



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Bahía Blanca

**Doctor en ingeniería con mención en mecánica teórica
y aplicada**

Tesis de doctorado

***“Desarrollo de turbinas hidrocinéticas: estudios
fluidodinámicos y de resistencia de materiales, en
aguas dulces y marinas”***

Autor/es

M.Sc. Ana Julia Lifschitz

Director o Tutor

Dr. Ing. Horacio di Prátula

Codirector

Dra. Norma De Cristóforo

Bahía Blanca, 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi co-directora Dra. Norma De Cristóforo y al director de tesis, Dr. Horacio di Pratula, por su ayuda en la elaboración de este trabajo.

Me gustaría agradecer también al Ing. Eduardo Malchiodi, Lic. Jorge Alvarez, Ing Domenico Coiro y Ing Giancarlo Troise por sus contribuciones y ayuda didáctica.

A la UTN FRCH por permitirme trabajar en sus instalaciones y usar los equipos y a la UTN por haber financiado mis años de beca doctoral.

A mi hermana Juliana por su apoyo continuo.

Índice

Nomenclatura	1
Resumen	3
Abstract	3
Introducción general	5
Objetivo general y objetivos específicos	13
Capítulo I. Recurso energético	14
1.1 <i>Introducción y Objetivo</i>	14
1.1.1 Características y clasificación de las mareas astronómicas.....	17
1.1.2 Mareas en el litoral argentino.....	20
1.1.3 Sitios de estudio en la costa de Chubut.....	21
1.2 <i>Materiales y Métodos</i>	28
1.2.1 Energía de las mareas.....	28
1.2.2 Medición de las velocidades y densidades en la desembocadura del Río Chubut.....	29
1.2.3 Estimación de las velocidades y densidades en las bocas de los golfos y CL.....	30
1.3 <i>Resultados y discusión</i>	33
1.3.1 Sitios de estudio en la costa de Chubut.....	33
1.3.2 Área transversal.....	34
1.3.3 Velocidades.....	37
1.3.4 Potencia cinética teórica.....	41
1.4 <i>Conclusiones</i>	43
Capítulo II. Rotores hidrocineéticos	45
2.1 <i>Introducción y objetivo</i>	45
2.1.1 Turbinas hidrocineéticas contra turbinas eólicas.....	47
2.1.2 Rotor de una THC- Conceptos y fenómenos en 2D.....	48
2.1.3 Rotor de una THC- Conceptos y fenómenos en 3D.....	61
2.2 <i>Materiales y métodos</i>	68
2.2.1 Condiciones y métodos de diseño.....	68
2.3 <i>Resultados y discusión</i>	77
2.3.1 Características del rotor de estudio.....	77
2.3.2 Potencia, dimensionamiento del rotor y perfil de trabajo.....	77
2.3.3 Profundidad.....	79
2.3.4 Implementación de una tobera.....	80
2.3.5 Coeficientes hidrodinámicos - software Qblade.....	80

2.3.6. Velocidad crítica de rotación- análisis de cavitación.	90
2.3.7. Geometría de la pala.	91
2.3.8 Condición de arranque y torsión de la pala.....	95
2.3.9 Potencia.....	101
2.4 Conclusiones.	106
Capítulo III. Resistencia a la corrosión de materiales en ambiente marino.	108
3. 1. <i>Introducción y Objetivo.</i>	108
3.1.1 Conceptos básicos del fenómeno de corrosión.	110
3.2 <i>Materiales y métodos.</i>	118
3.2.1. Pruebas de laboratorio.....	120
3.2.2. Estudios en campo.	121
3.2.3. Observaciones y análisis superficiales de los materiales.....	123
3.3 <i>Resultados y discusión.</i>	124
3.3.1. Estudios en laboratorio.....	124
3.3.2. Estudios en campo.....	127
3.4 <i>Conclusiones.</i>	140
Consideraciones finales.....	142
Referencias bibliográficas.....	144
Anexos.....	155

