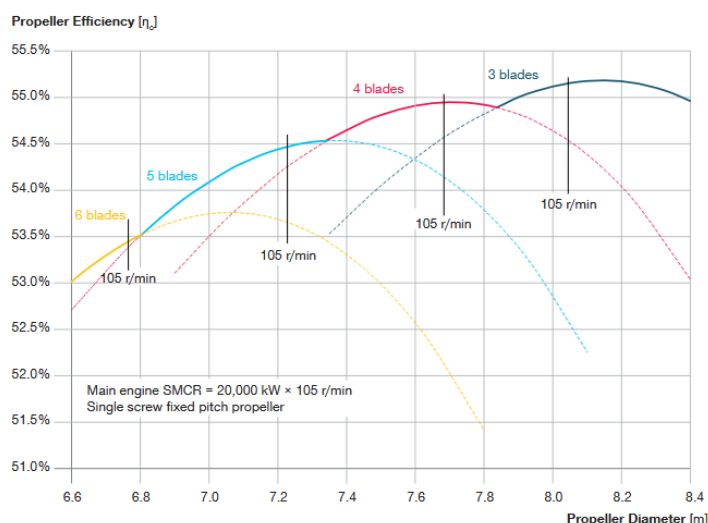
El límite inferior de palas se establece por la variación de fuerzas que actúan sobre ellas cuando atraviesan cuando atraviesan la denominada “sombra” del casco en la zona superior y el flujo menos restringido en la zona inferior. Esta fue una breve descripción del “campo de estela” de las embarcaciones. Los números mayores de palas suavizan las variaciones de carga.

La velocidad óptima también depende del número de palas, para un mismo P/D una hélice de 6 palas presenta unas RPM aproximadamente 10 % menor que una hélice de 5 palas.

Debido a las vibraciones se evitan en determinados casos hélices con ciertos números de palas, para no excitar las frecuencias naturales del casco y superestructura del buque, evitando resonancias. (MAN Energy Solutions, 2023)

Figura 17

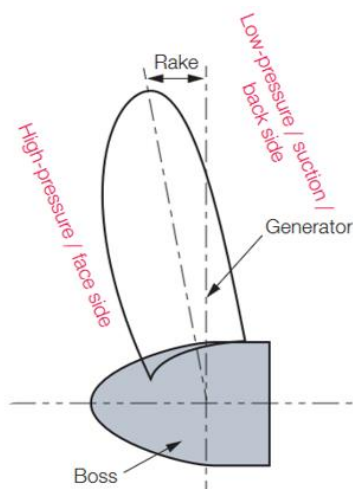
Comparaciones de eficiencia en hélices de diferentes palas.



Nota. Obsérvese las RPM se mantienen constantes; entonces, para alcanzar la condición óptima es necesario aumentar el diámetro de la hélice. De otra forma, cuando el diámetro se mantiene constante, las RPM óptimas disminuyen a medida que aumenta el número de palas de la hélice. Obtenido de “Propeller propulsion” (p. 18), por MAN Energy solutions, 2023, *Basic principles of ship propulsion*, 1 (1).

1.5.5 Caída de la pala (Rake)

En los buques mercantes convencionales, las palas suelen presentar una inclinación axial hacia popa con el fin de aumentar la separación entre el casco y la hélice, reduciendo así los pulsos de presión que actúan sobre el casco. (MAN Energy Solutions, 2023)

Figura 18*Caída de la pala*

Nota. Adaptado de “Propeller propulsion” (p. 19), por MAN Energy solutions, 2023, *Basic principles of ship propulsion*, 1 (1).

1.5.6 Angulo de inclinación la pala (Skew)

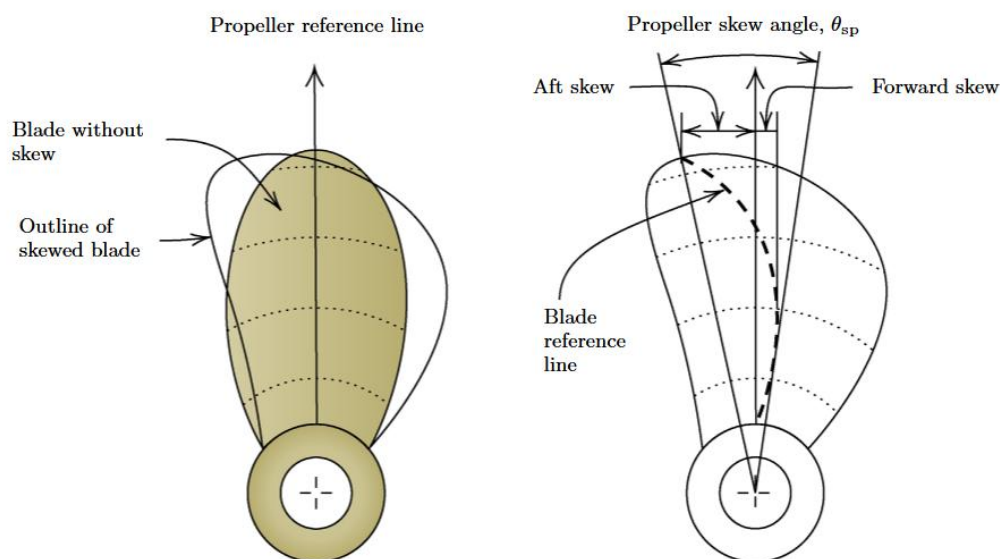
Se le puede atribuir como una de las mejores optimizaciones al diseño de hélices marinas del siglo pasado hasta la actualidad, debido a que se incorpora para mejorar el comportamiento vibratorio, ya que permite que las palas atraviesen de manera progresiva a las variaciones existentes en el campo de estela, reduciendo la cavitación, ruido y vibraciones por este fenómeno. (MAN Energy Solutions, 2023)

En trazos y dibujos mecánicos se la interpreta como la componente tangencial del ángulo formado sobre la pala de la hélice entre la línea de referencia de la hélice “el eje z” y una línea radial trazada desde el origen de la hélice, que pasa por el punto medio de la cuerda de la sección considerada, ubicada en el radio R. De manera visual se distingue como cada pala de la hélice se curva hacia atrás con respecto al sentido de la rotación, como resultado se observa un contorno asimétrico radial respecto a su línea radial. (Njaastad et al., 2022, pp. 889-893)

Fabricantes de alta gama en hélices ya incorporan este tipo de hélices denominándolas como “High Skewed propellers”, se las puede pedir con los diseños de potencia, dimensiones y tipos de sistema propulsor de la embarcación. (Sole Advance, 2026)

Figura 19

Diferencias entre hélice radialmente simétrica y con sesgo.



Nota. Obtenido de “Identification of the geometric design parameters of propeller Blades from 3D scanning” (p. 893), por E. Njaastad, 2022, *Journal of Marine Science and Technology*, 22 (22).

El estado del actual del arte de las hélices marinas, incluye nuevos diseños y características geométricas de la pala que buscan reducir al máximo la cavitación y ruido al máximo, con hélices tipo Sharrow y Toroidales, que benefician a embarcaciones que buscan la máxima eficiencia y operación silenciosa como buques de investigación, militares y de turismo (Southern Ocean Marine Engineering , 2025), Toda esta informacion hace importante el Túnel de Cavitación, para no solo analizar rendimientos de diseños de helices antiguas, sino tambien

futuros, probar su desempeño real, incentivar a la creatividad, creando nuevos prototipos mediante CAD, impresiones 3D y fundiciones; todo con el objetivo y la vision de buscar diseños o patentes de helices mas eficientes buscadas a nivel mundial.

2 CAPÍTULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUNEL DE CAVITACION

2.1 INTRODUCCION

Tal y como se estableció en los objetivos principales y específicos nuestro objetivo es dar el primer paso en el diseño y construcción de un canal de agua Hidrodinámicas que sirva como ayuda didáctica a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Marítima; que se involucren más a fondo en este mundo amplio del diseño de sistemas Propulsores; llegando a conocer el corazón de la Ingeniería marina, “las Hélices Marinas”.

2.2 Análisis de factibilidad del diseño

Para el proceso de diseño se usó la metodología recomendada por Norton (2004, pp. 7-9) que estipula en la siguiente tabla:

Tabla 3

Pasos para un proyecto tecnico

Proceso de diseño
1. Identificación de la necesidad
2. Investigacion preliminar
3. Planteamiento de objetivos
4. Especificaciones de desempeño
5. Ideacion e invencion
6. Analisis
7. Selección
8. Diseño detallado
9. Produccion

Nota. Tabla elaborada a partir de las sugerencias de Norton (2004, p. 7).

Esta tabla ilustra en gran parte la metodología usada en este proyecto; La selección de los materiales deben ser lo más económicas posibles, garantizando una larga vida útil, se optó por un diseño de fácil maquinabilidad, usando técnicas de procesos con y sin arranque de viruta.

Tabla 4

Matriz de decision de diseño.

	Economía	Seguridad	Desempeño	Confiabilidad	RANGO
Factor de ponderación	0.35	0.3	0.15	0.2	1
Túnel de Cavitación					
Diseño; eje propulsor de motor intraborda.	7	8	5	7	7.00
Túnel de Cavitación Ideal	3.5	5	10	10	6.23

Nota. Autores.

La Matriz de decisión ayudo mucho a la elección de diseño, los criterios en la elección de materiales fueron especialmente determinados por el espacio donde operara la máquina, presupuesto disponible, disponibilidad de máquinas de mecanizado y soldadura, potencia disponible del motor, dimensiones comerciales de tuberías de acero, facilidad de transporte y seguridad de operación.

2.3 Requerimientos del Túnel de Cavitación:

Se estipulo los siguientes requerimientos del canal de aguas abiertas.

Tabla 5

Desempeño del Túnel de Cavitación.

Especificaciones de desempeño
La Máquina debe contar con conexión a la red pública Monofásico 220 V.

-
- Para diseños de Hélice de 11-17 cms de diámetro rango recomendado.
 - La Máquina debe contar con protecciones resistentes a la corrosión.
 - RPM de diseño modificables de 0 a 1750 RPM
 - Debe permitir la visibilidad de operación de la hélice y la estanqueidad del túnel de Cavitación.
 - El eje propulsor debe tener sistema de sellado que evite fugas hacia el exterior de la máquina.
 - Los descansos o cojinetes van acorde a las fuerzas que se encuentra sometido el sistema propulsor.
 - El sistema propulsor no debe estar restringido Axialmente, característica pensada para captar los rendimientos de la Hélice Marina.
 - Debe contar con un sistema de compensación, que permita el llenado del fluido de trabajo, purgas, modificaciones del número de cavitación con bombas Neumáticas.
 - EL motor debe tener acoplamiento flexible.
 - De fácil Mantenimientos preventivos y correctivos.
 - Números de Cavitación del Túnel, según la potencia y capacidad de aspiración acoplada.
-

Nota. Autores.

2.3.1 Escala del prototipo

Como es de conocerse los Túneles de Cavitación son infraestructuras colosales, que incluso se destinan edificios para albergar estos laboratorios Hidráulicos, Se determino la escala del prototipo respecto a las dimensiones de área transversal de las zonas de visualización de ambos diseños.

Figura 20

Zona de visualización de Túnel de Cavitación MARIN.

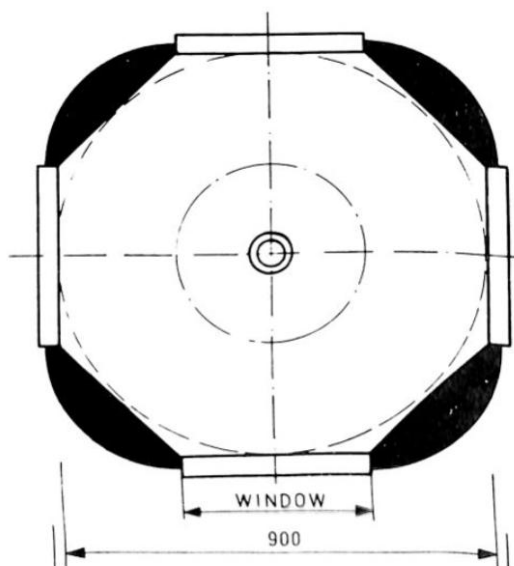


Figure 7b. Working section after modification in 1965.

Nota. Adaptado de “RECENT IMPROVEMENTS IN THE LARGE CAVITATION TUNNEL OF THE NETHERLANDS SHIP MODEL BASIN” (p. 30), por WITTE y ESVELDT, 1966, *International Shipbuilding Progress*.

Considerando las dimensiones en sección transversal de una tubería de acero negro de diámetro 8” pulgadas, mismas que servirán de dimensiones de nuestra zona ambiente marino de Hélices, se estipulo la escala de nuestro prototipo, mediante las siguientes expresiones (10):

Para efectos de simplicidad de cálculos se trabajará las unidades de las medidas en sistema Internacional (S.I.)

- Diámetro Prototipo 8”*pulgadas* = 203.2 mm
- Pared de ducto Túnel de MARIN= 900 mm

Tabla 6

Area Transversal de zona de pruebas.

Datos:	Formula de área	Área transversal
Sección Transversal Prototipo, (tubería circular)	$A = \frac{\pi * D^2}{4}$	32429,28 mm ²
Sección Transversal Túnel de Cavitación MARIN, (Ducto Cuadrado).	$A = l^2$	810000 mm ²

Nota. Autores.

La escala del modelo está determinada por la siguiente formula.

$$Escala = \frac{Medida Lineal del Dibujo del Objeto}{Medida Lineal del Objeto Real} \quad (10)$$

Como es una medida lineal solo se considera para el cálculo las longitudes del Túnel.

$$Escala = \frac{32429,28 \text{ mm}^2}{810000 \text{ mm}^2} = \sqrt{\frac{32429,28 \text{ mm}^2}{810000 \text{ mm}^2}} \quad (11)$$

$$Escala \text{ del Modelo} = 0.20 \approx 1:5 \quad (12)$$

Las dimensiones del Túnel de Cavitación prototipo son la quinta parte del modelo de referencia.

2.4 Elección de Materiales De Construcción.

El criterio de elección de materiales fue desde un punto de vista ecológico y agradable para el medio ambiente, La corporación ACESCO (2019) nos relata que el acero es uno de los materiales más reciclables del mundo. Su proceso de reutilización es de gran beneficio a la conservación del ecosistema. Se afirma que una Tonelada de acero puede economizar hasta 1,1 y

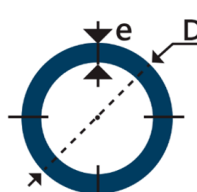
0.630 Toneladas de hierro y carbón. Las propiedades intrínsecas de ductilidad, maleabilidad y resistencia lo vuelven un material reutilizable e integrarse como parte de una nueva construcción. Como fue el caso de nuestro proyecto técnico.

2.4.1 Tubería de acero al carbono negro NPS 8, DN 200, cédula 40.

Fue la opción más factible para crear un Canal de aguas Hidrodinámicas, sus propiedades de dúctiles, maquinables, corrieron en ventaja a su favor de elección, las disponibilidad en centros de reciclaje ayudo a adquirirlo al costo por libra de acero, resultando una vía más económica y eco amigable que adquiriéndolo nuevo, muchas corporaciones petroleras, compañías agrícolas debido a la normas y estándares se ven obligadas a cambiar sus líneas hidráulicas a mitad y hasta 3/4 de vida útil, pero para nuestra aplicación se consideró el espesor de la tubería y conserva sus espesores de fabrica intactos, posee una leve oxidación superficial que con esmeriladoras, gratas, lijas, cepillo de acero fueron quitadas.

Figura 21

Especificaciones técnicas de tubo acero

ASTM A 53 GRB:	Conducción fluidos y gases en minería, petroquímica, pesca y en general			
API 5L:	Tubos para industria petrolera			
ASTM A 106:	Tubos para servicio a altas temperaturas			
Recubrimiento:	Negro o galvanizado			
Largo normal:	6,00 mts. y 12 metros			
Acabados:	Acero negro			

COMPOSICIÓN QUÍMICA %				PROPIEDADES MECÁNICAS				
C Max	MnMax	P Max	S Max	RESISTENCIA MECÁNICA		PUNTO DE FLUENCIA		Elongación%
				Kg/mm²	Psi	Kg/mm²	Psi	Min
0.3	1.2	0.05	0.06	42.2	60000	24.6	35000	30 – 35

(D)	CÉDULA 40		
DIÁMETRO			
NOMINAL	EXTERIOR	PESO	(e)
	mm	Kg/m	mm
8"	219.0	41.63	8.00

Nota. Adaptado de *TUBO REDONDO CEDULA 40 NEGRO*, de Metalhiero S.A, 2026, <https://metalhiero.com/producto/2560-tubo-redondo-cedula-40-negro>. Todos los derechos reservados.

2.4.2 Barras de acero Inoxidable AISI 304

Se incorporo barras de acero inoxidable nuevas, considerando que estos son los elementos más propensos a desgaste, corrosión y actividad mecánica. Estará destinado a ser parte del sistema propulsor de la máquina, se consideró la compra de 2 ejes de dimensiones de 38.10 mm en diámetro exterior y largos de ejes de 630 y 582 mm cada barra en materia prima, destinadas a mecanización.

Tabla 7

Propiedades mecanicas aceros inoxidables.

Tipo Acero	Rango de dimensiones	Límite Elástico 0,2% ($R_{p0,2}$) min. N/mm ²	Resistencia a la tracción (R_m) N/mm ²	Elongación (A_5) min. %
304	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 230	540 - 750	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 210	520 - 720	≥ 45
304L	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 220	520 - 670	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 200	520 - 670	≥ 45

Nota. Se uso dichos datos para el cálculo de esfuerzos posibles en el eje propulsor.

Adaptado de *Ficha técnica Acero Inoxidable*, de Europer, 2021, <https://europer.cl/wp-content/uploads/2021/11/FICHAS-TECNICA-ACERO-INOX.304-304L.pdf>. CC BY 2.0.

Tabla 8*Recomendaciones de mecanizado Acero AISI 304*

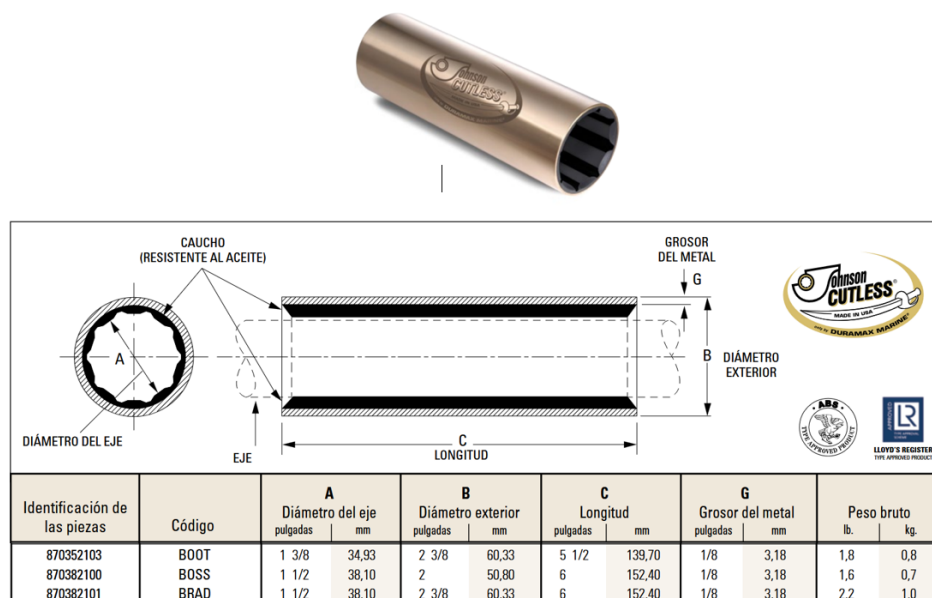
Parámetros de corte	Torneado con metal duro		Torneado con acero rápido	Parámetros de corte	Fresado con metal duro	
	Torneado de desbaste	Torneado fino	Torneado fino		Fresado de desbaste	Fresado en fino
Velocidad de corte (vc) m/min.	170 - 145	160 - 210	25 - 45	Velocidad de corte(vc) m/min.	60 - 120	100 - 155
Avance (f) mm/r	0,2 - 0,4	0,1 - 0,2	0,1 - 0,5	Avance (fz) mm/diente	0,2 - 0,3	0,2
Profundidad de corte (ap) mm.	1 - 4	0,5 - 1	0,5 - 3	Profundidad de corte (ap) mm.	≤ 4	≤ 0,6
Mecanizado grupo ISO	M20 - M30	M10	-	Mecanizado grupo ISO	M20 - M30	M10

Nota. Adaptado de *Ficha técnica Acero Inoxidable*, de Europer, 2021,

<https://europer.cl/wp-content/uploads/2021/11/FICHAS-TECNICA-ACERO-INOX.304-304L.pdf>. CC BY 2.0.

2.4.3 Bocín Marino Jhonson Cutless Duramax

El agua es el lubricante marino por excelencia en líneas de ejes propulsores debido a su afinidad con el metal y no con el caucho; otra característica es por su baja compresibilidad, propiedades refrigerantes y abundante presencia en el medio marino, Cuando este se almacena en superficies deslizantes, crea una película natural con bajo coeficiente de rozamiento y amigable con el medio ambiente (Duramax Marine, 2015). La elección del bocín marino para nuestra línea de ejes es fundamental. Las dimensiones consideradas del agujero del Bocín de 38.10 mm diámetro interno fueron acordes al diámetro exterior del Eje de Cola del Sistema; por la composición de sus materiales (Latón Naval y Caucho de Nitrilo bridado), se consideró como uno de los elementos más costosos del proyecto, pero necesario considerando que es un Sistema propulsor intraborda y compuesto con arbotante que sostiene las cargas radiales del eje de cola.

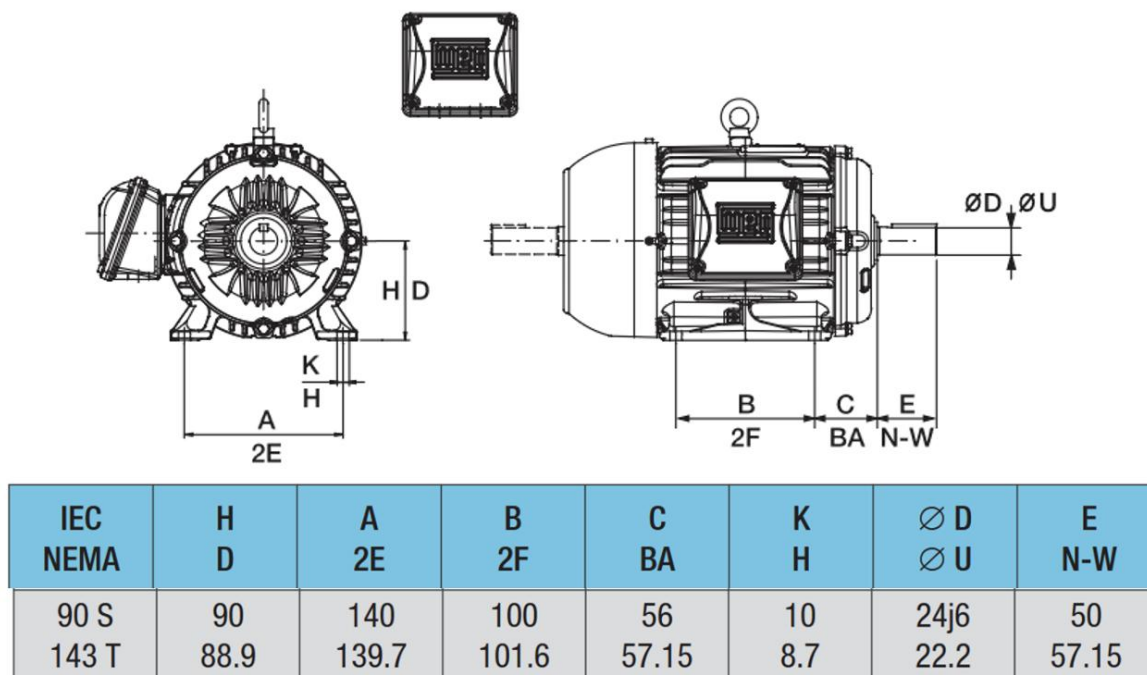
Figura 22*Especificaciones técnicas de Bocín Marino*

Nota. Adaptado de *Jhonson Cutless Bearings*, de Duramax Marine, 2015,

https://www.duramaxmarine.com/pdf/Sleeve-Flanged-Bearing_web_ESP.pdf. Todos los derechos reservados.

2.4.4 Motor Trifásico 2 HP Norma NEMA.

Aquí se establece el motor considerado para dimensionar hidráulicamente y dimensionalmente el sistema propulsor del Túnel de Cavitación, el motor es de la norma NEMA inglesa, tiene incorporado 6 Bobinas que permiten hacer sus distintas conexiones en delta y estrella, entregando una potencia nominal de 2 HP y 1740 RPM.

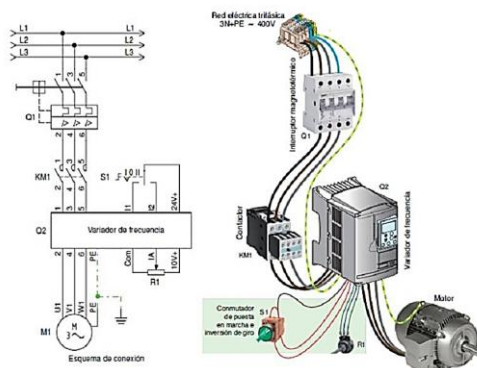
Figura 23*Dimensiones de Motor Nema 143T.*

Nota. Usaremos las medidas del motor para calcular H del eje propulsor que es la altura del centro del eje respecto a su base, dato importante para la alineación del motor con el eje; ambas H deben coincidir. Adaptado de *Guía De especificación de Motores eléctricos* (p. 51), por WEG, 2026, WEG.

La característica principal de un túnel de cavitación es su capacidad de poder configurar las revoluciones del motor para estudiar la hélice en distintos regímenes de velocidad angular, por lo que la solución más efectiva es incorporar un (VFD), Variador de frecuencia por sus siglas, haciendo una instalación típica como se observa a continuación.

Figura 24

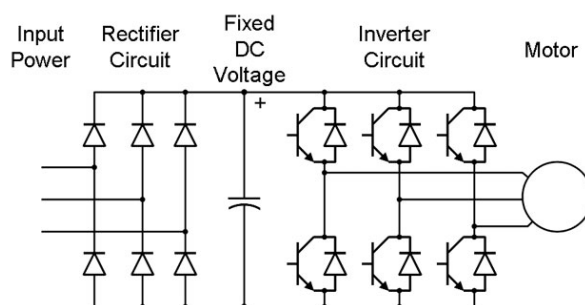
Diagrama ilustrado de la conexión de un motor controlado por un VFD.



Nota. En el esquema se observa la conexión típica de un variador de frecuencia conectado a una red trifásica, se recomienda incorporar un VFD para potencia nominal igual o mayor que el motor y que sea adaptable a la red monofásica de 220 V para su fácil conexión. Obtenido de *Aplicaciones y Usos de los variadores de frecuencia*, de Iguren, 2026, CC BY 2.0.

Figura 25

Composición electrónica de un VFD clásico.



Nota. Se observa como el VFD controla la frecuencia del motor incorporando un puente de diodos rectificadores que convierte la corriente alterna en corriente continua, para luego filtrarla, limpiarla y controlarla mediante transistores. Esta es la mejor manera de controlar un motor para exigencias altas como lo es nuestro Túnel de Cavitación. Obtenido de *VFDs: The Next Best Thing to Motion Control*, de K. Lewotsky, 2019, <https://www.automate.org/motion->

control/industry-insights/vfds-the-next-best-thing-to-motion-control. Todos los derechos reservados.

Figura 26

Características del motor NEMA 143T Trifásico



Nota. Autores.

Al ser un motor de RPM máximas de 1740 RPM operando a 60 Hz, su última característica es el número de polos que es desconocido y se obtiene de la siguiente expresión obtenida de WEG (2026, p. 58); despejando los polos se obtiene.

$$P = \frac{120 * 60}{1740} = 4.13 \approx 4 \quad (13)$$

Se establece que el motor usado es de 4 polos.

2.4.5 Lista general de materiales varios.

En este apartado agregamos la lista de materiales que usamos en nuestro proyecto, cada elemento fue de carácter fundamental en el desarrollo de este proyecto.

Tabla 9*Inversion en materia prima de materiales varios.*

Nº	Descripción	Cant.	Valor unitario \$	Valor total\$
1	Tubería de acero negro 200 x 3000 mm; cedula 40	1	\$300,00	\$300,00
2	Codos 90 grados	1	\$30,00	\$30,00
3	Plancha de acero naval para bridas de 8" (34x34) cm	4	\$30,00	\$120,00
4	Bocines de acero suave; conocido como obaco 200	3	\$25,00	\$75,00
5	eje de acero inoxidable 1.5"	2	\$30,00	\$60,00
6	Platinas de acero naval (20x12) cm	2	\$8,00	\$16,00
7	Resina ABS anycubic para molde de propelas modelo	1	\$90,00	\$90,00
8	Fundición de hélices serie B Wageningen en aluminio 6"	2	\$40,00	\$80,00
9	Pernos fijación en U tubería 5/8"	6	\$1,20	\$7,20
10	Pernos, espárragos, arandelas y tuercas de fijación (1/2"; 3/4"; 5/16"; 3/8"; M14) grado 8.	10	\$5	\$50,00
11	1 pie de Empaque mergollar encebado 3/8	3	\$3,50	\$10,50
12	Acero cuña de sección 12 y 8 mm	2	\$2,00	\$4,00
13	Vidrio circular para mirilla	1	\$5,00	\$5,00
14	Matrimonio o acople flexible 1.5"	1	\$30,00	\$30,00
15	Bocin marino Jhonson Cutless (1.5x2.375x6)" pulg.	1	\$200,00	\$200,00
16	Soldadura SMAW 5 kg (6011,6013,7018)	3	\$25,00	\$75,00
17	Recarga botella de oxígeno industrial para oxicorte	2	\$50,00	\$100,00
18	Chumacera timken de carga mixta para eje 30 mm	1	\$25,00	\$25,00
19	Empaque mirilla	1	\$10,00	\$10,00
20	Mesa base de Tubo Rectangular	1	\$100,00	\$100,00

Total	\$1.387,70
-------	------------

Nota. Autores.

2.5 Cálculos estructurales previo al diseño

En este apartado dejamos establecido la calidad del sistema de ejes propulsores diseñados por los autores, basados en Normativas de diseño, después de este apartado se pudo dimensionar componentes mecánicos intrínsecos en el eje propulsor como chavetas, chaveteros, diámetros mínimos según potencia y RPM suministradas.

2.5.1 Diámetros mínimos en líneas de ejes propulsores.

Las Reglas y regulaciones para la clasificación de Lloyd's Register (2026) ofrece una gama de fórmulas para establecer la resistencia estructural del eje propulsor de una embarcación basadas en diámetros mínimos, teniendo en cuenta la potencia y rpm máximas del motor y la resistencia mínima a la tracción del material del eje que en la Tabla 7 puede observarse.

Para ejes con acoplamientos de ajuste retráctil se usa $K=1.0$ y como el eje es de propulsión eléctrica se tiene el factor $F=95$ (Lloyd's Register, 2026)

Siendo los diámetros mínimos en la condición.

$$D = F * K \sqrt[3]{\frac{P}{R} \left(\frac{560}{\sigma_{\mu} + 160} \right)} \quad (14)$$

$$D = 95 * (1.0) \sqrt[3]{\frac{1.492}{1740} \left(\frac{560}{520 + 160} \right)} = 8.74 \text{ mm} \quad (15)$$

Para ejes con acoples con chaveteros se usa $K = 1.1$ (Lloyd's Register, 2026)

Siendo el diámetro mínimo.

$$D = 95 * (1.1) \sqrt[3]{\frac{1.492}{1740} \left(\frac{560}{520 + 160} \right)} = 9.31 \text{ mm} \quad (16)$$

2.5.2 Diámetros mínimos de los pernos usados en las bridas de los acoplamientos.

Para este calculo estimado solo necesitaremos dos nuevas variables, el diámetro basal de los agujeros de la brida de acople diseñada, cantidad de pernos en el acople, valores que puede observar en los planos de diseño y la resistencia minima a la tracción de los pernos.

Se puede observar la resistencia de los pernos en la siguiente tabla.

Tabla 10

Especificaciones de pernos SAE acerados.

Grado SAE núm.	Intervalo de tamaños, inclusive, pulg	Resistencia de prueba mínima,* kpsi	Resistencia mínima a la tensión,* kpsi	Resistencia mínima a la fluencia,* kpsi	Material	Marca en la cabeza
8	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Acero de aleación de medio carbono T y R	

Nota. Pernos usados para el diseño mecanico por su alta resistencia mecanica. Adaptado de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (p. 414), por Budynas y Nisbett, 2012, McGrawHillEducation.

Siendo

- **N:** Número de Pernos en el acoplamiento
- **D:** Circunferencia basal del círculo de los pernos, en mm

- σ_u : Resistencia a la tracción mínima de los pernos, en N/mm²
- **P y R**: Potencia y Rpm del motor.

$$\text{Diametro de los pernos de acoplamiento} = \sqrt{\frac{240 \cdot 10^6 \cdot P}{n \cdot D \cdot \sigma_\mu \cdot R}} \quad (17)$$

$$\text{Diametro de pernos} = \sqrt{\frac{(240 \cdot 10^6) \cdot (1.492)}{(6)(82.55)(1034.21)(1740)}} = 0.634 \text{ mm} \quad (18)$$

Se uso pernos de 6.35 mm o 1/4” pulgada, se establece que los acoples y los ejes de transmisión están sobredimensionados para la potencia de operación suministrada.

2.5.3 *Calculo del espesor minimo de la bocina.*

Siendo el diámetro del eje propulsor que interactua con el prensa estopa igual a 38.10 mm

$$T = \frac{D + 230}{32}$$

$$T = \frac{38.10 + 230}{32}$$

$$T = 8.38 \text{ mm}$$

El espesor minimo para las bocinas del eje propulsor debe tener 8.38mm.

Con todo lo calculado el eje propulsor cumple los requerimientos de la norma.

2.5.4 *Chaveteros de eje propulsor.*

Los chaveteros se dimensionaron con el criterio de la norma DIN – 6885/1 (1934) que establece en su tabla.

Tabla 11

Dimensiones de las chavetas según rango de diámetros de ejes.

Ø Eje d (mm) desde- hasta	Medidas chaveta b x h mm	Medidas del chavetero en el cubo				Medidas del chavetero en el eje para chavetas paralelas y de cuña		Medidas de los ejes en el cubo de la rueda	
		Chaveta paralela S/DIN 6885/1		Chaveta de cuña S/DIN 6886 y 6887		t ₁ m/m	Tol. admisible (en altura) m/m	Ø m/m desde- hasta	Tol. H-7 m/m
		d + t ₂ m/m	Tol. Admisible (en altura) m/m	d + t ₂ m/m	Tol. admisible (en altura) m/m				
17-22	6x6	d+2,6	+0,1	d+2,1	+0,1	3,5	+0,2	10-18	+0,018 0
22-30	8x7	d+3,0		d+2,4		4,1			
30-38	10x8	d+3,4	+0,2	d+2,8	+0,2	4,7		30-50	+0,025 0
38-44	12x8	d+3,2		d+2,6		4,9			
44-50	14x9	d+3,6		d+2,9		5,5		50-80	+0,030 0
50-58	16x10	d+3,9		d+3,2		6,2			
58-65	18x11	d+4,3		d+3,5		6,8		80-120	+0,035 0
65-75	20x12	d+4,7		d+3,9		7,4			
75-85	22x14	d+5,6		d+4,8		8,5		120-180	+0,040 0
85-95	25x14	d+5,4		d+4,6		8,7			
95-110	28x16	d+6,2		d+5,4		9,9	+0,3	180-250	+0,046 0
110-130	32x18	d+7,1		d+6,1		11,1			
130-150	36x20	d+7,9		d+6,9		12,3		250-315	+0,052 0
150-170	40x22	d+8,7		d+7,7		13,5			
170-200	45x25	d+9,9		d+8,9		15,3		315-400	+0,057 0
200-230	51x28	d+11,2		d+10,1		17			
230-260	56x32	d+12,9		d+11,8		19,3		400-500	+0,063 0
260-290	63x32	d+12,6	+0,3	d+11,5	+0,3	19,6			

Nota. Adaptado de *Dimensiones de chaveteros y chavetas*, de DIN – 6885/1, 1934, CC

BY 2.0.

También DIN – 6885/1 (1934) establece que:

La chaveta deberá dimensionarse de manera que pueda transmitir el mismo par de torsión que el eje correspondiente. Por ello, la longitud de la chaveta deberá ser como mínimo igual a 1,5 veces el diámetro del eje.

Y los chaveteros de eje y rueda deberán tener los bordes redondeados para evitar grietas y posteriores roturas.

Teniendo esas consideraciones; las chavetas dimensionadas para nuestro eje en la sección 24 mm son (8x7x32 mm) y en la sección 38.10 (12x8x56 mm).

2.5.5 Cálculos estructural de Hélices Marinas.

De la ecuación sacada de Carlton (2007, p. 104) podemos estimar el espesor mínimo de cada sección de r/R de la pala de la hélice para evitar que cada hélice se fracture en condiciones de operación.

$$\frac{t_{max}}{D} = Ar - Br * Z \quad (19)$$

Tabla 12

Ley de espesores para la helice de 4 palas

r/R	Ar	Br	Espesor min (mm)
0,2	0,0526	0,004	5,58
0,3	0,0464	0,0035	4,94
0,4	0,0402	0,003	4,30
0,5	0,034	0,0025	3,66
0,6	0,0278	0,002	3,02
0,7	0,0216	0,0015	2,38
0,8	0,0154	0,001	1,74
0,9	0,0092	0,0005	1,10
1	0,003	0	0,46

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13

Espesores minimos para helice de 3 palas

r/R	Ar	Br	Espesor min (mm)
0,2	0,0526	0,004	6,19
0,3	0,0464	0,0035	5,47
0,4	0,0402	0,003	4,75

0,5	0,034	0,0025	4,04
0,6	0,0278	0,002	3,32
0,7	0,0216	0,0015	2,61
0,8	0,0154	0,001	1,89
0,9	0,0092	0,0005	1,17
1	0,003	0	0,46

Nota. Elaboración propia.

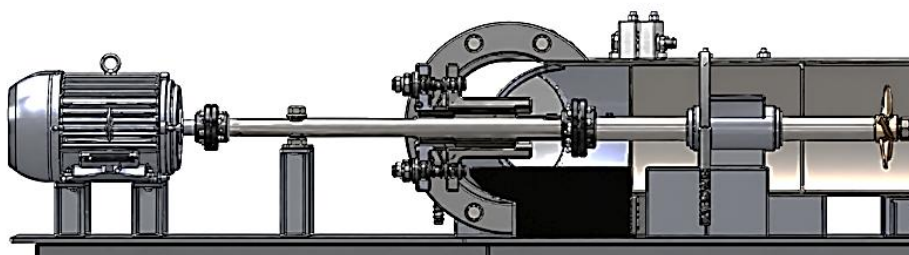
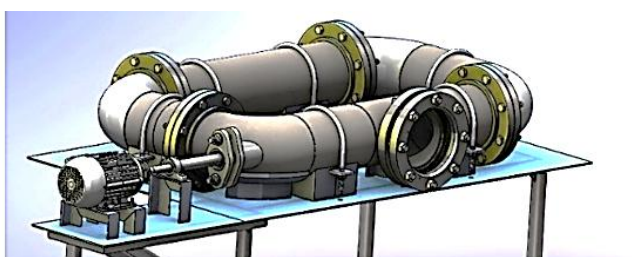
Estipulado estos cálculos podemos proceder a diseñar el eje con tranquilidad basándonos de esto.

2.6 Dimensionamiento del TDC con la ayuda de Solidworks.

Validado el diseño mediante cálculos y tablas normativas procedimos a diseñar los componentes del sistema propulsor basándonos en la estandarización de cada pieza, con la finalidad de que asegure su mantenimiento correctivo y preventivo, obtención de repuestos comerciales como pernos estandarizados, entre otros.

Tabla 14

Diseño conceptual del Tunel de Cavitation.



Nota. Autores.

SolidWorks fue de gran ayuda puesto que nos ayudó a dimensionar cada pieza con las medidas exactas nominales para poder mecanizarlas en un centro de mecanizado; cada pieza tiene su objetivo y cumple una función fundamental para la operación mecánica del Túnel de Cavitación.

Consideraciones de diseño normalizado:

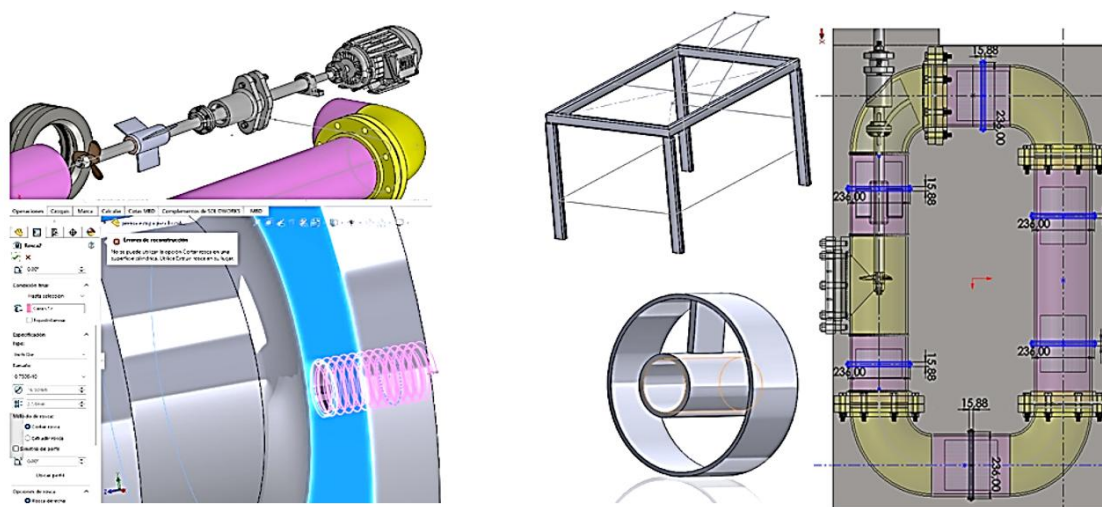
- ***Motor eléctrico:*** Integrado para entregar toda Potencia a la hélice en la zona de pruebas.
- ***Canal de aguas abiertas:*** Donde el reposara el fluido que interactúa con la hélice, se consideró Tubería de 8" cedula 40 para su implementación.
- ***Hélices:*** Es el sujeto de pruebas de la máquina, puede ser cualquier tipo hélices estándar y se tiene una visión de que algún estudiante de la carrera diseñe su propia geometría de hélice y la pruebe en nuestra máquina.
- ***Mirilla de observación:*** Diseñada para observar la operación de la hélice; con bridas diseñadas proporcionalmente a la tubería de 8"
- ***Acoples mecánicos:*** Diseñadas para conectar y transmitir la potencia de la línea de ejes propulsores, tenemos del tipo rígido y flexible.
- ***Eje intermedio:*** es la parte del eje que está en el exterior del túnel de cavitación y está apoyada por una chumacera de carga axial, para soportar las cargas de la hélice.
- ***Eje de cola:*** parte del eje que esta internamente en el túnel y está expuesto al fluido, por la cual debe de ser de acero inoxidable para resistir la corrosión.
- ***Prensaestopas:*** Previene fugas del fluido mientras que el eje de transmisión sigue rotando, La consideración de diseño fue alojar el sello mecánico de tipo mergollar

encebado de sección 3/8” de pulgada. Óptimo para operaciones de sellado de ejes en agua, creando una película lubricante de alta viscosidad.

- **Cojinete arbotante:** Consideraciones de diseño tomadas en este componente son las dimensiones del bocín marino Jhonson Cutless este debe ser alojado con un ajuste de apriete para garantizar su no deslizamiento en operación, para procesos de mantenimiento se recomienda fabricar un extractor especial.

Figura 27

Operaciones de diseño en Solidworks.



Nota. Se observa las operaciones de roscados, dimensionamiento del cojinete arbotante interno, Croquis en plano de planta para visualizar los elementos del TDC. Obtenido de Autores.

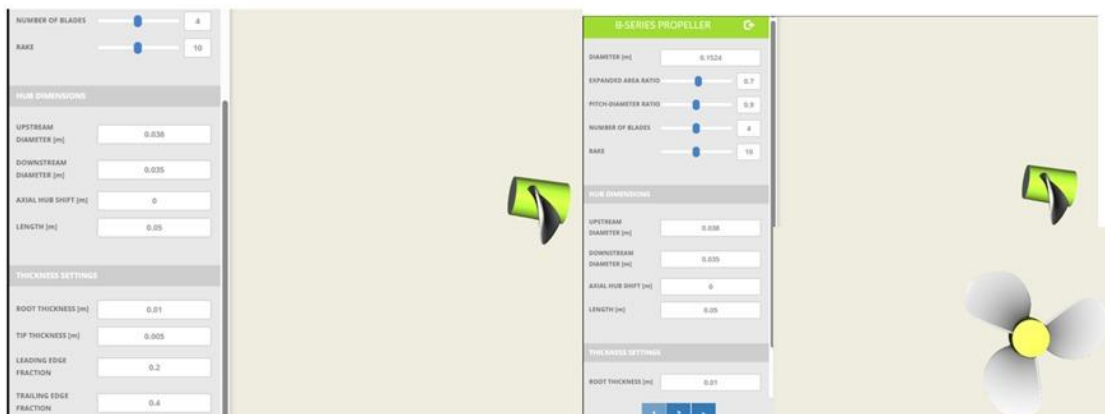
2.7 Generación de las hélices de prueba.

Se observa la interfaz de diseño de la helice marina en el software CAESES 5; aplicacion que usamos para generar la helice considerando la calidad y el estandar que el software ofrece basandose en las características geometricas de la serie estandar B Wageningen. Muchos modelistas navales usan este software para ahorrar horas de diseño en helices que ni siquiera

estaran optimizadas, este software al basarse en helices estándar probadas en el canal de aguas abiertas de MARIN (2026) garantizan calidades de geometría de las palas optimas.

Tabla 15

Interfaz online de Generador de helices Wageningen B-series.



Nota. Adaptado de *B-Series Propeller Generator*, de FRIENDSHIP SYSTEMS AG, 2025, <https://www.wageningen-b-series-propeller.com/>. Todos los derechos reservados.

En las consideraciones del diseño se estuvo tratando de buscar un perfil hidrodinámico afilado en el borde de ataque y grueso en el borde de salida tratando de buscar eficiencia como las helices de superficie; este diseño permite estudiar la helice en condiciones sumergidas, como en superficie.

Previamente a la impresión se descargó el diseño de la hélice en formato STEP para poder editar y agregar el agujero - chavetero correspondiente al eje de cola diseñado en SolidWorks, Posterior a esto la impresión se realizó en la impresora anycubic 3D de la Facultad de Ingeniería con resina ABS.

Los formatos de archivo usados para la operación de edición e impresión fueron.

- **STEP:** Permite editar y abrir archivos 3D de manera universal en diversas aplicaciones CAD.

- **STL:** Utilizado comúnmente para imprimir prototipos 3D de aplicaciones CAD.

Figura 28

Transición de diseño CAD a impresión 3D por resina ABS.



Nota. Autores.

Impresa la hélice procedemos a fundirla en aluminio; se utiliza el prototipo en resina de la hélice para incrustarlo en la arena y obtener el modelo hueco de la misma, se usa arena de fundición refinada y mezclada con bentonita, compuesto que esta presente en la arena de gatos; al mezclar estos elementos y atomizarlos con agua de a poco, se obtiene una consistencia maciza, indicando que la arena esta lista para el molde. Obsérvese los orificios de desfogue para que la fundición respire y no rompa el molde.

Figura 29

Proceso de fundición de hélices Wageningen B series.



Nota. El nombre técnico de las hélices diseñadas y fundidas responden a los siguientes:

Wageningen B.3-65 y Wageningen B.4-70. Obtenido de Autores.

Después de la obtención de la hélice fundida, procedemos a rectificar el núcleo en el torno a 24 ± 0.15 mm para asegurar un montaje suave de la hélice en el eje; las buenas prácticas del ITTC establecen que pintar las hélices a cavitación ayudan a ver los rastros de las implosiones de las burbujas, siendo el desgaste en la pintura indicativo de impacto de la cavitación.

Figura 30

Proceso final de rectificado en torno y pintura de hélices de aluminio.



Nota. Se escogió una pintura anticorrosiva de tono Bronce Naval, color característico de las hélices de embarcaciones, se recomienda pintar las hélices después de cada análisis de cavitación, la pintura picada indica daños de la cavitación. Obtenido de Autores.

2.8 Procedimientos de mecanización.

A continuación, se detalla cada proceso de arranques con viruta para la obtención de los productos terminados de la máquina.

2.8.1 Estimación de Velocidades de corte seguras para buriles, fresas y brocas.

La siguiente tabla resume bien los rendimientos de mecanizado en buriles de insertos de carburos, cuando un taller de mecanizado artesanal se topa con materiales duros o de gran diámetro que disparen la velocidad de corte, acude a estos, mismo que usamos en la mecanización de la Brida de acero naval de 342.9 mm de diámetro exterior, Buriles convencionales perdían filo rápido, incluso en velocidades bajas. Su rango de aplicaciones es

muy basto, siendo el inserto usado en el taller de la clasificación ISO (P50); para “materiales ferrosos de bajo carbono y virutas largas.” (Kalpakjian y Schmid, 2008, p. 656).

Tabla 16

Recomendaciones para insertos de carburo.

Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5–6.3 (0.06–0.25)	0.35 (0.014)	90 (300)	0.5–7.6 (0.02–0.30)	0.15–1.1 (0.006–0.045)	60–135 (200–450)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	245–275 (800–900)	"	"	120–425 (400–1400)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	185–200 (600–650)	"	"	90–245 (300–800)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	105–150 (350–500)	"	"	60–230 (200–750)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	395–440 (1300–1450)	"	"	365–550 (1200–1800)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	215–290 (700–950)	"	"	105–455 (350–1500)
Aceros de medio y alto carbono	Carburo sin recubrimiento	1.2–4.0 (0.05–0.20)	0.30 (0.012)	75 (250)	2.5–7.6 (0.10–0.30)	0.15–0.75 (0.006–0.03)	45–120 (150–400)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	185–230 (600–750)	"	"	120–410 (400–1350)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	120–150 (400–500)	"	"	75–215 (250–700)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–200 (300–650)	"	"	45–215 (150–700)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	335 (1100)	"	"	245–455 (800–1500)
	Cermet	"	0.25 (0.010)	170–245 (550–800)	"	"	105–305 (350–1000)
Acero inoxidable, austenítico	Carburo con triple recubrimiento	1.5–4.4 (0.06–0.175)	0.35 (0.014)	150 (500)	0.5–12.7 (0.02–0.5)	0.08–0.75 (0.003–0.03)	75–230 (250–750)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	85–160 (275–525)	"	"	55–200 (175–650)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	185–215 (600–700)	"	"	105–290 (350–950)

Nota. Adaptado de *Manufactura, ingeniería y tecnología* (pp. 681-683), por Kalpakjian y Schmid, 2008, PEARSON EDUCACION.

Se puede observar que tienen velocidades de corte altas, permitiendo tiempos cortos de mecanizado e interpretarse como tenaces en mecanizados de V_c altas.

Tabla 17

Herramientas de corte disponibles en el taller.

Material	HSS (m/min)	HSS de cobalto (m/min)	Carburo (m/min)
Acero con bajo contenido de carbono (acero dulce)	20-30	30-45	60-90
Acero al carbono medio (0,3-0,6% C)	15-25	25-35	50-70
Acero inoxidable (304, 316)	8-15-15	15-22	30-50
Fundición de aluminio	50-100	70-130	120-250

Nota. Traducido de *Cutting Speed Reference Table — by Material and Tool Type*, de AIMS Industrial, 2026, <https://aimsindustrial.com.au/blogs/product-guides/cutting-speeds-feeds-chart>. CC BY 2.0.

Tabla 18

Rendimientos recomendados en brocas HSS.

Recomendaciones generales de velocidades y avances en taladrado						
Material de la pieza de trabajo	Diámetro de la broca					
	Velocidad superficial		Avance, mm/rev (pulgadas/rev)		rpm	
	m/min	pies/min	1.5 mm (0.060 pulgada)	12.5 mm (0.5 pulgada)	1.5 mm	12.5 mm
Aleaciones de aluminio	30-120	100-400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	6400-25,000	800-3000
Aleaciones de magnesio	45-120	150-400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	9600-25,000	1100-3000
Aleaciones de cobre	15-60	50-200	0.025 (0.001)	0.25 (0.010)	3200-12,000	400-1500
Aceros	20-30	60-100	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300-6400	500-800
Aceros inoxidables	10-20	40-60	0.025 (0.001)	0.18 (0.007)	2100-4300	250-500
Aleaciones de titanio	6-20	20-60	0.010 (0.0004)	0.15 (0.006)	1300-4300	150-500
Hierros fundidos	20-60	60-200	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300-12,000	500-1500
Termoplásticos	30-60	100-200	0.025 (0.001)	0.13 (0.005)	6400-12,000	800-1500
Termofijos	20-60	60-200	0.025 (0.001)	0.10 (0.004)	4300-12,000	500-1500

Nota. Adaptado de *Manufactura, ingeniería y tecnología* (p. 711), por Kalpakjian y Schmid, 2008, PEARSON EDUCACION.

2.8.2 Consideraciones del taller mecánico industrial artesanal.

Debido a que en su mayoría las brocas se fabrican de HSS hasta de carburo, materiales clásicos encontramos en este apartado velocidades de corte más conservadoras. Cabe recalcar que las máquinas y herramientas usadas en este proyecto son clásicas lo que el rendimiento del mecanizado es del tipo robusto, encontrando en el torno rango de RPM de 20 hasta 1000 RPM, y en el taladro fresador rangos de 50 a 1250 RPM, las velocidades angulares bajas en mecanizado dan estabilidad y rendimientos y vida útil del filo más altos en las herramientas de corte. Notara que las velocidades de corte y avances usadas están dentro del margen y en algunos casos más bajas de lo recomendado por las tablas.

Figura 31

Rangos de V_C disponibles en el taller.



Nota. RPM, avances y paso de roscas disponibles en el taller de máquinas y herramientas.

Sacado de Autores.

2.8.3 Consideraciones en Maquina Limadora Industrial

Tenemos que agregar que debido a que se tuvo que mecanizar un chavetero interno en el acople rígido; usando una maquinaria clásica conocida como Limadora Industrial, debido a su no

continuación de fabricación, los buriles suelen ser del tipo artesanal adaptados con barritas de acero rápido (HSS), lo cual se debe tener mucho cuidado con los avances y velocidades de Corte.

Kalpakjian y Schmid (2008) recomienda en esta maquina que “las velocidades recomendadas para hierros fundidos y aceros inoxidable van de 3 a 6 m/min; los avances de 0.5 a 3 mm/carrera y los materiales más comunes de las herramientas son aceros de alta velocidad y carburos” (p. 741).

Siendo esta premisa confirmada por las configuraciones de la Limadora del maestro de taller, cuando se hizo el chavetero tenia una velocidad lineal en la carrera de 3,9 m/min y cada avance de corte se efectuaba lentamente aproximadamente a los datos confirmados por Kalpakjian y Schmid.

Para calcular la velocidad lineal optima real establecida por el maestro de taller en la cepilladora, nos dimos cuenta que la cepilladora efectuaba una carrera hacia adelante por segundo, lo que nos da el siguiente resultado.

- **Carrera avante** = Longitud total del chavetero en pieza en bruto mas fugas = 65 mm
- **tiempo** = 1 s (tomado de grabacion de autores)

Entonces.

$$VC_{cepilladora} = 65 \frac{mm}{s} * \frac{1 m}{1000 mm} * \frac{60 s}{1 min} \quad (20)$$

$$VC_{cepilladora} = 3.9 \frac{m}{min} \quad (21)$$

Este es el avance optimo obtenido mediante la experiencia y teorías en cepilladoras usando Buriles de acero rápido afilados artesanalmente, esta operación y una buena lubricación previene roturas y perdidas de filo.

Figura 32

Captura de video de Limadora realizando chavetero interno



Nota. Obtenido de autores.

2.8.4 Consideraciones en roscados.

El avance está determinado por el paso de la rosca más sin embargo la incógnita respecto a la profundidad de corte por pasadas la obtenemos de la siguiente práctica ejecutada por Gerling (2014) que en una práctica de generación de una rosca de M24 X 1.5, estableció una profundidad de corte de 0.2 milímetros (p. 237), mismas que aplicaremos en nuestra rosca M24 X 3.0 ya que garantiza una rosca de acabados finos y evitamos truncamientos de la herramienta con la pieza y más teniendo en cuenta que el acero inoxidable tiene problemas de mecanización como “el traqueteo y la formación de bordes acumulados, lo cual los hacen requerir materiales para herramientas con alta resistencia en caliente y resistencia a la craterización” (Kalpakjian y Schmid, 2008, p. 640).

Otra incógnita que tenemos es la velocidad de corte, que también debe ser relativa en este proceso de mecanizado por lo que tenemos la siguiente tabla.

Tabla 19

V_C de roscados recomendadas por la normativa DIN 336

Material	Herramienta de roscar	
	de acero de herramientas	de acero rápido
Acero de construcción sin alear	5	12
Acero de construcción aleado	—	6
Hierro fundido	5	9
Latón	10	15
Aleación de aluminio	16	25

Nota. Adaptado de *Alrededor de las maquinas herramientas* (p. 231), por H. Gerling, 2014, Reverté S.A.

Las roscas generadas por machuelos y brocas se consideran también en este proyecto; es de suma importancia respetar estas dimensiones recomendadas en agujeros si no se quiere tener malas experiencias al terminar una pieza; Un simple machuelo roto, frustra todas las horas de trabajo invertidas en la pieza nueva, para reducir este trágico acontecimiento se recomienda usar un buen lubricante y agujeros recomendados; que aunque parezca antitécnico, en muchos talleres de mecanizado artesanal, agregan manteca vegetal o animal y desarrollan buenos desempeños en el maquinado, tuvimos el privilegio de probar este acontecimiento en la labor de roscados por machuelo, ofrece una buena capacidad de refrigeración y reducción del rozamiento en roscados por machuelos de excelente calidad por sobre aceites solubles y lubricantes minerales. Es la mejor opción considerando su elección en calidad - precio.

Tabla 20

Agujeros recomendados para roscas metricas.

Rosca	M 3	M 3,5	M 4	M 5	M 6	M 8	M 10	M 11	M 14	M 16	M 18	M 20	M 22	M 24	M 27
Taladro para acero	2,5	2,9	3,3	4,2	5	6,7	8,4	10	11,75	13,75	15,25	17,25	19,25	20,75	23,75
Fundición gris, latón	2,4	2,8	3,2	4,1	4,8	6,5	8,2	9,9	11,5	13,5	15	17	19	20,5	23,5

Nota. Adaptado de *Alrededor de las maquinas herramientas* (p. 231), por H. Gerling, 2014, Reverté S.A.

2.8.5 Cálculo de los regímenes de corte en torno, fresadora y cepillo.

El desempeño de corte de una herramienta de corte se ve afectada por la velocidad lineal que esta experimenta relativamente en distintos diámetros y es proporcional a diámetro de la pieza o herramienta y velocidad angular. Gerling (2014, p. 33) propone las siguientes formulas para calcular Velocidades de corte y RPM seguras en máquinas y herramientas.

$$V_c = \frac{\pi * D_m * n}{1000} \quad (22)$$

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_m} \quad (23)$$

Gerling (2014, pp. 128-129) establece tambien el angulo de ajuste e inclinación en el carro superior de conos con las siguientes expresiones.

$$Tg\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{D - d}{2L} \quad (24)$$

$$\left(\frac{\varphi}{2}\right) = Tg^{-1}\left(\frac{D - d}{2L}\right) \quad (25)$$

$$\left(\frac{\varphi}{2}\right) = Tg^{-1}\left(\frac{70.35 - 51.30}{2 * 2}\right) \quad (26)$$

$$\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 78.14166119528^\circ \quad (27)$$

$$\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 78^\circ 8' 29'' \quad (28)$$

Para la inclinación del chaflán interior de prensa estopas piloto macho.

$$Inclinacion = \left(\frac{D - d}{2}\right) : l = \left(\frac{70.35 - 51.30}{2}\right) : 2 \quad (29)$$

$$Inclinacion = 4.7625 = 381:80 \quad (30)$$

El cálculo denota inclinación demasiado alta, lo cual confirma la formación de un chaflán interno, diseñado para que mediante la acción del prensa estopas, cree un sellado perfecto en el eje propulsor expandiendo el sello mergollar.

Tabla 21

Velocidades angulares del torno seguras calculadas según las herramientas usadas, diámetros máximos de piezas de trabajo y RPM del torno.

Cant.	Materia prima o producto semielaborado	Producto final con Ø max aproximado	Material de Trabajo	Herramienta de corte designada	RPM	Vc ($\frac{m}{min}$)
1	Barra o torta	Acople rígido (Ø 94.74 mm)	Acero de transmisión	HSS de cobalto	110	32.74
2	Barra	Eje propulsor (38.10 mm)	Acero inoxidable	HSS de cobalto	110	13.17
1	Bocín	Pilotos macho de prensa estopa (Ø 70.35 mm)	Acero suave de bajo carbono	HSS de cobalto	110	24.31
1	Bocín	Alojamiento hembra prensa estopa (Ø 95.75 mm)	Acero suave de bajo carbono	HSS de cobalto	110	33.08
1	Bocín	Arbotante (Ø 70.33 mm)	Acero suave de bajo carbono	HSS de cobalto	110	24.30
2	Plancha	Bridas de mirilla (Ø 342.9 mm)	Acero Naval	Inserto de Carburo	75	80.79
2	Hélices de fundición	Incremento de agujero a (Ø 24 mm)	Aluminio	HSS de cobalto	220	16.59
1	Acople flexible de estrella	Incremento de agujero a (Ø 21.95 mm)	Acero de medio carbono	HSS de cobalto	220	15.17

Nota. Velocidades de corte en rango seguro para los buriles utilizados en la construcción de la máquina. Sacado de Autores.

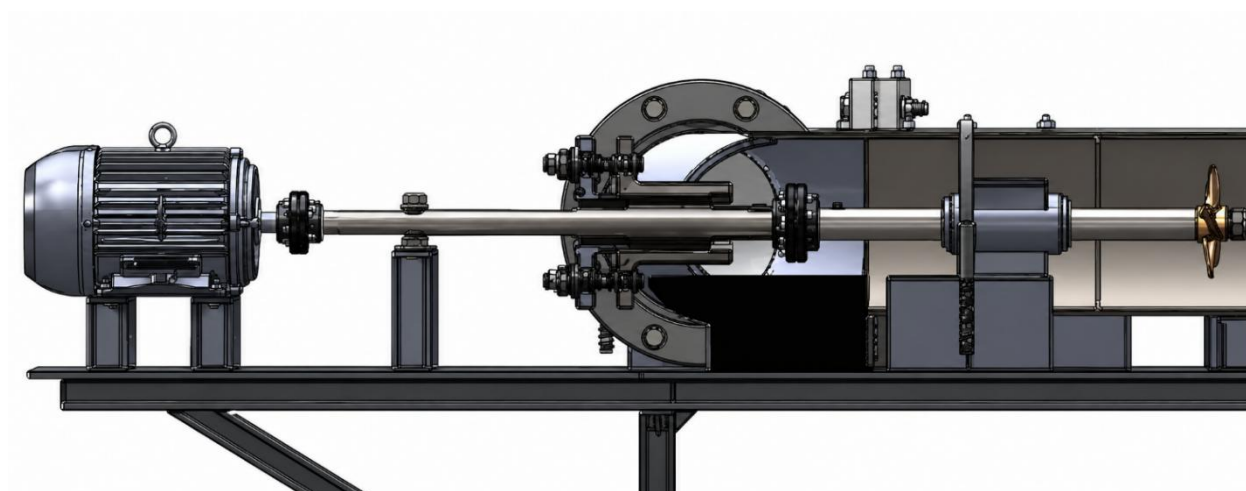
2.8.6 *Tabla de procesos de las piezas mecánicas más rigurosas.*

Todo Ingeniero Mecánico que esté involucrado en un proceso de diseño y construcción se ve en la necesidad de expresar las medidas, cotas y especificaciones técnicas que creo en el croquis y plano de diseño, las puede expresar tanto si requiere que sus piezas sean fabricadas en centros de mecanizado CNC, Talleres Industriales y Artesanales. Para ello las expresa y detalla muy bien mediante las “tablas de procesos”.

A continuación, se registró las tablas de procesos en las piezas de mecanizado de mayor requerimiento y especificación técnica.

Figura 33

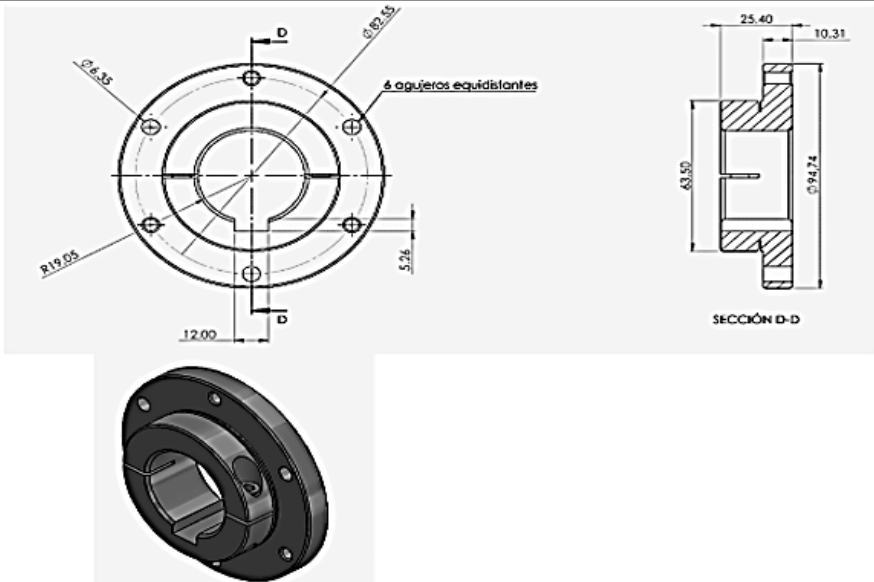
Diseño de Sistema propulsor de Túnel de Cavitación.

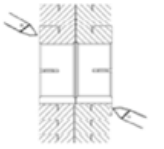
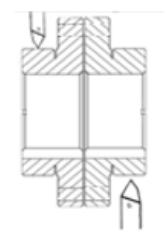
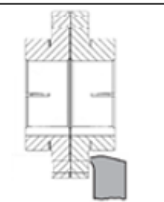
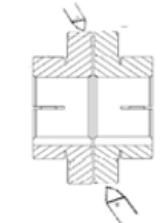


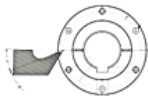
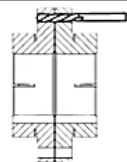
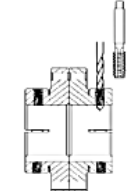
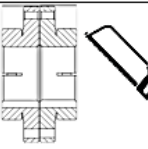
Nota. Las piezas involucradas en el diseño deben fabricarse con tal precisión, que garantice un buen rendimiento, impresiones de potencia elevadas, sin trabamientos ocasionados por desalineaciones o mal mecanizados. Elaboración propia.

Tabla 22

Hoja de proceso de Acople Rigido de Bridas para ejes propulsores.

Hoja de Proceso de Mecanizado				Fecha:19/07/2026				
Nº de piezas	Denominación	Observaciones	Material	Dimensiones en bruto	Nº de plano			
1	Brida acople para eje 1,5"	Añadir rosca para stud de 5/16"x18NC	Acero de transmisión	Ø101.6x 50.8 mm	ING-MAR-2025(2) - 03			
								
Fase	Denominación de la fase	Ilustración del proceso	Útiles		Condiciones de corte usadas			
			Trabajo	Control	Vc ($\frac{m}{min}$)	RPM	fn($\frac{mm}{rev}$)	ap (mm)
10	Alineación y centrado de pieza de trabajo y herramienta de corte		Husillo de Torno	Calibrador; Bancada del husillo				
20	Taladrado progresivo con Brocas HSS		B.C 2.8		1.94	220	Manual	
			B-1/4		4.39	220		
			B-3/4		13.17	220		
			B-1"		17.58	220		
30	Mandrinado de acabado por toda la pieza de		Barra de mandrinados	Calibrador; Micrómetro;	26.33	220	0.05	2

30	Mandrinado de acabado por toda la pieza de $\varnothing 25.4$ a $\varnothing 38.10 \pm 0.250$ mm		Barra de mandrina dos HSS de cobalto	Calibrador; Micrómetro; Nonio de carro transversal	26.33	220	0.05	2
40	Cepillado o ranurado de chavetero interno medidas $12 \times 5.26 \times 50.8$ mm		Limadora industrial; Butil de HSS	Calibrador; Escuadra 90°; Reloj comparador.	3.9		0.5 mm/carrera	0.5
50	Refrentado de ambas caras		Butil de refrentado HSS de cobalto.	S/N	35.11	110	0.05	0.1
60	Cilindrado en ambas caras de $\varnothing 101.6$ mm a $\varnothing 63.50 \times 15.09$ mm		Butil de refrentado HSS de cobalto.	Calibrador; Nonio de carro transversal	35.11	110	0.05	2
70	Refrentado en ambas caras del acople		Butil de refrentado HSS de cobalto.	S/N	35.11	110	0.05	0.1
71	Cilindrado exterior de $\varnothing 101.6$ mm a $\varnothing 94.74$ mm		Butil de refrentado HSS de cobalto.	Calibrador; Nonio de carro transversal	35.11	110	0.05	2

80	Ranurado guía en circunferencia basal 82.55 mm, ambas caras		Buril de refrentado HSS de cobalto.	Calibrador; nonio de carro transversal	28.53	110		
90	Taladrado equidistante 6 agujeros en circunferencia basal 82.55 mm		Taladro fresador; Broca 1/4" HSS	Cabezal divisor; Calibrador	7.58	380	Manual	
100	Taladrado y machueleado		Broca HSS 6.75 mm"; Machuelo 5/16-18NC.	Calibrador; Taladro Fresador	8.05	380	manual	
110	Tronzado manual con aserrado.		Hoja de sierra; Torno	S/N		220	manual	

Nota. Sacado de Autores.

Figura 34

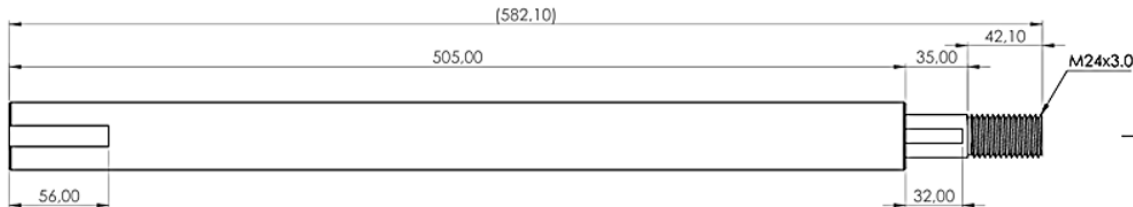
Experiencias de alineaciones y acabados en máquinas y herramientas.

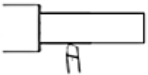
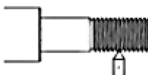


Nota. Primer refrentado defectuoso con avances de desbaste. Se notó la importancia de la alineación respecto a las bancadas de las máquinas, para obtener piezas de alta alineación y centrado en condición de operación. En casos de no poder usar la bancada como punto de referencia cree plaquitas como se observa en la tercera imagen. Obtenido de Autores.

Tabla 23

Tabla de procesos de mecanizado de Eje Propulsor.

Hoja de Proceso de Mecanizado				Fecha:19/07/2026			
Nº de piezas	Denominación	Observaciones	Material	Dimensiones en bruto	Nº de plano		
2	Eje de transmisión de cola	Repita la misma operación sin el roscado en eje intermedio	Acero Inoxidable 304	Ø38.10x 583 mm	ING-MAR-2025(2) - 09		
							
Fase	Indicaciones de la fase	Ilustración del proceso	Útiles		Condiciones de corte usadas		
			Trabajo	Control	Vc ($\frac{m}{min}$)	RPM	fn($\frac{mm}{rev}$) ap (mm)
10	Obtención de centros del eje ambos extremos		Broca de centros HSS 2.8 mm	Contrapunto	S/N		

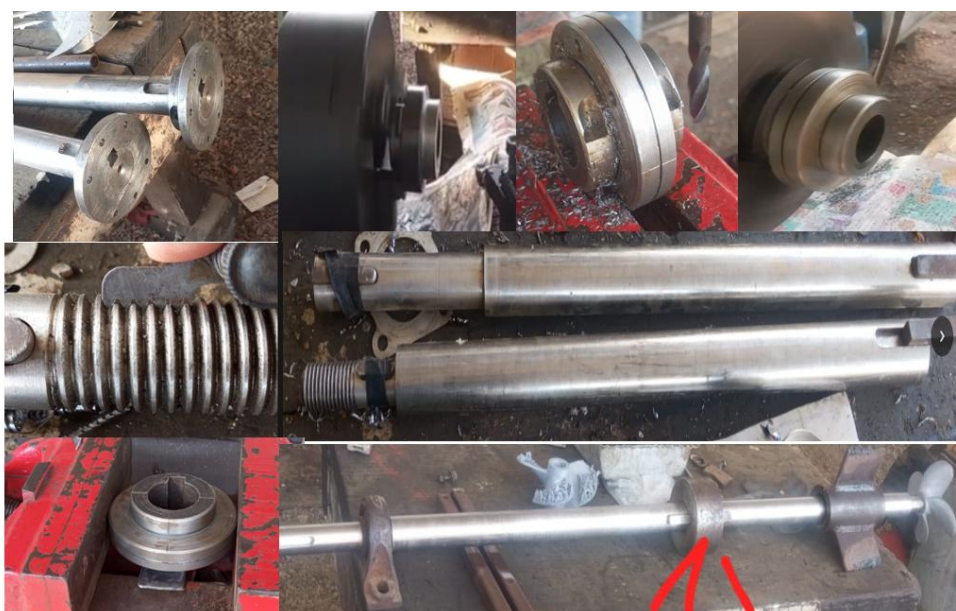
20	Realice el montaje entre centros del eje.		Contrapunto; Punto cónico montado en husillo del torno.	Reloj comparador	S/N			
30	Coloque el perro de arrastre con tal configuración		Perro de arrastre		S/N			
40	Torneado de $\varnothing 38.10$ mm a ($\varnothing 24 \times 77.1$ mm)		Buril HSS de cobalto	Calibrador de Vernier	13.17	110	0.05	0.5
41	Refrentado de hombro en eje		Buril HSS de cobalto		13.17	110	0.05	0.1
50	Roscado M24X3.0		Buril de HSS previamente afilado a 60°	Calibrador de roscas.	4.14	55	3.0	0.2

60	Refrente a la longitud axial requerida de 583 mm a 582.10 mm		Buril HSS de cobalto	Cinta métrica	13.17	110	0.05	0.5
70	Fresado de canales para chaveteros (8x4.1x32) mm+(12x4.9x56) mm		Taladro fresador; Fresa 8mm HSS al cobalto	Calibrador de Vernier	16.83	670	Manual	

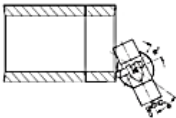
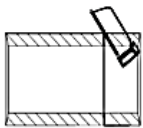
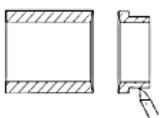
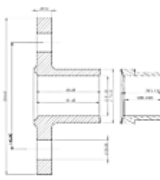
Nota. Autores.

Figura 35

Proceso de mecanizado para la obtención del sistema propulsor TDC.



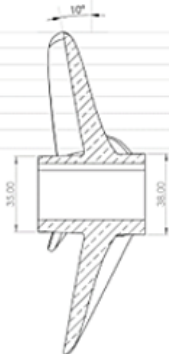
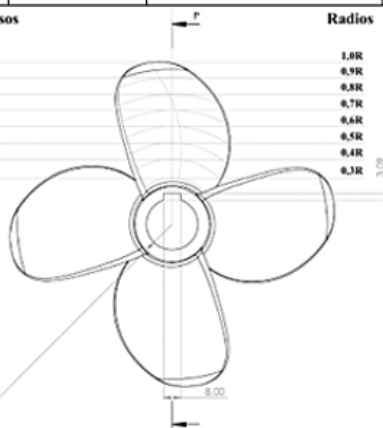
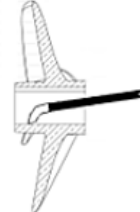
Nota. Obsérvese las líneas basales guías marcadas en el acople Marino realizadas en el torno, usadas como guía para agujeros de la brida y aserrado manual. Miscelánea de Autores.

40	Torneado cónico interno ambas caras; gire 78.14° horarios en el carro superior de conos.		Torno	Goniómetro	24.31	110	0.05	S/N
50	Tronzado manual con aserrado, creando un bocín de Ø70.35x30 mm desde una cara extrema cualquiera.		Hoja de sierra; Torno	Calibrador de vernier.		110		
60	Torneado en bocín Ø70.35x30 mm a Ø60.83x20mm; Refrentado final de acabado y quebrado de filos.		Torno	Calibrador de vernier	24.31	110	0.05	2
70	Soldadura con plancha Naval previamente perforada		Soldadur a SMAW E6013	Escuadra a 90°	S/N			

Nota. Autores.

Tabla 25

Requerimientos típicos en mecanizados de post fundición de Hélices.

Hoja de Proceso de Mecanizado				Fecha:19/07/2026															
Nº de piezas	Denominación	Observaciones	Material	Dimensiones en bruto	Nº de plano														
2	Hélice serie B- P/D=0.9 - EAR=0.7	Repita el mismo proceso en hélice de 3 palas	Fundición de aluminio	Ø23.5mmx50.8 mm	ING-MAR-2025(2) - 01														
Ley de espesores  SECCIÓN P-P ESCALA 1:1 Ley de pasos <table><tr><td>0</td><td>137.16</td></tr><tr><td>1</td><td>137.16</td></tr><tr><td>2</td><td>137.16</td></tr><tr><td>3</td><td>137.16</td></tr><tr><td>4</td><td>136.86</td></tr><tr><td>5</td><td>139.30</td></tr><tr><td>6</td><td>121.66</td></tr></table> Radios 						0	137.16	1	137.16	2	137.16	3	137.16	4	136.86	5	139.30	6	121.66
0	137.16																		
1	137.16																		
2	137.16																		
3	137.16																		
4	136.86																		
5	139.30																		
6	121.66																		
Fase	Indicaciones de la fase	Ilustración del proceso	Útiles		Condiciones de corte usadas														
			Trabajo	Control	Vc ($\frac{m}{min}$)	RPM	fn($\frac{mm}{rev}$)	ap (mm)											
10	Montaje centrado de Hélice		Torno	Gramil; Buril; Reloj comparador															
20	Mandrinado interno por toda la hélice de Ø23.5mm a Ø24mm		Barra de mandrinados HSS al cobalto	Eje de propulsión; Calibrador de vernier	75.39	1000	0.05	0.2											
30	Refrentado ambas caras del núcleo de la hélice		Torno Buril de HSS al cobalto	S/N	83.56	700	0.05	0.1											

Nota. Autores.

Figura 36

Construcción y obtención de los productos terminados del sistema propulsor del TDC.



Nota. Se detalla los productos terminados del proceso de mecanización siendo en orden, pilotos macho y alojamiento hembra de prensa estopa; Mandrinado de acople flexible para motor 2 HP; Seguido de rectificado post fundición del nucleo de la helice. Autores.

Figura 37

Diseño y construcción de zona de visualización de Tunel de Cavitación.



Nota. Proceso de diseño y construcción usado para la obtención de la zona de visualización con materia prima, planchas de acero naval $(340\text{ mm})^2 \times 12.70\text{ mm}$; Obsérvese en el torneado como el acero produce diferente maquinado siendo a bajos D_m virutas largas; solo por el parametro de la V_c que crece y decrece proporcionalmente a D_m . Obtenido de Autores.

2.9 Procedimientos de Corte y Soldadura

2.9.1 Experiencias en el proceso de soldadura.

Los procedimientos de soldadura fueron de carácter fundamental para la creación de nuestra máquina; Se quiso obtener los mejores resultados que desempeña este proceso debido a eso nos basamos en la norma ASME (2024) de procesos de soldadura en tuberías de servicio (piping).

Tabla 26

Requerimientos de soldadura

Procedimientos ASME aplicadas en el proceso de soldadura.
• Antes de cada cordón de soldadura siempre se tuvo que limpiar las superficies; deben estar libres de pintura, aceites, óxidos, cualquier otro material que contamine el baño de fusión. • Se aplicó doble cordón de soldadura en bridas de cuello deslizable para evitar corrosión por fractura. • Las soldaduras de unión cuidaron la estanqueidad de la máquina. • Las soldaduras raíz se ejecutaron con material de aporte igual al del pase de raíz. • Se evitó la mala práctica de martillar en cada pase de cordón de raíz y acabados. • La soldadura en elementos mecanizados de precisión debe ser cuidada térmicamente para evitar desalineaciones por contracciones térmicas. • No aplicó precalentamiento según ASME debido a las condiciones de materiales usados: ($\%C \leq 0.30\%$; Espesores ≤ 25 mm); (Véase anexo D). • No soldar en condiciones de materiales, superficies y ambiente húmedos, lluvia o excesivo viento. • Cada fisura en la soldadura debió ser esmerilada y se eliminó el material dañado hasta llegar a metal de soldadura saludable. • Todas las soldaduras debieron ser efectuadas por soldadores calificados y experimentados.

-
- Todas las soldaduras de apéndices deben tener alta penetración.
 - La resistencia a tracción nominal del material de aporte debe ser igual o superar a la resistencia mínima a tracción del componente a soldar.
-

Nota. Autores.

Figura 38

Procedimientos de Soldadura.



Nota. Elementos de unión soldada en el Túnel de Cavitación. Fuente. Autores.

- **Figura 23a**, el cojinete arbotante y **Figura 23e**, el bocín marino, ambos elementos experimentaron el fenómeno conocido como distorsión de la soldadura, estos elementos soportan la línea de ejes propulsores por lo que su alineación es fundamental para su operación, se realizó soldaduras intermitentes para evitar que la expansión y contracción térmica local de la soldadura afecte la alineación de estos dos elementos.

- **Figura 23b**, Acabados con soldadura SMAW E7018, conocido por su propiedad antiporosidad y bajo hidrogeno, cada pase se realizó limpiando y ejecutando el cordón, las herramientas usadas en el proceso fueron pulidora de 4.5 pulgadas. Este método garantiza la estanqueidad del Túnel.
- **Figura 23d**, se observa soldaduras gruesas que se rigieron bajo la norma ASME que se debe hacer dos pases de soldadura en bridas de cuello deslizables propensas a corrosión por fisura.
- **Figura 23f**, En la inspección de soldaduras de raíz se observó una porosidad, misma que nos llevó a eliminar todo el material hasta llegar a una capa saludable y volver a soldar.
- **Figura 23g**, En calibres finos se observó un mejor desempeño y acabados de la soldadura E6013, tal y como experimentamos en la estructura de la mesa, bases de motor, Túnel de Cavitación.

Figura 39

Comportamiento térmico visual del charco de soldadura practico.



Nota. Se observa un pase de raíz caliente, constante y uniforme, garantizando la no formación de cavidades del material de soldadura realizado por un soldador calificado,

Obsérvese también el color de transición amarillo a rojo intenso, colores límites que indicaron sensorialmente que tiene un avance correcto en su cordón, Sensorialmente también el cordón de indico un sonido análogo al de “tocino friendo en sartén” Estas son las habilidades sensoriales icono de un soldador calificado, incluso puede ajustar el rango de amperajes de la soldadura acorde a estos sentidos. Fuente: Autores.

Tabla 27

Especificaciones de soldadura celulósica E6011

Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,11%; Mn 0,41%; Si 0,23%; P 0,010%; S 0,017%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción : 495 MPa Límite de fluencia : 424 MPa Alargamiento en 50 mm : 27%	430 MPa 330 MPa 22%	34J a -30°C	27J a -30°C

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	50	90	74
3,2	350	80	120	34
4,0	350	120	160	24
4,8	350	160	220	17

Nota. Su importancia en el proyecto fue crucial, para cordones de raíz y penetración en el ensamble soldado del Túnel de Cavitación. Adaptado de *Sistema de Materiales y Soldadura* (p. 36), por Indura, 2007, INDURA.

Tabla 28*Especificaciones soldadura E6013*

Composición química (típica) del metal depositado:				
C 0,11%; Mn 0,40%; Si 0,22%; P 0,015%; S 0,010%				
Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):				
Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos	
Resistencia a la tracción : 518 MPa	430 MPa	90J a 20°C	No especificado	
Límite de fluencia : 431 MPa	330 MPa			
Alargamiento en 50 mm : 28%	17%			
Amperajes recomendados:				
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
*2,4	300	40	90	52
*3,2	350	70	120	35
*4,0	350	120	190	22
*4,8	350	160	240	17

Nota. Usado para estructuras livianas y aplicaciones no exigentes y acabados pulcros de la máquina como soporte de la máquina, motor y chumacera. Adaptado de *Sistema de Materiales y Soldadura* (p. 40), por Indura, 2007, INDURA.

Tabla 29*Especificaciones soldadura E7018*

Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,06%; Mn 1,05%; Si 0,49%; P 0,015%; S 0,010%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción : 535 MPa	490 MPa	130J a -30°C	27J a -30°C
Límite de fluencia : 445 MPa	400 MPa		
Alargamiento en 50 mm : 30%	22%		

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	70	120	55
3,2	350	120	150	28
4,0	350	140	200	20
4,8	350	200	275	14

Nota. Muy usado en aplicaciones donde se requiere alta calidad radiográfica, mismo criterio que usamos para elegirlo en soldaduras de alta presión del Túnel de Cavitación. Adaptado de *Sistema de Materiales y Soldadura* (p. 43), por Indura, 2007, INDURA.

2.9.2 Experiencias en el proceso de corte

Proceso muy importante para nosotros en el seccionado y corte de piezas metálicas de espesores grandes, la eficiencia de corte es muy notoria respecto a procesos de corte con sierra y pulidora.

Tabla 30

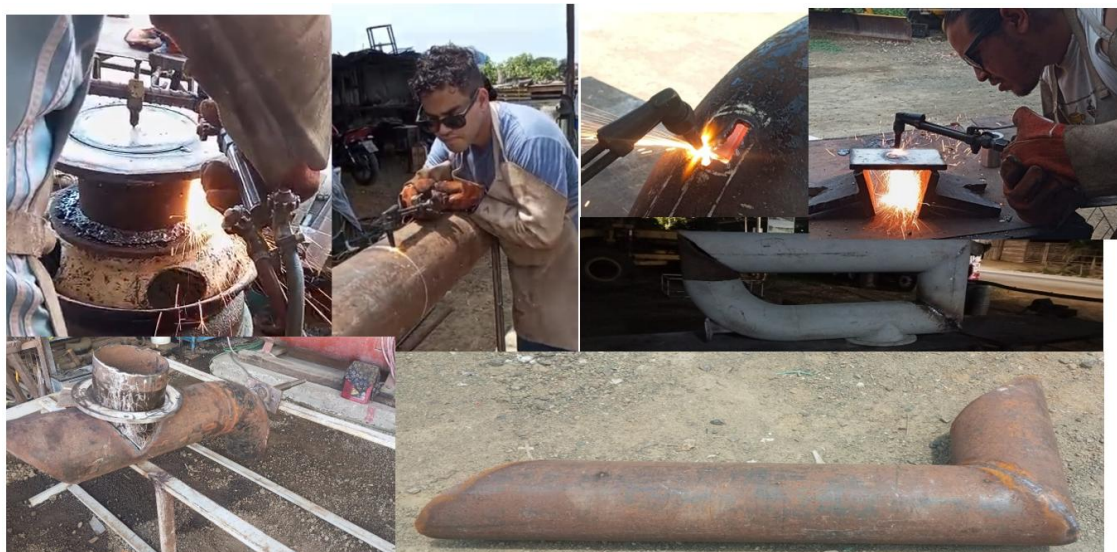
Calibración usada en los manómetros de Oxígeno y gas.

Tamaño de Boquilla	Diámetro orificio de Corte	Presión de gas		Espesores de planchas.
		Oxígeno	Gas (GLP)	
Boquilla GPN-3	1.8 mm	60 psi	8 psi	8 a 12.70 mm

Nota. Con esta boquilla podemos cortar hasta espesores de 3 pulgadas, más sin embargo para nuestra aplicación, hicimos cortes de máximo 1/2" pulgada. Sacado de Autores.

Figura 40

Procesos de corte del acero con oxígeno y gas.



Nota. Reacción exotérmica de la oxidación del acero en los procesos de corte del acero dulce y Naval. Obtenido de Autores.

Las planchas de acero naval destinadas a las bridas de 8 pulgadas se cortaron en sobremedidas tanto interior mínimas a 221.49 mm, como exterior mayor a 342.9 mm, ya que este proceso de corte manual no ofrece una precisión del 100% como lo haría un mecanizado en torno.

En cada proceso de corte se calibra la flama siendo

- **Carburante**, Se produce al reducir el oxígeno en la mezcla, produce un flujo rico en gas, Este tipo de flama puede añadir carbono de la llama a la soldadura, de ahí su nombre de carburante. Ideal para cuando se quiere añadir dureza en los aceros en procesos de Templado. Temperaturas alcanzadas (2980-3040 °C).
- **Neutra**, se la reconoce por un cono interior blanco azulado luminoso y una llama azul claro que encierra el cono interior, La relación de la mezcla oxígeno y combustible es 1:1. Temperaturas alcanzadas (3232 °C en el cono interior -1260 °C en la punta de la flama). Un soldador experto usa esto a su favor.
- **Oxidante**, Se la conoce por su contenido alto en oxígeno y poca proporción de gas. No es adecuada para trabajos de soldadura, pero si para corte. Temperaturas alcanzadas (3482 °C). (Bale, 2022)

Teniendo esto en cuenta, se precalienta el acero con flama neutra tendiendo a oxidante, cuando el acero manifiesta un color naranja brillante y chispas espumosas hacia el exterior, en ese momento se acciona el chorro que inyecta oxígeno puro, oxidando rápidamente el acero a través de la profundidad del corte, este proceso produce una enorme cantidad de energía en forma de calor conocida también como reacción exotérmica. Nuestra técnica aprendida en base a la experiencia, fue relatada en mejores palabras técnicas gracias a Lincoln Electric (2026).

Antes de ejecutar cada corte se debió establecer un trazado, un recorrido de corte en las superficies de la materia prima, por lo que se creó una plantilla fundamental para hacer cortes a 45°, bocas de pescado. (Véase Apéndice D).

3 CAPÍTULO III: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1 Resultados de rendimiento propulsivo presentes en el Túnel Cavitación basados en la Teoría de la Hélice Marina.

Se establece el cálculo hidráulico y la velocidad de avance de la corriente del agua del túnel correspondiente a 1.5 m/s, mediante aproximaciones calculadas en el laboratorio CFD realizado por nosotros en ANSYS Fluent para obtener los coeficientes de presión en las palas de la hélice y visualizar la cavitación y en que regímenes de avance se puede producir. (Véase Apéndice E).

Se obtiene también la viscosidad cinemática y densidad del agua a 25 °C de la tabla brindada por el informe de investigación “*Fresh Water and Seawater Properties*” del ITTC (2016, p. 6) que indica todas las propiedades físicas del agua fresca en diferentes temperaturas.

Tabla 31

Datos de las helices de pruebas.

<i>Datos</i>	Hélice 4	Hélice 3
	palas (z)	palas (z)
P/D	0.90	1
A_E/A_O	0.70	0.65
$C_{0.7R}$ (m)	0.054 m	0.067 m
Tipo de hélice	Serie B - de paso fijo	
Relación de diámetro total/ diámetro núcleo	0.23	

Dirección de rotación	Dextrógira
$V_A(\text{m/s})$	1.5
$N(\text{rps})$	1600 RPM = 26.66 RPS
$D(\text{m})$	0.1524
$\nu(\text{m}^2/\text{s})$	$8.9266 \cdot 10^{-7}$ a 25°C
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	997.0476 a 25°C

Nota. Elaboración propia.

De la sección transversal de tubería en m y velocidad media en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ estimada se obtiene el caudal.

$$Q = A * V_A = \left(\frac{\pi * (0.2032)^2}{4} \right) * 1.5 = 0.0486 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (31)$$

En unidades más conocidas como l/s se obtiene el caudal del túnel en regímenes de operación como

$$Q = 0.0486 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 48.6 \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (32)$$

Cabe recalcar que este caudal es promedio, puede variar dependiendo las variaciones de relaciones de avance configuradas en el túnel.

De la ecuación 8, se obtiene el Numero de Reynolds para la operación de la Hélice de 4 y 3 palas.

$$Re = \frac{(0.054) * \sqrt{(1.5)^2 + (0.7\pi * 26.66 * (0.1524)^2)}}{8.9266 * 10^{-7}} = 114964.27 \quad (33)$$

$$Re = \frac{(0.067) * \sqrt{(1.5)^2 + (0.7\pi * 26.66 * (0.1524)^2)}}{8.9266 * 10^{-7}} = 142640.84 \quad (34)$$

Se deja establecido el Numero de Reynolds con el cual el TDC opera, considerando una revolución del rango máximo del motor crece conforme bajamos en número de palas de la hélice, debido a que la cuerda de la hélice de 3 palas tiene una cuerda ligeramente más grande. Se obtuvo las medidas de las cuerdas respectivas de la siguiente forma.

Figura 41

Medición de la cuerda de la hélice a escala en 70% de su radio.



Nota. La condición del túnel de Cavitación se ve afectada por la proporción de tamaño de la hélice; por eso, hélices de grandes tamaños, alcanzan Números de Reynolds bastante elevados. Condición bastante buscada en simulación de Hélices Marinas, para aproximarse a valores más reales. Elaboración propia.

3.1.1 Establecimiento de practica ejemplar para el Túnel de Cavitación.

En este apartado se establece las condiciones de operación según el rango de potencia del motor y energía relativa consumida por la hélice, Puede usar este método como ejemplar para determinar las RPM optimas en cualquier motor, solo sabiendo condiciones geométricas de la hélice, estipuladas en la tabla 25.

En el Variador de frecuencia establezca rango de RPM (435-870-1305-1740).

De la ecuación 6, obtendremos la relación de avance para las condiciones estipuladas y las hélices de prueba de mismo diámetro obtenemos.

$$J_{1740} = \frac{V_A}{nD} = \frac{1.5}{\left(\frac{1740}{60}\right) * 0.1524} = 0.34 \quad (35)$$

$$J_{1500} = \frac{V_A}{nD} = \frac{1.5}{\left(\frac{1500}{60}\right) * 0.1524} = 0.39 \quad (36)$$

$$J_{700} = \frac{V_A}{nD} = \frac{1.5}{\left(\frac{700}{60}\right) * 0.1524} = 0.84 \quad (37)$$

$$J_{600} = \frac{V_A}{nD} = \frac{1.5}{\left(\frac{600}{60}\right) * 0.1524} = 0.98 \quad (38)$$

Nos servirá para la condición de obtener los coeficientes de empuje y torque con las series polinómicas de Wageningen. (Carlton, 2007, p. 106)

$$K_T = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v}^T * (J)^s * (P/D)^t * (A_E/A_O)^u * (z)^v \quad (39)$$

$$K_Q = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v}^Q * (J)^s * (P/D)^t * (A_E/A_O)^u * (z)^v \quad (40)$$

Tabla 32

Series polinómicas de la serie B Wageningen.

Thrust (K_T)						Torque (K_Q)					
n	$C_{s,j,u,v}$	$s(J)$	$t(P/D)$	$u(A_E/A_O)$	$v(Z)$	n	$C_{s,j,u,v}$	$s(J)$	$t(P/D)$	$u(A_E/A_O)$	$v(Z)$
1	+0.00880496	0	0	0	0	1	+0.00379368	0	0	0	0
2	-0.204554	1	0	0	0	2	+0.00886523	2	0	0	0
3	+0.166351	0	1	0	0	3	-0.032241	1	1	0	0
4	+0.158114	0	2	0	0	4	+0.00344778	0	2	0	0
5	-0.147581	2	0	1	0	5	-0.0408811	0	1	1	0
6	-0.481497	1	1	1	0	6	-0.108009	1	1	1	0
7	+0.415437	0	2	1	0	7	-0.0885381	2	1	1	0
8	+0.0144043	0	0	0	1	8	+0.188561	0	2	1	0
9	-0.0530054	2	0	0	1	9	-0.00370871	1	0	0	1
10	+0.0143481	0	1	0	1	10	+0.00513696	0	1	0	1
11	+0.0606826	1	1	0	1	11	+0.0209449	1	1	0	1
12	-0.0125894	0	0	1	1	12	+0.00474319	2	1	0	1
13	+0.0109689	1	0	1	1	13	-0.00723408	2	0	1	1
14	-0.133698	0	3	0	0	14	+0.00438388	1	1	1	1
15	+0.00638407	0	6	0	0	15	-0.0269403	0	2	1	1
16	-0.00132718	2	6	0	0	16	+0.0558082	3	0	1	0
17	+0.168496	3	0	1	0	17	+0.0161886	0	3	1	0
18	-0.0507214	0	0	2	0	18	+0.00318086	1	3	1	0
19	+0.0854559	2	0	2	0	19	+0.015896	0	0	2	0
20	-0.0504475	3	0	2	0	20	+0.0471729	1	0	2	0
21	+0.010465	1	6	2	0	21	+0.0196283	3	0	2	0
22	-0.00648272	2	6	2	0	22	-0.0502782	0	1	2	0
23	-0.00841728	0	3	0	1	23	-0.030055	3	1	2	0
24	+0.0168424	1	3	0	1	24	+0.0417122	2	2	2	0
25	-0.00102296	3	3	0	1	25	-0.0397722	0	3	2	0
26	-0.0317791	0	3	1	1	26	-0.00350024	0	6	2	0
27	+0.018604	1	0	2	1	27	-0.0106854	3	0	0	1
28	-0.00410798	0	2	2	1	28	+0.00110903	3	3	0	1
29	-0.000606848	0	0	0	2	29	-0.000313912	0	6	0	1
30	-0.0049819	1	0	0	2	30	+0.0035985	3	0	1	1
31	+0.0025983	2	0	0	2	31	-0.00142121	0	6	1	1
32	-0.000560528	3	0	0	2	32	-0.00383637	1	0	2	1
33	-0.00163652	1	2	0	2	33	+0.0126803	0	2	2	1
34	-0.000328787	1	6	0	2	34	-0.00318278	2	3	2	1
35	+0.000116502	2	6	0	2	35	+0.00334268	0	6	2	1
36	+0.000690904	0	0	1	2	36	-0.00183491	1	1	0	2
37	+0.00421749	0	3	1	2	37	+0.000112451	3	2	0	2
38	+0.0000565229	3	6	1	2	38	-0.0000297228	3	6	0	2
39	-0.00146564	0	3	2	2	39	+0.000269551	1	0	1	2
						40	+0.00083265	2	0	1	2
						41	+0.00155334	0	2	1	2
						42	+0.000302683	0	6	1	2
						43	-0.0001843	0	0	2	2
						44	-0.000425399	0	3	2	2
						45	+0.0000869243	3	3	2	2
						46	-0.0004659	0	6	2	2
						47	+0.0000554194	1	6	2	2

Nota. Series polinómicas para obtener las curvas de rendimiento de la hélice, se usó herramientas de cálculo como Excel para obtener los coeficientes hidrodinámicos de manera eficiente. Obtenido de *Marine Propellers and Propulsion* (p. 106), por J. Carlton, 2007, Butterworth-Heinemann.

Tabla 33*Obtencion de los coeficientes K_T , K_Q de la helice Wageningen B.3-65*

Series polinómicas de la Hélice Modelo - Wageningen B.3-65; P/D = 1.0					
J=0.34		J=0.39		J=0.98	
$\Sigma = K_T$	$\Sigma = K_Q$	$\Sigma = K_T$	$\Sigma = K_Q$	$\Sigma = K_T$	$\Sigma = K_Q$
0,00880496	0,00379368	0,00880496	0,00379368	0,00880496	0,00379368
-0,06954836	0,001024821	-0,07977606	0,001348401	-0,20046292	0,008514167
0,166351	-0,01096194	0,166351	-0,01257399	0,166351	-0,03159618
0,158114	0,00344778	0,158114	0,00344778	0,158114	0,00344778
-0,011089236	-0,026572715	-0,014590596	-0,026572715	-0,092128915	-0,026572715
-0,106410837	-0,023869989	-0,12205949	-0,027380282	-0,306713589	-0,068801733
0,27003405	-0,006652753	0,27003405	-0,008753319	0,27003405	-0,055270794
0,0432129	0,12256465	0,0432129	0,12256465	0,0432129	0,12256465
-0,018382273	-0,003782884	-0,024186364	-0,004339191	-0,152719158	-0,010903607
0,0430443	0,01541088	0,0430443	0,01541088	0,0430443	0,01541088
0,061896252	0,021363798	0,070998642	0,024505533	0,178406844	0,061578006
-0,02454933	0,001644938	-0,02454933	0,002164318	-0,02454933	0,013666079
0,007272381	-0,001630706	0,008341848	-0,002145592	0,020961568	-0,01354784
-0,133698	0,002906512	-0,133698	0,003333941	-0,133698	0,008377595
0,00638407	-0,052533585	0,00638407	-0,052533585	0,00638407	-0,052533585
-0,000153422	0,001425766	-0,000201864	0,002151816	-0,001274624	0,03414205
0,004304668	0,01052259	0,006496759	0,01052259	0,103081607	0,01052259
-0,021429792	0,00070297	-0,021429792	0,000806348	-0,021429792	0,002026208
0,004173752	0,00671606	0,005491588	0,00671606	0,034675355	0,00671606
-0,000837728	0,006776387	-0,001264329	0,007772915	-0,020060631	0,019531939
0,001503297	0,000325946	0,00172437	0,00049193	0,004333033	0,007805265
-0,000316623	-0,02124254	-0,000416594	-0,02124254	-0,002630487	-0,02124254
-0,02525184	-0,000499092	-0,02525184	-0,000753247	-0,02525184	-0,01195148
0,017179248	0,002037266	0,019705608	0,00268052	0,049516656	0,016925518
-0,000120619	-0,016803755	-0,000182043	-0,016803755	-0,002888405	-0,016803755
-0,061969245	-0,001478851	-0,061969245	-0,001478851	-0,061969245	-0,001478851
0,008017394	-0,001259937	0,009196422	-0,001901542	0,023108959	-0,030171039
-0,005206865	0,000130768	-0,005206865	0,00019736	-0,005206865	0,00313143

-0,005461632	-0,000941736	-0,005461632	-0,000941736	-0,005461632	-0,000941736
-0,015244614	0,000275799	-0,017486469	0,000416246	-0,043940358	0,006604415
0,002703271	-0,00277136	0,003556813	-0,00277136	0,022458666	-0,00277136
-0,000198279	-0,001653284	-0,00029925	-0,001896414	-0,00474808	-0,004765347
-0,005007751	0,01607228	-0,005744185	0,01607228	-0,014434106	0,01607228
-0,001006088	-0,00046635	-0,001154042	-0,000613598	-0,002899901	-0,00387442
0,000121209	0,004236847	0,00015948	0,004236847	0,001006997	0,004236847
0,004041788	-0,005614825	0,004041788	-0,006440534	0,004041788	-0,016183906
0,024672317	3,9778E-05	0,024672317	6,00343E-05	0,024672317	0,000952542
1,29962E-05	-1,0514E-05	1,96144E-05	-1,58681E-05	0,000311214	-0,000251774
-0,005573096	0,000536137	-0,005573096	0,000614981	-0,005573096	0,001545336
	0,000563088		0,000740879		0,004678111
	0,009087039		0,009087039		0,009087039
	0,001770696		0,001770696		0,001770696
	-0,000700801		-0,000700801		-0,000700801
	-0,00161758		-0,00161758		-0,00161758
	1,29911E-05		1,96067E-05		0,000311092
	-0,001771585		-0,001771585		-0,001771585
	7,1649E-05		8,21856E-05		0,000206518

Nota. Autores

Tabla 34

Sumatoria para la obtencion de los coeficientes K_T , K_Q de la helice Wageningen B.4-70.

Series polinómicas de la Hélice Modelo - Wageningen B.4-70; P/D = 0.9					
J=0.34		J=0.39		J=0.98	
$\Sigma = K_T$	$\Sigma = K_Q$	$\Sigma = K_T$	$\Sigma = K_Q$	$\Sigma = K_T$	$\Sigma = K_Q$
0,00880496	0,00379368	0,00880496	0,00379368	0,00880496	0,00379368
-0,06954836	0,001024821	-0,07977606	0,001348401	-0,20046292	0,008514167
0,1497159	-0,009865746	0,1497159	-0,011316591	0,1497159	-0,028436562
0,12807234	0,002792702	0,12807234	0,002792702	0,12807234	0,002792702
-0,011942255	-0,025755093	-0,015712949	-0,025755093	-0,099215755	-0,025755093
-0,103136657	-0,023135528	-0,118303813	-0,026537811	-0,297276248	-0,066684757
0,235552779	-0,006448053	0,235552779	-0,008483986	0,235552779	-0,053570154
0,0576172	0,106914087	0,0576172	0,106914087	0,0576172	0,106914087
-0,024509697	-0,005043846	-0,032248485	-0,005785588	-0,203625545	-0,014538143
0,05165316	0,018493056	0,05165316	0,018493056	0,05165316	0,018493056
0,074275502	0,025636558	0,08519837	0,02940664	0,214088213	0,073893607
-0,03525032	0,001973926	-0,03525032	0,002597181	-0,03525032	0,016399295
0,010442393	-0,002341527	0,011978039	-0,00308085	0,030098662	-0,019453309
-0,097465842	0,003756108	-0,097465842	0,004308477	-0,097465842	0,01082643
0,003392757	-0,0611006	0,003392757	-0,0611006	0,003392757	-0,0611006
-8,15347E-05	0,00153544	-0,000107279	0,002317341	-0,000677387	0,036768362
0,004635797	0,008261043	0,00699651	0,008261043	0,111010961	0,008261043
-0,024853486	0,000551886	-0,024853486	0,000633045	-0,024853486	0,001590729
0,004840564	0,00778904	0,006368943	0,00778904	0,040215205	0,00778904
-0,000971566	0,007859005	-0,001466323	0,009014741	-0,023265584	0,022652427
0,000926551	0,000378021	0,001062808	0,000570522	0,002670647	0,009052259
-0,000195149	-0,022172686	-0,000256766	-0,022172686	-0,001621289	-0,022172686
-0,024544788	-0,000520945	-0,024544788	-0,000786229	-0,024544788	-0,012474799
0,016698229	0,001913824	0,019153851	0,002518103	0,04813019	0,015899972
-0,000117242	-0,014207028	-0,000176946	-0,014207028	-0,00280753	-0,014207028
-0,064867499	-0,000911484	-0,064867499	-0,000911484	-0,064867499	-0,000911484
0,012397706	-0,001679916	0,014220898	-0,002535389	0,035734563	-0,040228052
-0,006521829	0,000127106	-0,006521829	0,000191834	-0,006521829	0,00304375

-0,009709568	-0,000667303	-0,009709568	-0,000667303	-0,009709568	-0,000667303
-0,027101536	0,000396019	-0,031087056	0,000597686	-0,078116192	0,009483262
0,004805816	-0,00211481	0,006323223	-0,00211481	0,039926517	-0,00211481
-0,000352496	-0,002556557	-0,000531999	-0,002932521	-0,008441032	-0,007368899
-0,007211162	0,020131244	-0,008271627	0,020131244	-0,020785113	0,020131244
-0,000950536	-0,000525712	-0,001090321	-0,000691703	-0,00273978	-0,004367595
0,000114516	0,003481817	0,000150674	0,003481817	0,000951394	0,003481817
0,007738125	-0,008983719	0,007738125	-0,010304855	0,007738125	-0,02589425
0,034434962	5,72803E-05	0,034434962	8,64494E-05	0,034434962	0,00137166
1,32231E-05	-9,93348E-06	1,99568E-05	-1,4992E-05	0,000316647	-0,000237872
-0,00837666	0,00102645	-0,00837666	0,001177399	-0,00837666	0,002958592
	0,001078049		0,001418436		0,008956383
	0,0140919		0,0140919		0,0140919
	0,001801611		0,001801611		0,001801611
	-0,001444912		-0,001444912		-0,001444912
	-0,002431308		-0,002431308		-0,002431308
	1,95264E-05		2,94699E-05		0,000467588
	-0,001941171		-0,001941171		-0,001941171
	7,85076E-05		9,00529E-05		0,000226287

Nota. Autores

La suma de estos coeficientes resulta tediosa, pero puede se calculó mediante de una hoja de cálculo en Excel y se obtuvo los siguientes rendimientos propulsivos en las 4 situaciones de RPM del motor.

Tabla 35

Rendimiento propulsivo de Helice Wageningen B.3-65.

Hélice Modelo - Wageningen B.3-65; P/D = 1.0			
J	K _T	10*K _Q	Eficiencia
0,34	0,32	0,506	0,342
0,39	0,3	0,478	0,390
0,84	0,099	0,192	0,688

0,98	0,034	0,099	0,545
------	-------	-------	-------

Nota. Autores

Tabla 36

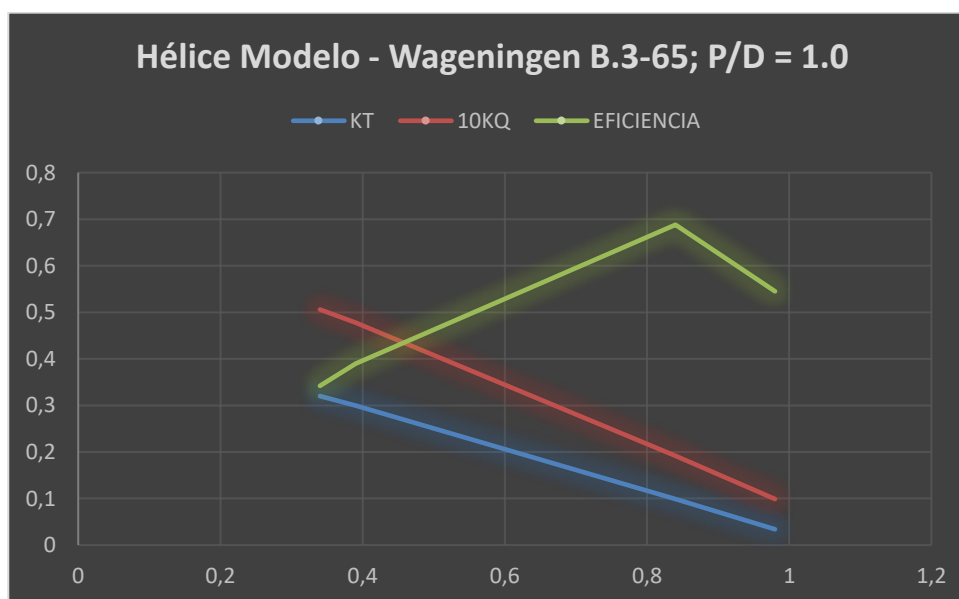
Rendimiento propulsivo de Wageningen B.4-70

Hélice Modelo - Wageningen B.4-70; P/D = 0,9			
J	K_T	$10 \cdot K_Q$	Eficiencia
0,34	0,288	0,411	0,380
0,39	0,268	0,386	0,430
0,84	0,059	0,127	0,620
0,98	-0,01	0,037	-0,448

Nota. Autores.

Figura 42

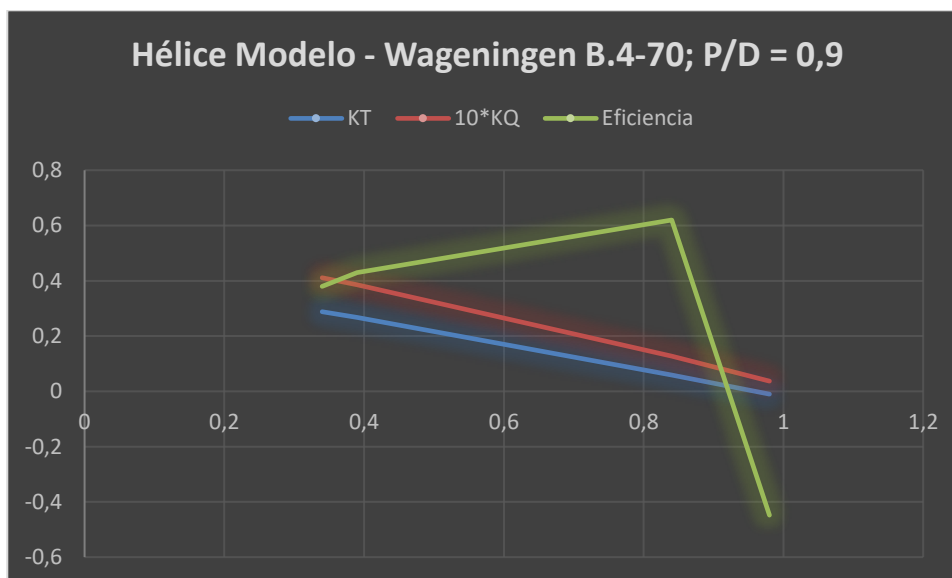
Rendimiento propulsivo de Wageningen B.3-65



Nota. Se observa una eficiencia máxima de 68% en $J=0.84$, lo cual indica que esta hélice es buena en operaciones de velocidad altas pero muy mala en relaciones de avance bajos, se observa un K_Q elevado, la resistencia experimentada por el motor es alta. Obtenido de Autores.

Figura 43

Rendimiento propulsivo de Wageningen B.4-70



Nota. Se observa una eficiencia máxima de 62% en $J=0.84$, lo cual indica que esta hélice es levemente menos optima en operaciones de velocidad altas pero muy levemente buena en relaciones de avance bajos, se observa un K_Q menos elevado, la resistencia experimentada por el motor es levemente baja en comparación a la hélice Wageningen B.3-65. Obtenido de Autores.

Análogicamente estos resultados son esperados puesto que como dice la definición de paso de hélice esta se comporta idealmente como un tornillo abriéndose paso por un medio solido en teoría, como tiene más paso Wageningen B.3-65, esta la podemos interpretar como una relación multiplicadora, ideal para embarcaciones de alta velocidad y Wageningen B.4-70 como

una relación reductora ofreciéndonos más par motor, ideal para embarcaciones de remolque y carga.

Para calcular teóricamente la potencia consumida, empuje efectivo y resistencia del sistema propulsor usaremos las ecuaciones 4 y 5.

Para la potencia consumida por la hélice. (MAN Energy Solutions, 2023, p. 21)

$$Q = \frac{P}{(2\pi n)} \quad (41)$$

Despejando las ecuaciones a nuestra variable requerida y usando los coeficientes K_T y K_Q ; se obtiene la energía en potencia consumida por la hélice Marina en el sistema propulsor.

$$P = 2\pi n * Q \quad (42)$$

$$T = K_T * \rho * n^2 * D^4 \quad (43)$$

$$Q = K_Q * \rho * n^2 * D^5 \quad (44)$$

Resolviendo e iterando para las condiciones de RPM establecidas se tiene el rendimiento energético propulsivo del túnel de cavitación tanto para la hélice Wageningen B.3-65; $P/D = 1.0$ y Wageningen B.4-70; $P/D = 0.9$

Tabla 37

Resultados teóricos de auditoria energetica de Helice Wageningen B.3-65

Hélice Modelo - Wageningen B.3-65; P/D = 1.0			
Sistema propulsor (Rpm)	Empuje (N)	Torque (N-m)	Potencia Hélice (kW)
1740	144,74	3,49	0,64
1500	100,85	2,45	0,38
700	7,25	0,21	0,02
600	1,83	0,08	0,01

Nota. Autores.

Tabla 38

Resultados teóricos de auditoria energetica de Helice Wageningen B.4-70

Hélice Modelo - Wageningen B.4-70; P/D = 0.9			
Sistema propulsor (Rpm)	Empuje (N)	Torque (N-m)	Potencia (kW)
1740	130,27	2,83	0,52
1500	90,09	1,98	0,31
700	4,32	0,14	0,01
600	-0,54	0,03	0,002

Nota. Cuando se requiera un análisis de hélices marinas este es el procedimiento eficaz,

analítico más preciso, puesto que los coeficientes polinómicos fueron basados en pruebas

Hidrodinámicas en Túneles de Cavitación, se puede observar la importancia del porqué de este

proyecto técnico e investigativo; podemos estimar el comportamiento hidráulico de cualquier

hélice marina existente de manera exacta por este método teórico y acompañándonos del TDC lo

reforzamos más. Obtenido de Autores.

El análisis permitió observar que las propelas del TDC solo consumen a toda máquina el 43% de la potencia total por el motor siendo esta 1.5 kW, por lo que el sistema propulsor se

establece en régimen de subcarga, situación que teóricamente nos denota que no se visualizara cavitación; Se recomienda a futuro realizar un mejoramiento de diseño. Siendo este un acoplamiento a una relación de transmisión multiplicadora; la cual se podrá aprovechar al máximo la potencia del motor.

Considere en la repotenciación las pérdidas por fricción mecánicas del eje propulsor y condiciones de ambiente. Se estima un factor de servicio para esa repotenciación del 0.92 valor obtenido de las tablas de “*Determinación de la Potencia Útil del Motor en las Diversas Condiciones de temperatura y Altitud*” de WEG (2026, p. 44), considerando que el motor se encuentra a una altura a nivel del mar, ambiente corrosivo y las pérdidas por fricción mecánicas se encuentran mayormente en el prensa estopas, componente de sellado del sistema.

Por lo que la potencia suministrada por el motor a la hélice máxima considerada en esa repotenciación debe ser.

$$DHP = P * F.S = 1.5kW * 0.92 \quad (45)$$

$$DHP = 1.38 kW \quad (46)$$

Esta es la potencia máxima que debe ocupar del motor para garantizar su vida útil, en futuras repotenciones mecánicas del diseño.

3.2 Túnel de Cavitación funcional y didáctico

Resultados del arduo trabajo de diseño y construcción se establece un banco de pruebas de hélices para la carrera de Ingeniería Marítima de carácter investigativo, en términos de sistemas propulsores de embarcaciones. Se predice mediante cálculos teóricos y CFD la aparición de la Cavitación en relaciones de avance aproximadas $J=0.30$

Figura 44

Resultados finales del diseño y construcción del TDC.



Nota. Elaboración propia

CONCLUSIONES

Se diseñó el túnel de cavitación valorando criterios de factibilidad teniendo en cuenta principalmente el factor económico y accesibilidad en el mercado, Se fabricó la máquina con buenas prácticas de manufactura metalmecánica; realizando un estudio de normalización de cada

componente mecánico presente en el sistema propulsor para garantizar su accesibilidad a repuestos comerciales presentes en el mercado ecuatoriano, para labores de mantenimiento preventivo y correctivo. Se diseñó un Sistema propulsor típico de embarcaciones intraborda, para estimar los resultados de propulsión de hélices más precisos. El alcance de este proyecto fue la construcción e implementación de este laboratorio de experiencias hidrodinámicas que permita incentivar el estudio de comportamiento de Hélices marinas en los estudiantes de nuestra carrera; se establece un método de estudio didáctico, teórico y sencillo para calcular los empujes, resistencias y potencias consumida por la hélice.

Este método de estudio implementa los coeficientes polinómicos de la serie estudiada en la ciudad de Países Bajos - Wageningen; se comprobó en esta tesis que es posible analizarlos. También se incorporó, ayudas y recomendaciones en procesos de manufactura por arranque de viruta. Se establece también el comportamiento propulsivo del Túnel que opera en condiciones de Numero de Reynolds menores a 150000; mismo que es importante para estimar la precisión del Túnel, se comprobó en esta tesis que es importante, ya que el numero de Reynolds es proporcional a la dimensión de la Hélice. Por lo que hélices reales operan en Reynolds críticamente Turbulentos. También se establece que los parámetros físicos a manipular en el Túnel son la relación de avance y el Numero de Cavitación, la observación de este fenómeno dependerá mas de este ultimo parámetro.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda principalmente mejorar las condiciones de la maquina respecto a los sensores de medición para medir el rendimiento propulsivo de las hélices, estipulando que la maquina por el momento es de carácter visual y didáctico.

- Cada Repotenciación de la maquina debe considerar su cálculo previo para no forzar, ni dañar la planta propulsora y debe analizarse como en el apartado de teoría de la hélice para la obtención de sus rendimientos propulsivos y auditorías energéticas del sistema propulsor.
- Se recomienda agregar sensores de empuje y torque en el eje propulsor para medir las fuerzas dinámicas presentes en el mismo, obteniendo resultados más precisos.
- El fluido usado en el TDC debe tener la menor cantidad de sales minerales posibles para evitar el aceleramiento de la corrosión, asimismo como no dejar reposar el fluido en las tuberías de almacenamiento.
- Para controlar el Numero de cavitación; mismo que controla la presión Hidrostática del sistema, se recomienda acoplar una Bomba de Vacío, para acercarnos al punto más cercano a la presión de vapor del agua a 25 °C el cual es 3540 Pascales, punto donde se predice la aparición de la cavitación incluso en relaciones de avances medias.
- Integrar Sensores de medición, cámaras de altas velocidades, Hidrófonos para garantizar un estudio más completo de la Cavitación en la Hélice que usted diseñe.
- Nos es grato saber que usara la maquina con fines investigativos, esperando que se logre grandes descubrimientos en ella, Siéntase libre de usarla a su favor para involucrarse en el estudio de Hélices Marinas.

Bibliografía

- ACESCO. (13 de mayo de 2019). *El acero, un material de reciclaje infinito*. Obtenido de ACESCO: <https://acesco.com.ec/el-acero-un-material-de-reciclaje-infinito/>
- AIMS Industrial. (28 de junio de 2026). *Drill Speed Chart: Cutting Speeds & Feeds for HSS, Cobalt & Carbide*. Obtenido de AIMS Industrial: <https://aimsindustrial.com.au/blogs/product-guides/cutting-speeds-feeds-chart>
- Alves Pereira , F., Boucheron , R., Boucetta , D., Fetherstonhaugh , C., Krol , P., Pang, Y., . . . Viitanen , V. (julio de 2024). *ITTC Recommended Procedures and Guidelines*. Obtenido de Visual Description and Measurement of Cavitation Events: <https://www.ittc.info/media/11816/75-02-03-032.pdf>
- ASME. (2024). *B31.3 - Process Piping*. Obtenido de The American Society of Mechanical Engineers: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b313-2018-process-piping/2024/pdf>
- ASOCIACIÓN DE INGENIEROS NAVALES Y OCEÁNICOS DE ESPAÑA. (31 de mayo de 2013). *10 Canales de Ensayos Hidrodinámicos*. Obtenido de Revista de Ingeniería Naval: <https://sectormaritimo.es/10-canales-de-ensayos-hidrodinamicos#share>
- Bale, E. (14 de junio de 2022). *Types Of Oxy Acetylene Welding Flames*. Obtenido de Mewelding: <https://mewelding.com/oxyfuel-flame-adjustment-and-flame-type/>
- Beeson, C. (9 de diciembre de 2016). *What difference does fouling make?* Obtenido de yachting monthly: <https://www.yachtingmonthly.com/sailing-skills/difference-fouling-make-54330>
- BELZONA. (junio de 2008). *BELZONA REPARA HÉLICE CON DAÑOS CAUSADOS POR CAVITACIÓN*. Obtenido de BELZONA:

https://khia.belzona.com/khia/BELZONA_REPARA_H%C3%89LICE_CON_DA%C3%91OS_CAUSADOS_POR_CAVITACI%C3%93N

Bocanegra, J., Borelli, D., Gaggero, T., Picó, R., & Tani, G. (2025). Acoustic characterization of a cavitation tunnel for ship propeller. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 10(3), 330-341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joes.2024.02.001>

Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Hill. doi:ISBN 978-607-15-0771-6

Captain propeller. (22 de agosto de 2025). *Soluciones de cavitación para hélices de barcos 2025: mejora de la eficiencia*. Obtenido de Captain propeller: <https://captainpropeller.com/es/blog/propeller-cavitation-solutions/>

Carlton, J. S. (2007). Cavitation testing of propellers. En J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion* (2 ed., págs. 235-239). Oxford: Butterworth-Heinemann.

De Luis, E. (14 de marzo de 2026). *Los barcos llevan siglos dañando los océanos con ruido. Alemania trabaja en unas hélices silenciosas para solucionarlo*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/transporte/barcos-llevan-siglos-danando-oceanos-ruido-asi-que-alemania-trabaja-unas-helices-silenciosas-para-solucionarlo>

DIN – 6885/1 . (1934). *DIMENSIONES CHAVETEROS Y CHAVETAS*. Obtenido de DIN – 6885/1 : https://www.jymsoldevilla.net/archivos/upload/170810202921_chavet.pdf

Duramax Marine. (2015). *Cojinetes de manguito y rodamientos bridados*. Obtenido de Duramax Marine: https://www.duramaxmarine.com/pdf/Sleeve-Flanged-Bearing_web_ESP.pdf

EUROPER. (2021). *Ficha Técnica Aceros Inoxidable*. Obtenido de EUROPER: <https://europers.cl/wp-content/uploads/2021/11/FICHAS-TECNICA-ACERO-INOX.304-304L.pdf>

Flowers, P., Theopold, K., Langley, R., & Robinson, W. (2022). *Química 2ed*. Houston, Texas: OpenStax .

Fondear, S. (2010). *Reparar una hélice dañada*. Obtenido de Fondear:

https://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores_Helices/Helices_Reparar/Helices_Reparar.asp

Franc, J. P., & Michel, J. M. (2005). *Fundamentals of Cavitation*. Springer Science + Business Media. doi:<https://doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>

Frankland, T. (1998). *Trazado de plantillas para tubos*. LIMUSA NORIEGA EDITORES.

doi:https://mariosantos.weebly.com/uploads/1/7/1/8/17185162/trazado_de_plantilla_para_tubos.pdf

FRIENDSHIP SYSTEMS AG. (2025). *B-Series Propeller Generator*. Obtenido de

FRIENDSHIP SYSTEMS AG: <https://www.wageningen-b-series-propeller.com/>

Gerling, H. (2014). Alrededor de las maquinas. En G. Heinrich, *Alrededor de las maquinas herramientas* (pág. 147). Reverté S.A.

Hentschel, W. (2019). *Design and construction of a propeller open water testing apparatus and testing of a stereolithography 3D printed model propeller*. Obtenido de Massachusetts Institute of Technology: <https://hdl.handle.net/1721.1/122139>

Iguren. (2026). *Aplicaciones y Usos de los variadores de frecuencia*. Obtenido de Iguren:

https://iguren.es/blog/aplicaciones-y-usos-de-los-variadores-de-frecuencia/?srltid=AfmBOopHhE1yXX8cWquzn_uJFFiEHw_PqZGOn08c2Hvov2TB2t7MYeP7

INDURA, S. (marzo de 2007). *Sistema de Materiales y Soldadura*. INDURA.

doi:<https://elraymaker.com/wp-content/uploads/2020/08/Manua-de-Procesos-y-Productos-de-Soldadura-Indura.pdf>

ITTC. (1999). *Terminology and Nomenclature for Propeller Geometry*. International Towing Tank Conference. International Towing Tank Conference. Obtenido de <https://ittc.info/media/1806/75-01-02-01.pdf>

ITTC. (septiembre de 2016). *Fresh Water and SeaWater Properties*. Obtenido de ITTC: <https://www.ittc.info/media/7989/75-02-01-03.pdf>

ITTC. (abril de 2017). *Propulsion/Bollard Pull Test*. Obtenido de International Towing Tank Conference : <https://www.ittc.info/media/8011/75-02-03-011.pdf>

ITTC. (2026). *The International Towing Tank Conference*. Obtenido de Welcome to ITTC: <https://ittc.info/>

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. PEARSON EDUCACION. doi:978-970-26-1026-7

Lafeber, F., Bosschers, J., Lidtke, A., Lloyd, T., Wijngaarden, E., & Moulijn, J. (2022). Prediction of Underwater Radiated Noise from Propeller Cavitation During Concept Design. *7th International Symposium of Marine Propulsors*, 17(21), 1-13.
doi:https://www.researchgate.net/publication/365233056_Prediction_of_Underwater_Radiated_Noise_from_Propeller_Cavitation_During_Concept_Design

Lewotsky, K. (17 de diciembre de 2019). *VFDs: The Next Best Thing to Motion Control*. Obtenido de Association for Advancing Automation: <https://www.automate.org/motion-control/industry-insights/vfds-the-next-best-thing-to-motion-control>

Lincoln Electric. (2026). *Teoría del Oxícorde con Gas*. Obtenido de Harris Products Group:

<https://www.harrisproductsgroup.com/es-MX/Resources/Knowledge-Center/Articles/Theory-of-Oxy-Fuel-Gas-Cutting>

Lloyd's Register. (2026). Sección 3 Diseño. En L. Register, *Reglas y reglamentos de la LR-RU-001 para la clasificación de buques, julio de 2025 - Parte 5 Maquinaria principal y auxiliar - Capítulo 6 Eje principal de propulsión*. Lloyd's Register.

MAN Energy Solutions. (2023). Propeller Propulsion. *MAN Energy Solutions*, 17-30. Obtenido de MAN Energy Solutions.

MARIN. (2026). *Maritime Research Institute Netherlands*. Obtenido de Cavitation Tunnel:

<https://www.marin.nl/en/about/facilities-and-tools/basins/cavitation-tunnel>

MAUCOUR - FRANCE. (2026). *PROPELLERS REPAIRING SERVICE*. Obtenido de

MAUCOUR - FRANCE: <https://www.maucour.fr/en/propellers-repairing-service-en>

Metalhierro S.A. (2026). *TUBO REDONDO CEDULA 40 NEGRO*. Obtenido de MetalHierro:

<https://metalhierro.com/producto/2560-tubo-redondo-cedula-40-negro>

Navegacion Costera. (12 de marzo de 2012). *La cavitacion*. Obtenido de Navegacion Costera:

<https://navegacioncostera.blogspot.com/2012/03/la-cavitacion.html>

Nirav , S., Prathmesh , S., & Bansal , S. (2017). SUPERCAVITATION. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6(4), 148-154. doi:<https://www.ijarse.com>

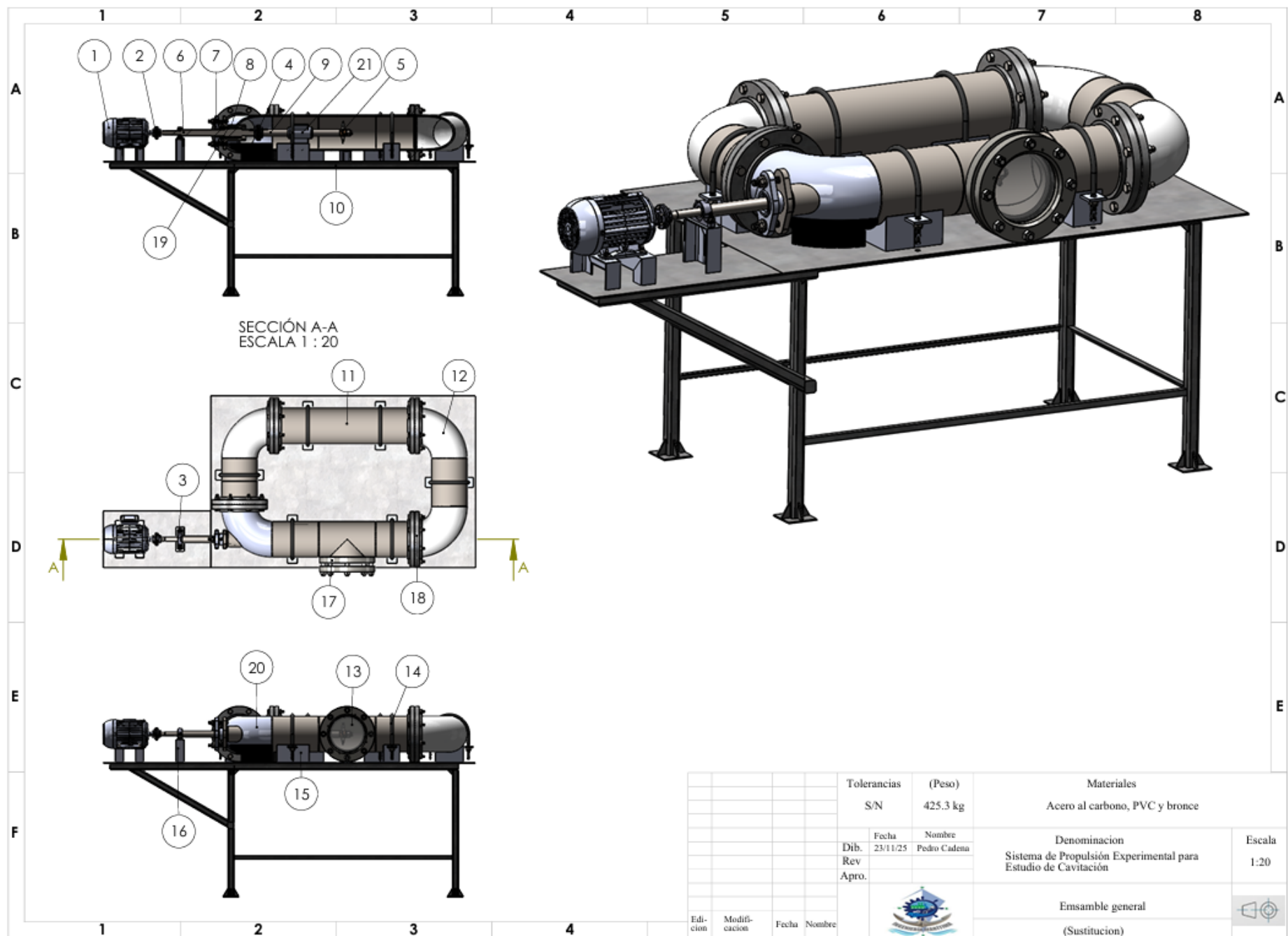
Njaastad, E., Sverre Steen, & Olav Egeland. (2022). Identification of the geometric design parameters of propeller blades from 3D scanning. *Journal of Marine Science and Technology* (2022), 887-906.

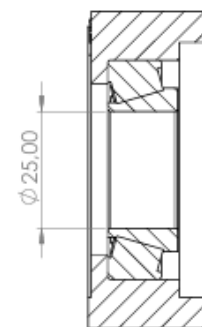
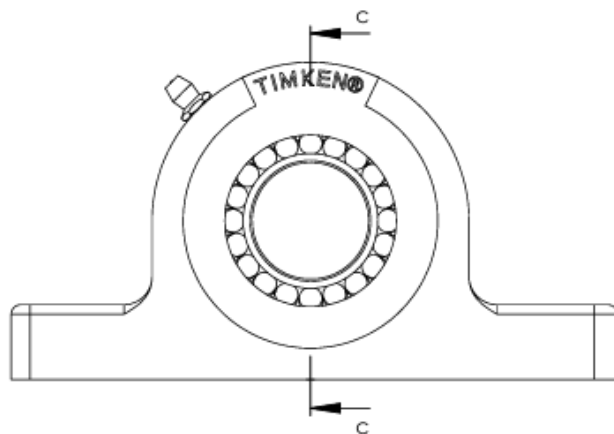
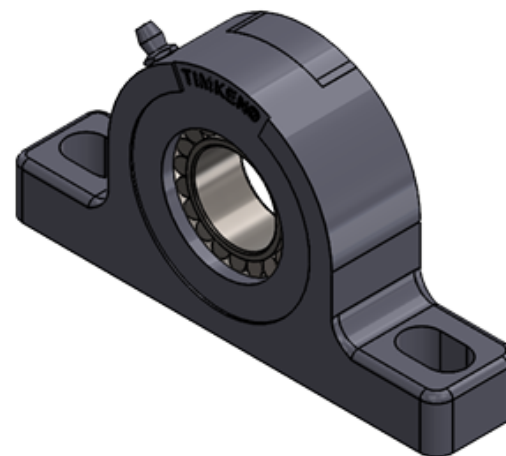
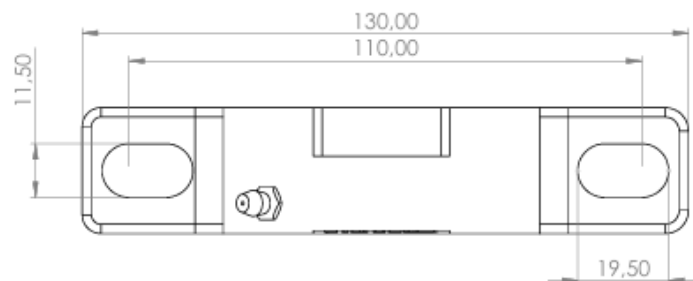
- NOAA Fisheries. (26 de abril de 2026). *Ruido del Oceano*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise>
- Norton, R. (2004). El proceso de diseño . En R. L. Norton, *DISEÑO DE MAQUINARIA* (págs. 6-12). Massachusetts: The McGraw-Hill.
- Oliveira , P. (2025). Marine Propellers. En P. H. Silva, *Design, Optimization and Structural Analysis of a Marine Propeller*. (págs. 3-6). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Osorio, F., Bula, A., & Durango, N. (26 de marzo de 2007). Diseño de una helice supercavitante. *Ciencia & Tecnología de Buques.*, 1(1), 7-15.
doi:<https://shipjournal.co/index.php/sst/article/view/2>
- Quesada , J. (26 de febrero de 2026). *National Geographic España*. Obtenido de Hélices silenciosas, la clave para salvar la vida marina sin renunciar al transporte marítimo.: https://www.nationalgeographic.com.es/tecnologia/helices-silenciosas-clave-para-salvar-vida-marina-sin-renunciar-transporte-maritimo_27626
- Rapp, B. (2017). Froude Number. En B. E. Rapp, *Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics* (págs. 243-263). Elsevier.
- Sezen, S., & Atlar, M. (2022). Mitigation of Hub Vortex Cavitation with Application. *Journal of Marine Science and Engineering* , 10(10), 13-14.
doi:<https://doi.org/10.3390/jmse10101426>
- Sole Advance. (2026). *Hélices 4 palas fijas high skew para eje Solé*. Obtenido de Sole Advance: <https://soleadvance.com/en/sole-4-blades-high-skew-shaft-fixed-propellers-fa1853>

- Southern Ocean Marine Engineering . (24 de noviembre de 2025). *helices convencionales vs sharrow vs toroidales diferencias clave*. Obtenido de Southern Ocean Marine Engineering Solutions: <https://southern-oceanmarine.com/es/helices-convencionales-vs-sharrow-vs-toroidales-diferencias-clave/>
- Tadeusz, K., & Agnieszka , G. (2006). El Elefante de Plata: Túnel de cavitación construido con una precisión de centésimas de milímetro. *Revista ABB*, 10-13.
- Tupper, E. C. (2013). *Introduction to Naval Architecture (Fifth Edition)* (5 ed.). Butterworth-Heinemann. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098237-3.00008-4>
- WEG. (2026). *GUÍA DE ESPECIFICACIÓN DE MOTORES ELECTRICOS*. WEG. doi:<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- WITTE, J., & ESVELDT, J. (1966). RECENT IMPROVEMENTS IN THE LARGE CAVITATION. *International Shipbuilding Progress*, 326-355.
- Yachting News. (10 de julio de 2024). *Helices de superficie Luca Radice*. Obtenido de The International Yachting Media: <https://www.yachtingnews.com/es/helices-de-superficie-luca-radice/>

ANEXOS.

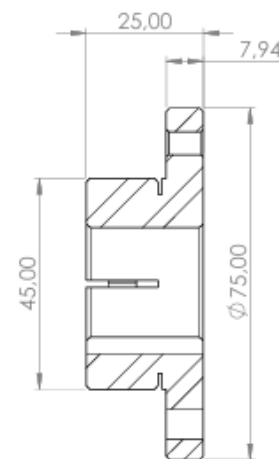
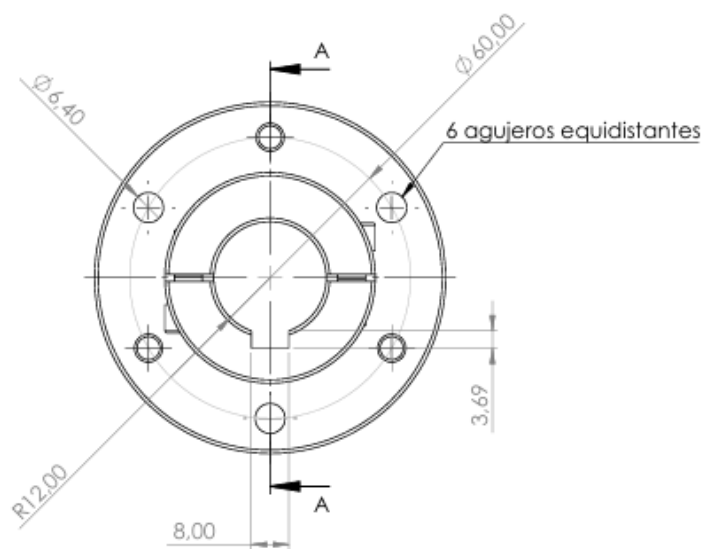
ANEXO A:
PLANOS DEL TUNEL DE CAVITACION CON FINES DIDACTICOS PARA LA
CARRERA DE INGENIERIA MARITIMA (NORMA DE DIBUJO CPE INEN 003).





SECCIÓN C-C

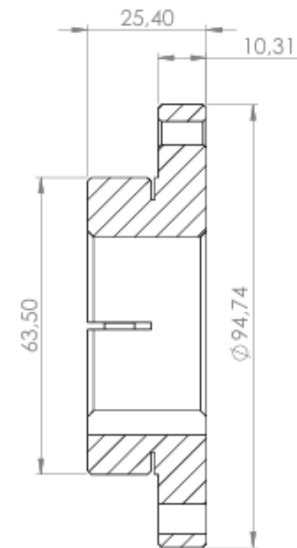
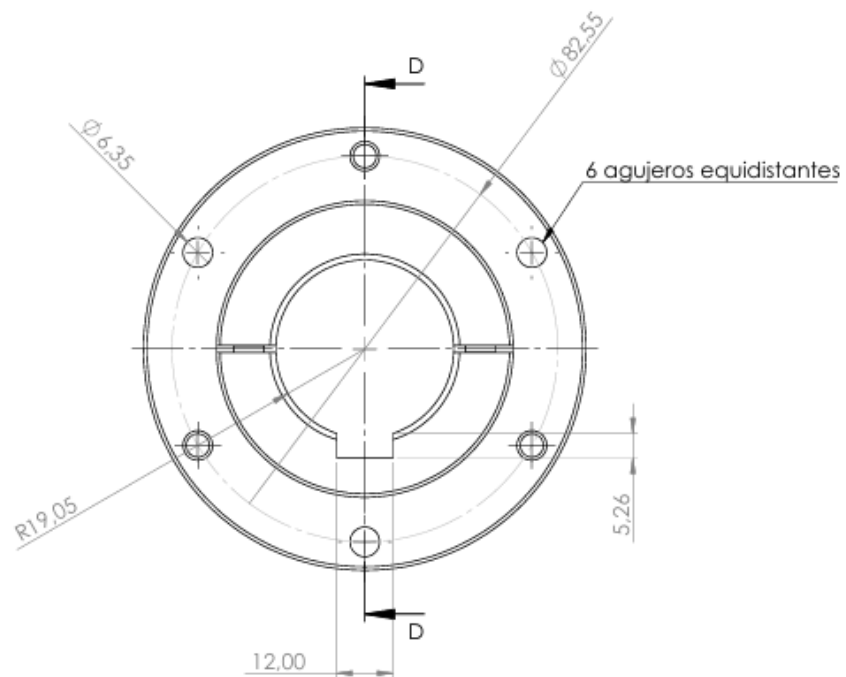
						Tolerancias	(Peso)	Materiales	
						S/N	0.200 kg	Acero al carbono	
						Fecha	Nombre	Denominacion	Escala
						23/11/25	Pedro Cadena	Chumacera de carga mixta para eje de 25 mm	1:1
						Dib.			
						Rev			
						Apro.			
								TIMKEN - 02	
Edi-	Modifi-	Fecha	Nombre					(Sustitucion)	
cion	cacion								



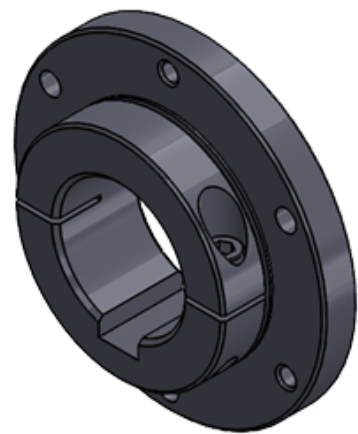
SECCIÓN A-A



				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				S/N	0.300 kg	Acero al carbono	
				Fecha	Nombre	Denominacion	Escala
				Dib. 23/11/25	Pedro Cadena	Brida acople para eje 24 mm	1:1
				Rev.			
				Apro.			
						ING-MAR-2025(2) - 01	
Edi- cion	Modifi- cacion	Fecha	Nombre			(Sustitucion)	

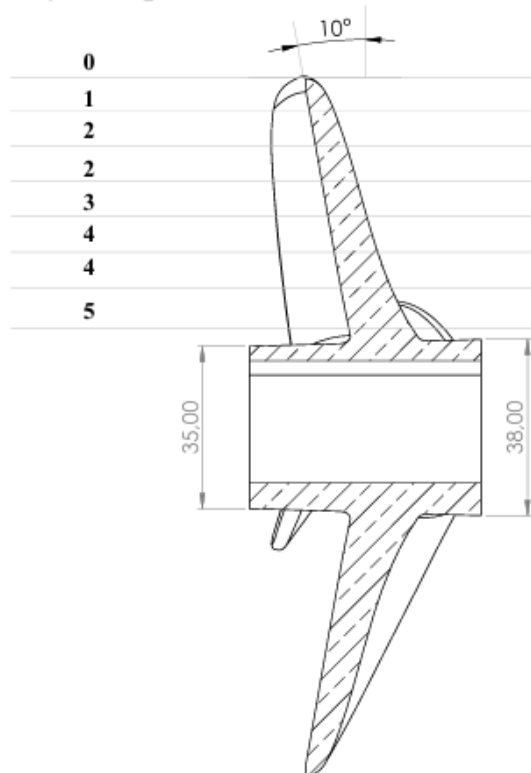


SECCIÓN D-D



				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				S/N	0.300 kg	Acero al carbono	
				Fecha	Nombre	Denominacion	Escala
				Dib. 23/11/25	Pedro Cadena	Brida acople para eje 1.5" (38.10 mm)	1:1
				Rev.			
				Apro.			
							
				ING-MAR-2025(2) - 03			
				(Sustitucion)			
Edi- cion	Modifi- cacion	Fecha	Nombre				

Ley de espesores

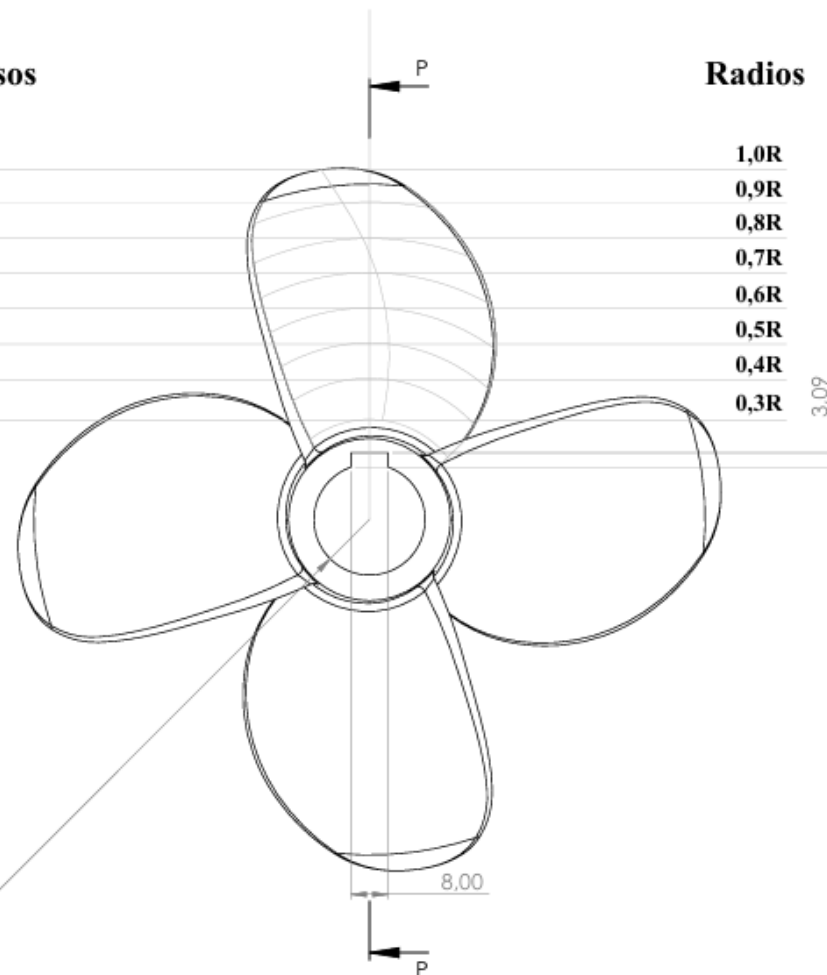


Ley de pasos

137,16
137,16
137,16
137,16
137,16
136,06
130,30
121,66

Radio

1,0R
0,9R
0,8R
0,7R
0,6R
0,5R
0,4R
0,3R



SECCIÓN P-P
ESCALA 1 : 1

Tolerancias		(Peso)	Materiales	
S/N		0.250 kg	Aluminio	
Fecha		Nombre	Denominacion	
23/11/25		Pedro Cadena	Helice serie B- P/D=0.9 - EAR=0.7	
Dib.			Escala	
Rev			1:1	
Apro.			ING-MAR-2025(2) - 01	
			(Sustitucion)	
Edi- cion	Modifi- cacion	Fecha	Nombre	

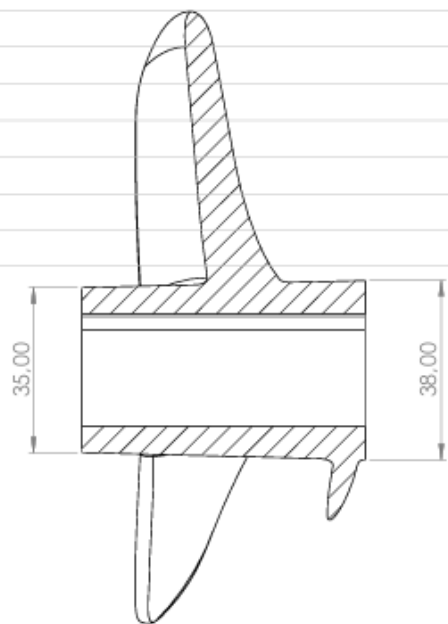
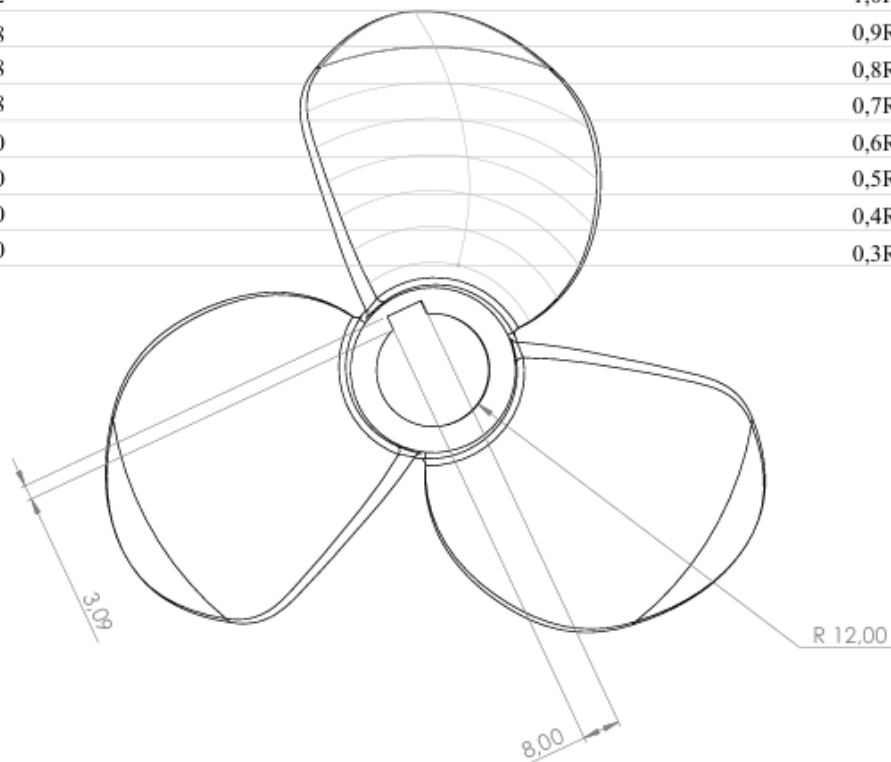
Ley de espesores

0
1
2
3
3
4
5
5

Ley de pasos

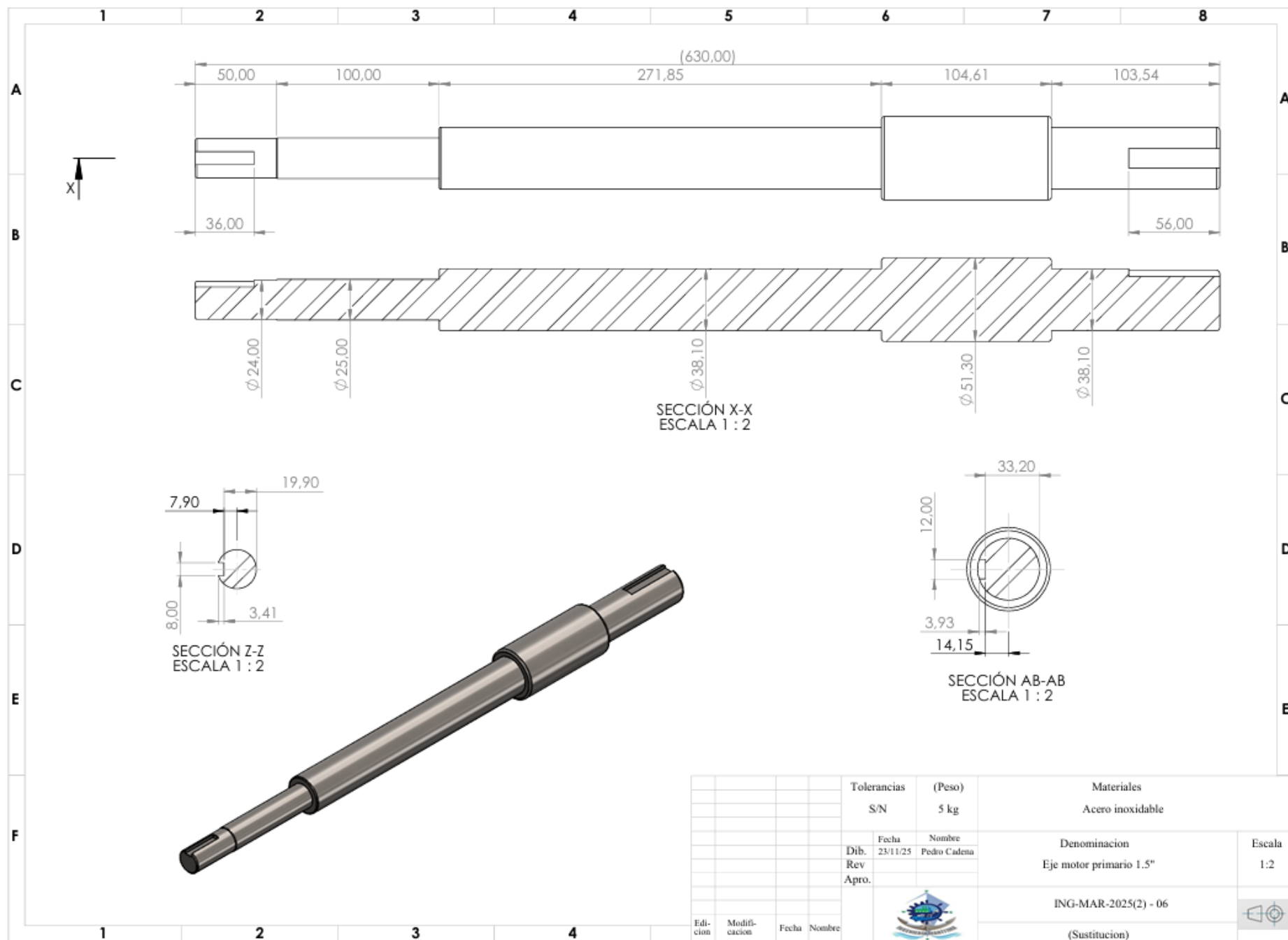
134,42
135,18
144,78
151,18
152,40
152,40
152,40
152,40

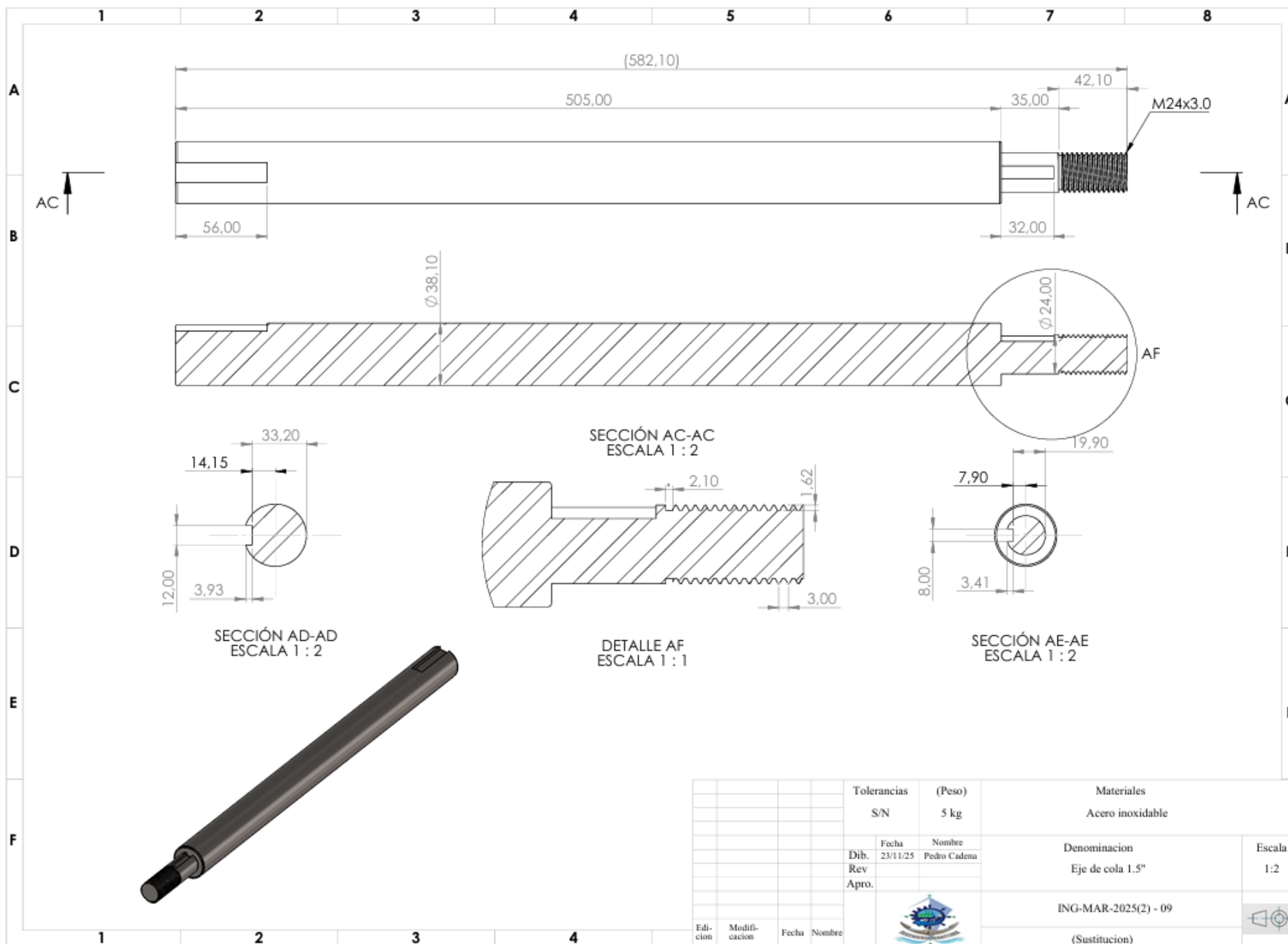
RADIOS

1,0R
0,9R
0,8R
0,7R
0,6R
0,5R
0,4R
0,3RSECCIÓN AD-AD
ESCALA 1 : 1

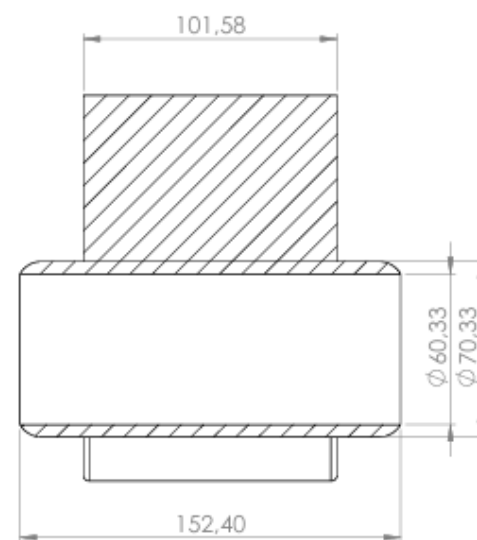
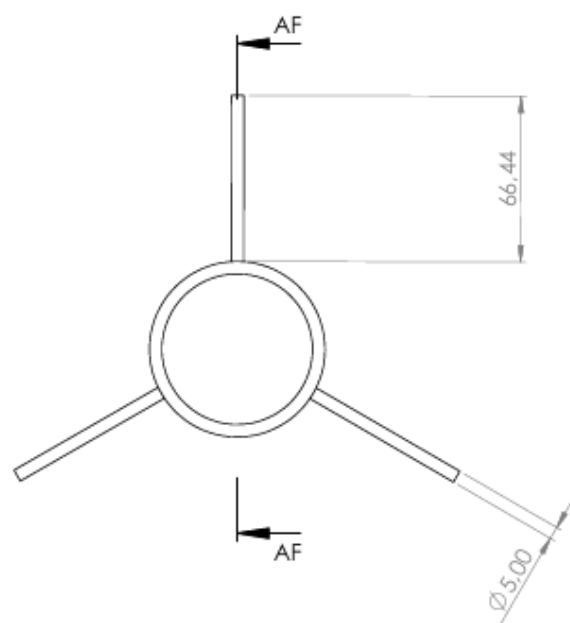
AD

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

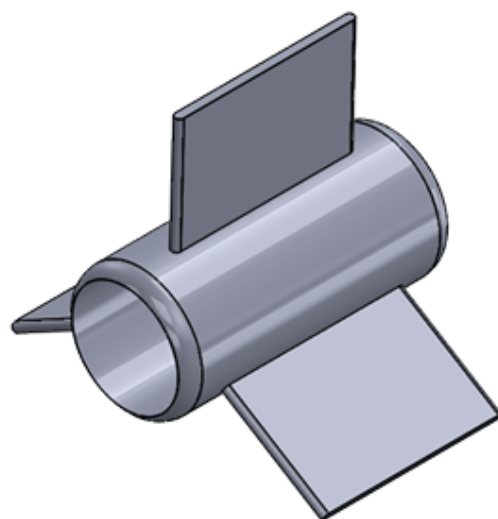




																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

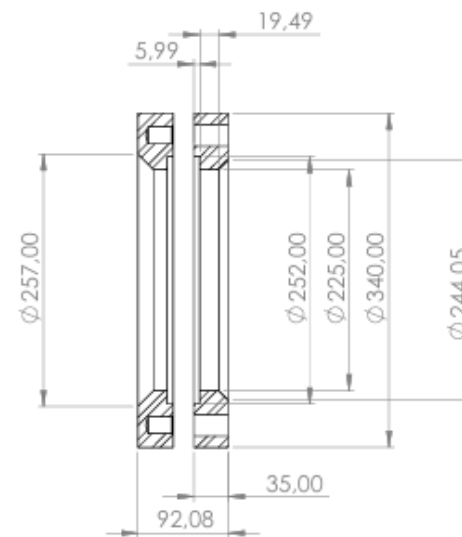
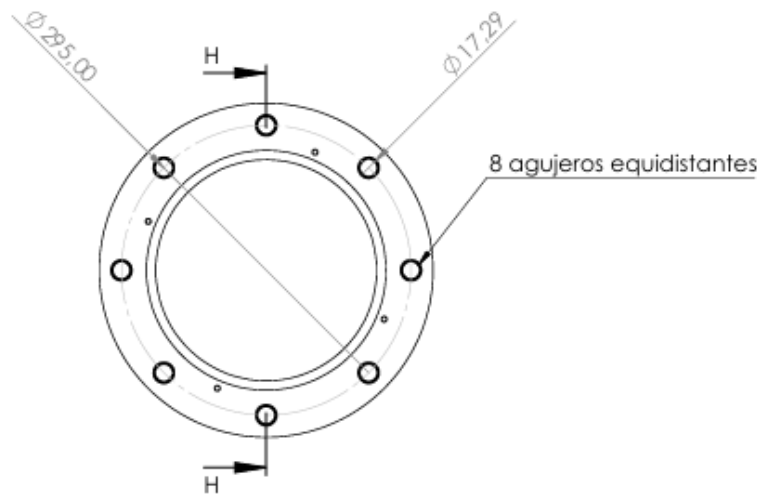


SECCIÓN AF-AF



						Tolerancias	(Peso)	Materiales	
						S/N	5 kg	Acero al carbono	
						Dib.	Fecha	Nombre	Denominacion
						Rev.	23/11/25	Pedro Cadena	
						Apro.			
									Escala
									1:2
							</		



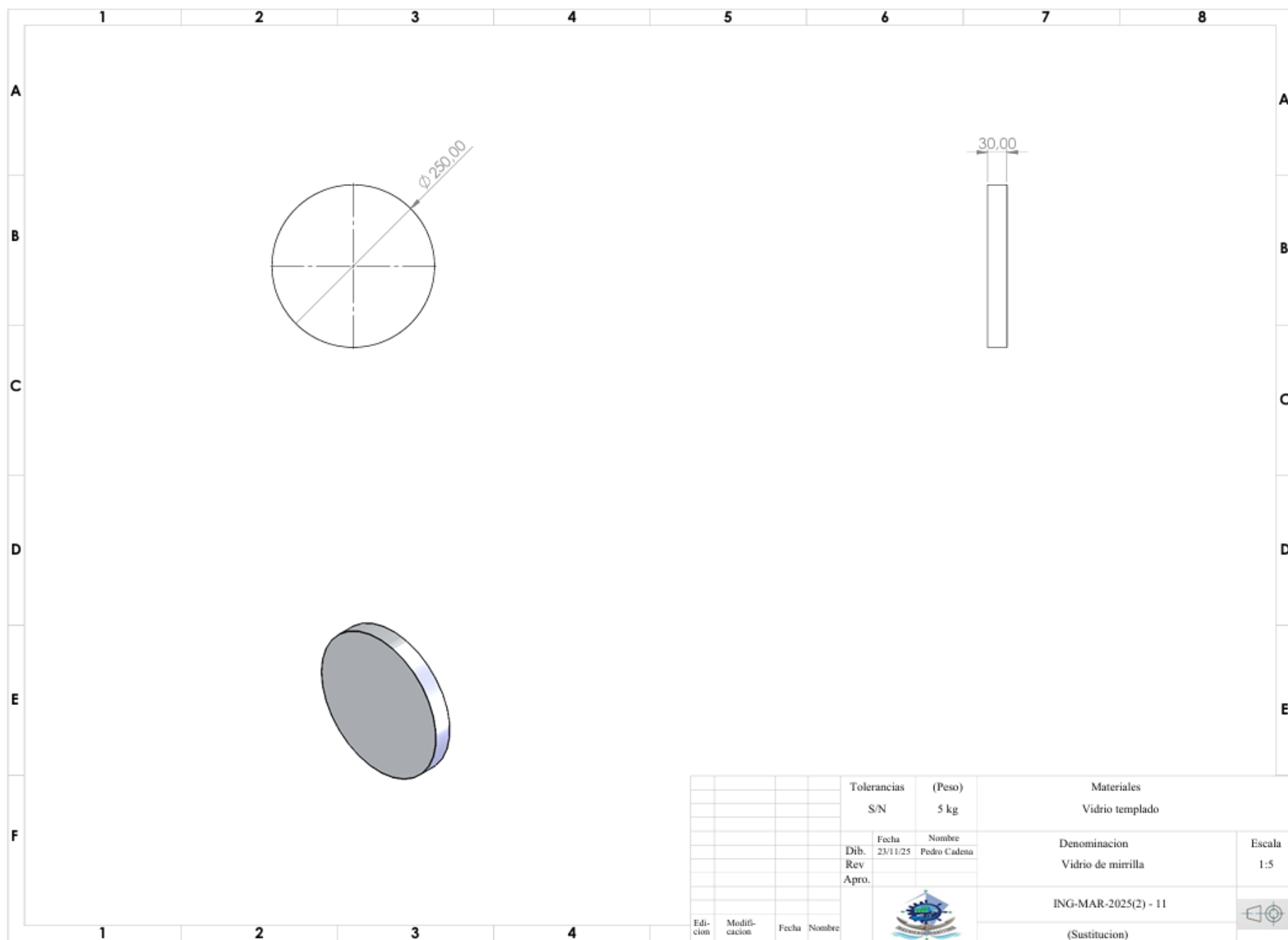


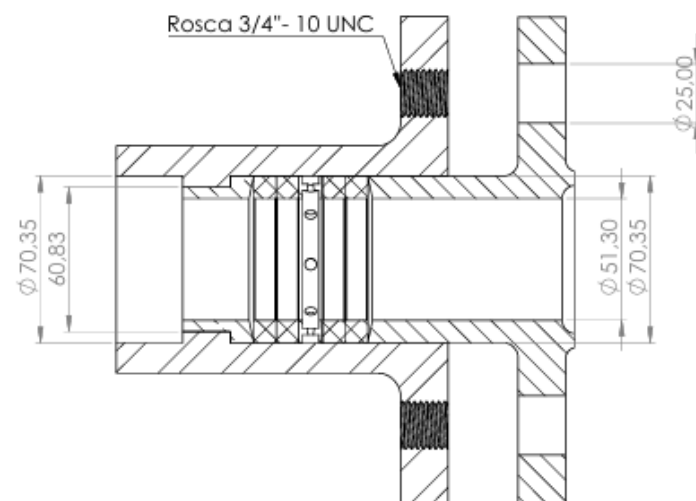
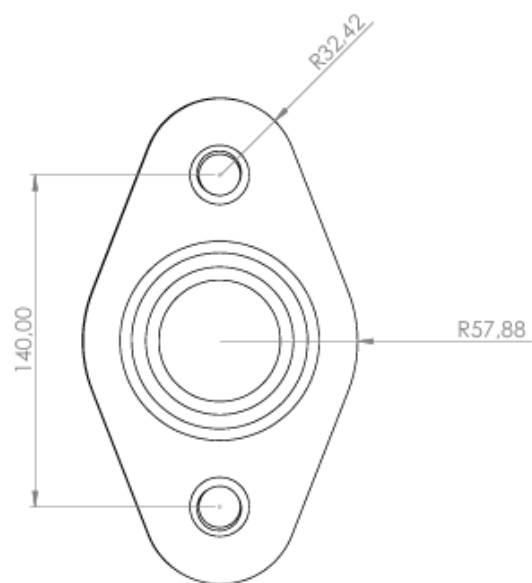
SECCIÓN H-H



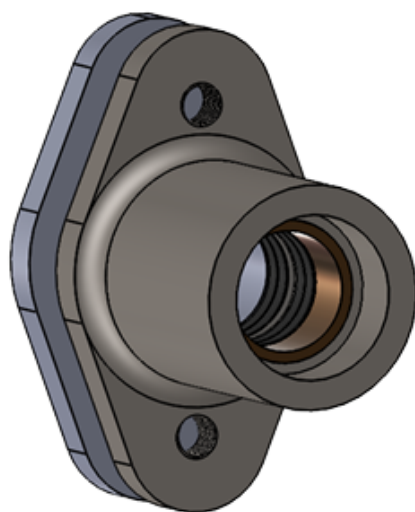
Tolerancias		(Peso)		Materiales	
S/N		5 kg		Acero al carbono, vidrio templado	
Fecha		Nombre		Denominacion	
Dib. 23/11/25		Pedro Cadena		Mirilla bridada de 8"	
Rev				Escala	
Apro.				1:5	
				ING-MAR-2025(2) - 15	
				(Sustitucion)	
Edi- cion	Modifi- cacion	Fecha	Nombre		



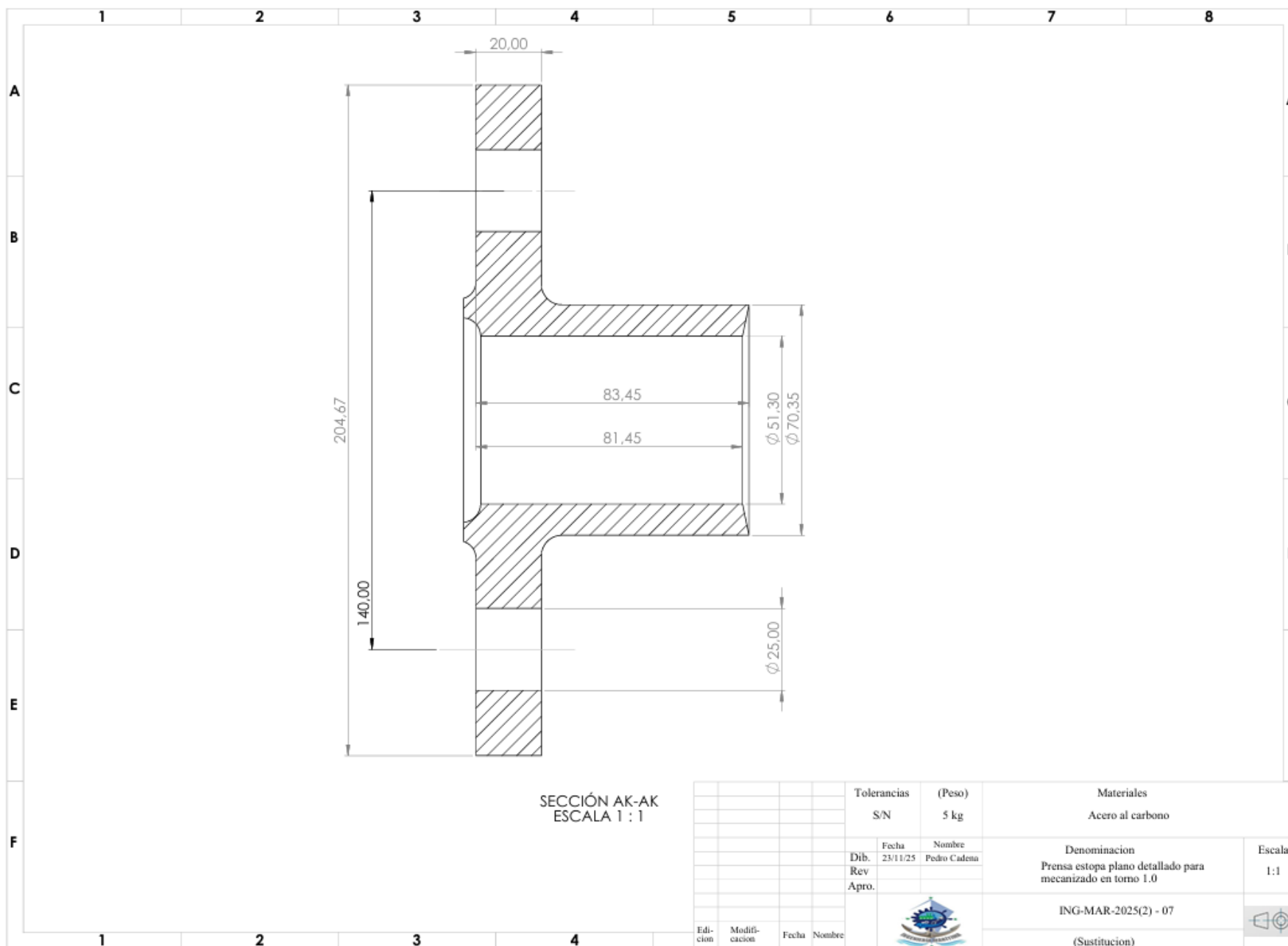


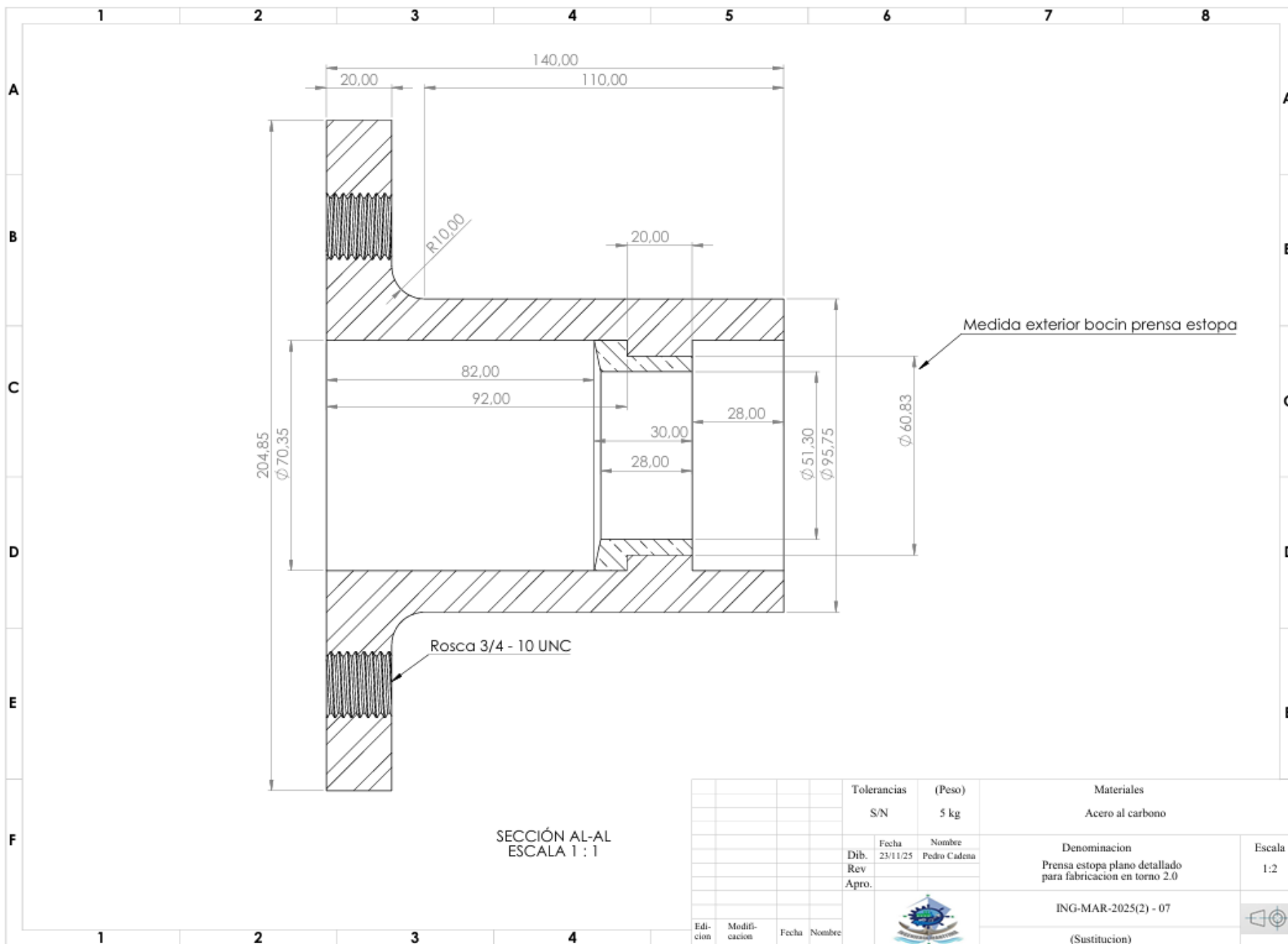


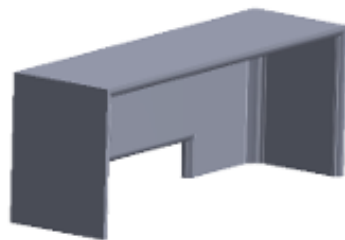
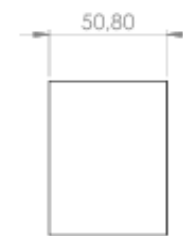
SECCIÓN A1-A1



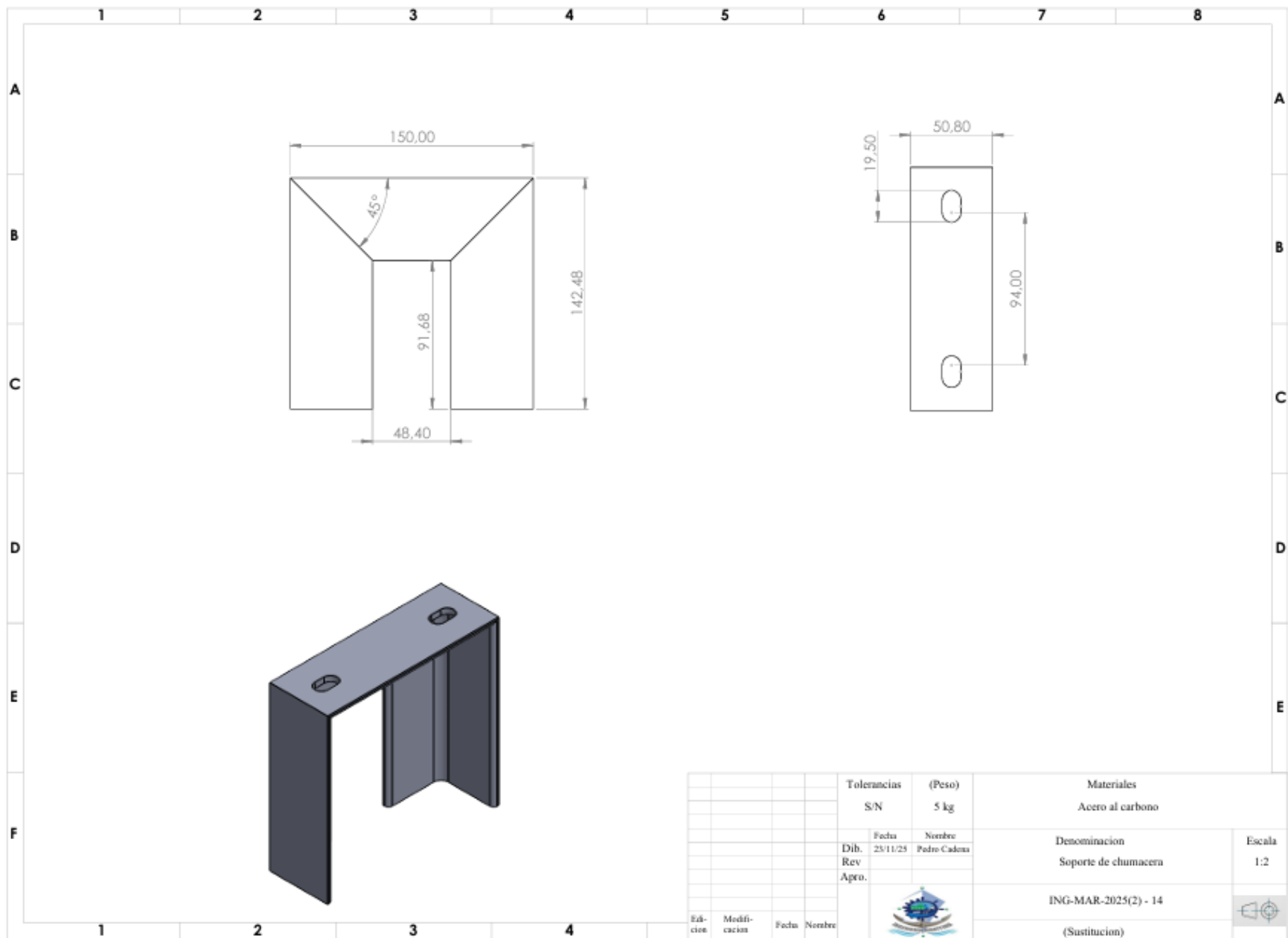
						Tolerancias	(Peso)	Materiales	
						S/N	5 kg	Acero al carbono	
						Fecha	Nombre	Denominacion	Escala
						23/11/25	Pedro Cadena		
						Dib.			
						Rev		Prensa estopa	1:2
						Apro.			
								ING-MAR-2025(2) - 07	
								(Sustitucion)	
Edi- cion	Modifi- cacion	Fecha	Nombre						

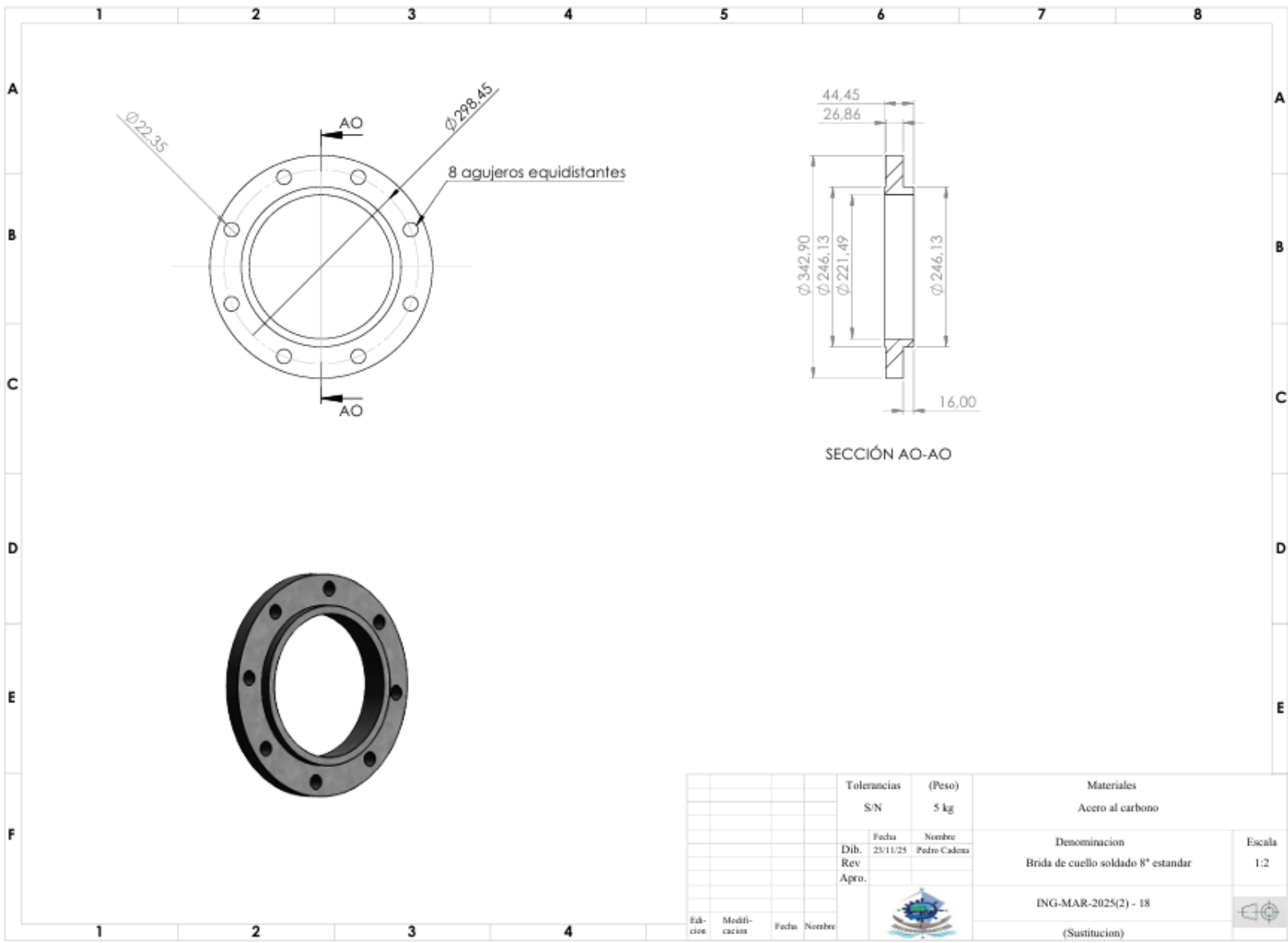




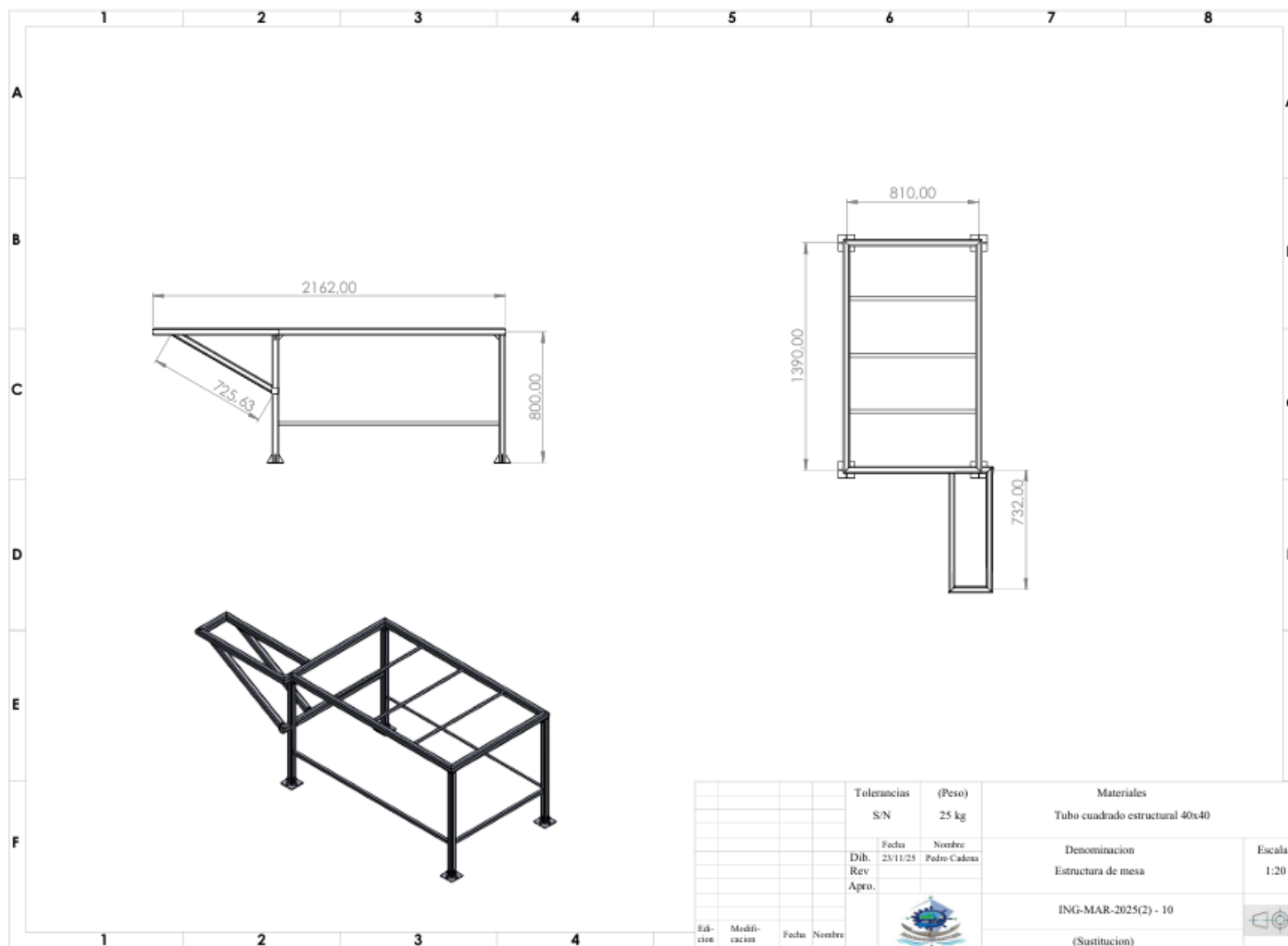


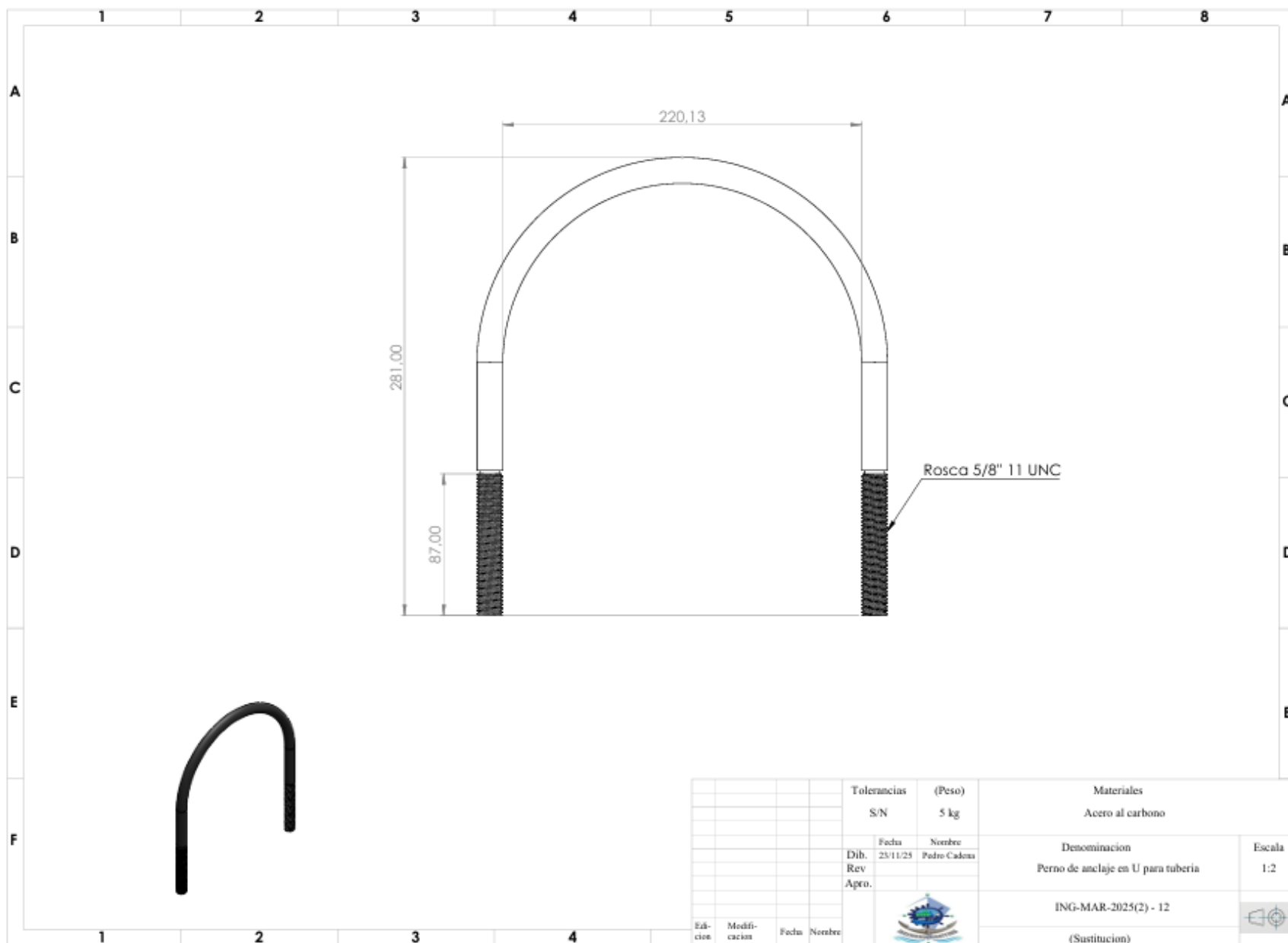
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				S/N	5 kg	Acero al carbono	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
			Dib.	23/11/23	Pedro Cadena	Soporte de tuberías	1:2
			Rev.				
			Apro.				
						ING-MAR-2025(2) - 13	
						(Sustitucion)	
Edi-	Modifi-	Fecha	Nombre				
ción	cación						





				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				S/N	5 kg	Acero al carbono	
				Fecha	Nombre	Denominacion	Escala
				Dib. 25/11/25	Pedro Cadena	Brida de cuello soldado 8* estandar	1:2
				Rev			
				Apro.			
Edi-	Modifi-	Fecha	Nombre	ING-MAR-2025(2) - 18			
cion	cacion			(Sustitucion)			

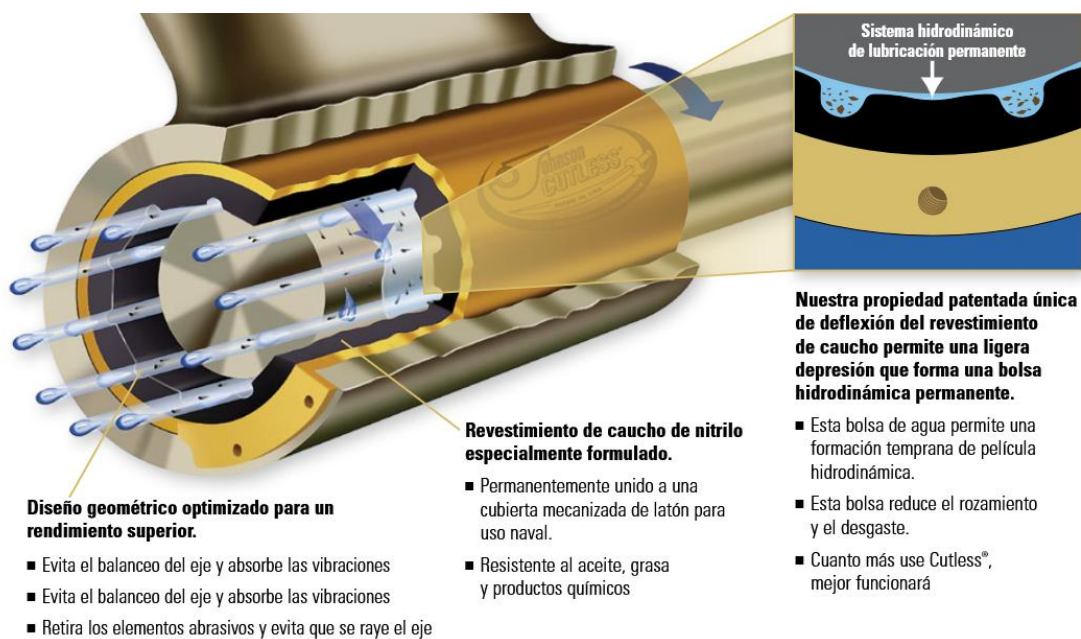




ANEXO B

Figura 45

Prestaciones novedosas de Bocines Jonhson Cutless



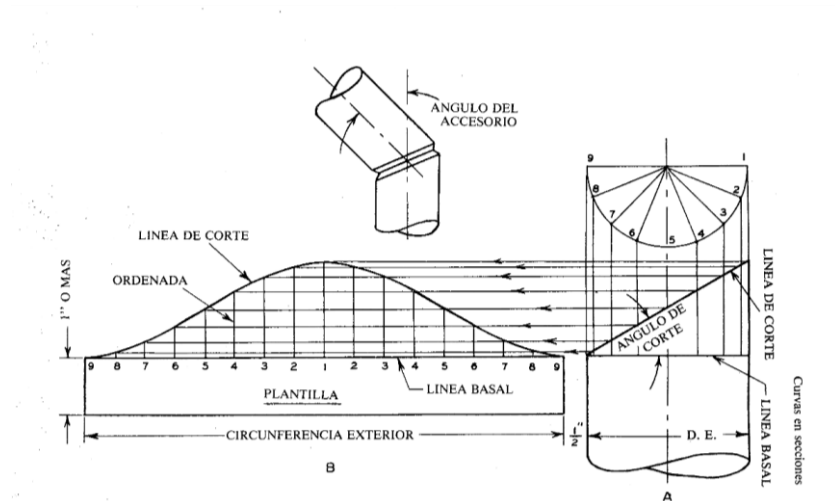
Nota. Adaptado de Jhonson Cutless Bearings, de Duramax Marine, 2015,

https://www.duramaxmarine.com/pdf/Sleeve-Flanged-Bearing_web_ESP.pdf. Todos los derechos reservados.

ANEXO C

Figura 46

Esquema de plantilla para generar cortes inglete a 90°



Nota. Método clásico de trazados técnicos; se puede hacer la plantilla de cualquier diámetro y ángulo de tubería. Adaptado de *Trazado de plantillas para tubos* (p. 19), por T. W. Frankland, 1998, Limusa Noriega Editores.

Figura 47

Trazado de plantilla para codos de 90°



Nota. La plantilla correspondiente a nuestra aplicación fue la siguiente; Se recomienda usar papeles rígidos para esta operación, para que el trazado en la tubería, no exista trazos falsos, por la elasticidad. Ejemplo, “fomix”. Sacado de autores.

Figura 48

Unión ingleses realizados con la plantilla de Frankland.



Nota. Nótese en la Fig. 41(a) el corte “boca de pescado” conocido en el campo laboral de plomería (piping); En la Fig. 41(b) se usó la plantilla en dos posiciones inversas de tal forma que la ordenada 1 forme un círculo de diámetro de 219 mm y encaje el diámetro exterior de la tubería formando una T, el tramo nuevo servirá de asentamiento para la ventana de la zona de visualización. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D

Tabla 39

Temperaturas de precalentamiento.

Metal Base No.	Grupo de Metal Base	Espesor de material		Limites adicionales.	Temperatura mínima requerida.	
		mm	in		°C	°F
1	Acero al carbono	≤ 25	< 1	Nada	10	50
		>25	>1	% C ≤ 0.30	10	50
		>25	>1	% C > 0.30	95	200

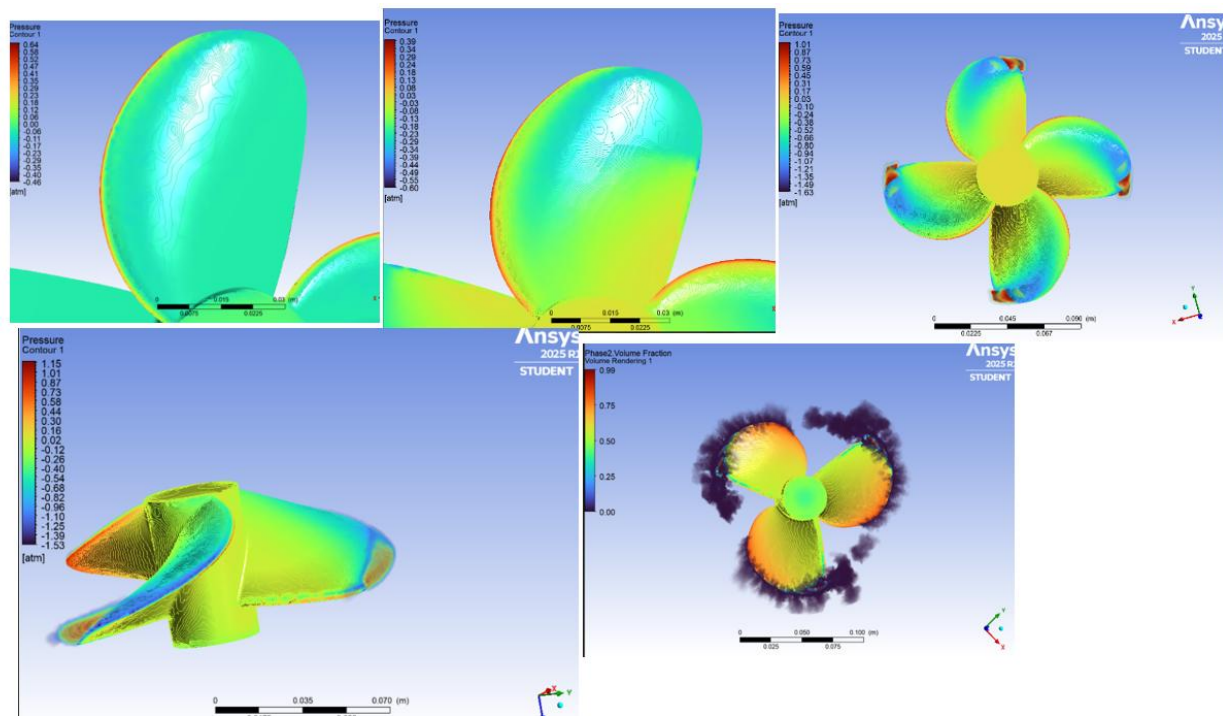
Nota. Temperaturas de precalentamiento para la aplicación de nuestras uniones soldadas,

No aplica. Adaptado de *Table 330.1.1 Preheat Temperatures*, por ASME, 2024, ASME.

ANEXO E

Figura 49

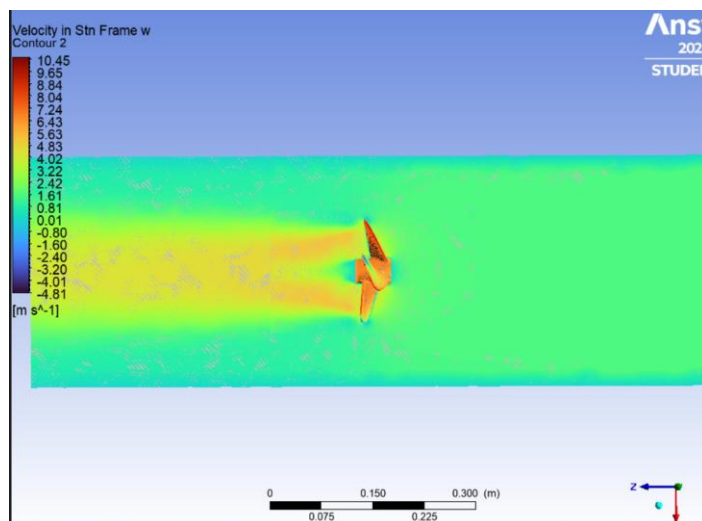
Pruebas de rendimiento CFD de hélices Wageningen.



Nota. Estudio de la Cavitación en ANSYS Fluent; se predice Cavitación en relaciones de avance menor a 0.30

Figura 50

Velocidad media del fluido del túnel en regímenes de operación normal.



Nota. Velocidad media del fluido en el túnel de cavitación en operación en pruebas.

Obtenido de Autores.