Nomenclatura

Φ ángulo de flujo
 α ángulo de ataque
 α_s ángulo de pérdida de sustentación
 α_{opt} ángulo de ataque óptimo
 μ ángulo de torsión
 μ_p ángulo de torsión del perfil raíz
Ab área ocupada por las palas del rotor
A área de referencia del cuerpo
CP centro de presión del perfil.
 C_p coeficiente de potencia
 C_l coeficiente de sustentación
 C_d coeficiente de arrastre
 C_m coeficiente de momento
 c_{pr} coeficiente de presión
 x/c coordenada no dimensional
 x/R coordenada lineal del aspa
 c cuerda media del perfil
 c_g cuerda geométrica
 ρ densidad del agua
F fuerza resultante
L fuerza de sustentación
D fuerza de arrastre
 b largo del ala
 l longitud característica del objeto
 σ número de cavitación
Re número de Reynolds
N número de palas
P presión local
 P_∞ presión del flujo libre
 q_∞ presión dinámica flujo libre
 p_t presión total
R radio del rotor
 r radio local
 S_{tr} sección transversal
S solidez
 dt diferencial de tiempo
 t espesor del perfil
 t/c espesor relativo.
 V_{abs} velocidad absoluta
 Ω velocidad angular
 Ω_d velocidad angular de diseño
 ω velocidad angular del aire
 V_r velocidad resultante o relativa
V velocidad del fluido
 V_∞ velocidad de la corriente libre
 V_{tg} velocidad tangencial

V velocidad media en la sección considerada
 μ d viscosidad dinámica del fluido

Resumen

En la actualidad, ha cobrado gran relevancia el potencial aprovechamiento de fuentes renovables para generación de energía eléctrica. Una de ellas es la energía derivada del movimiento de las aguas a causa de las mareas, conocida como energía cinética mareomotriz. En Patagonia, específicamente en la provincia de Chubut, es importante que se consideren acciones para el desarrollo de nuevas tecnologías que utilicen esta fuente. En esta tesis se describen las características generales del fenómeno de las mareas astronómicas en el litoral patagónico, con el fin de seleccionar potenciales sitios para el aprovechamiento energético en la costa chubutense. Se presentará un estudio de la performance de un rotor hidrocínético utilizando técnicas y análisis numéricos para determinar el tipo de hélice más conveniente, considerando las características de los diferentes sitios evaluados.

Un aspecto importante a tener en cuenta en la disposición de estos dispositivos en el mar, es que operan en un ambiente altamente agresivo desde el punto de vista de la corrosión de las partes metálicas. También se presentará un análisis del comportamiento frente a la corrosión de materiales seleccionados (acero 304 y 430, aluminio y aluminio anodizado).

Entre los principales resultados se observa que existen en la costa de Chubut las capacidades para implementar este tipo de proyectos. La región presenta sitios potencialmente buenos para instalar una turbina hidrocínética (THC), dado las condiciones hidrodinámicas (velocidades de corrientes) y la forma de la costa. Estos sitios son: boca del Golfo Nuevo, boca del Golfo San José, el Canal Leones y la desembocadura del Río Chubut en el puerto de Rawson. Se concluye que este último no sería apto para instalar una THC.

Concerniente al rotor hidrocínético, se optó por un modelo de eje horizontal de tres palas de pequeña dimensión y del tipo boyante entubado. El modelo propuesto fue capaz de captar un alto porcentaje (mayor al 80%) de la potencia teórica de diseño de 2200 W.

El análisis del comportamiento frente al fenómeno de corrosión de los materiales propuestos, mostró que todos ellos sufrieron corrosión excepto el aluminio anodizado, permitiendo desmitificar el comportamiento de inmunidad frente a la corrosión de aceros inoxidable considerados frecuentemente como una alternativa resistente, ya que sufrieron deterioro en ambiente marino. Los resultados de pruebas en laboratorio, mostraron una muy buena correlación con el comportamiento de los mismos expuestos en el ambiente marino.

Abstract

Nowadays, the potential use of renewable sources for the generation of electrical energy has gained great relevance. Among them, it is the energy derived from water movement due to tides, known as "tidal kinetic energy". In Patagonia, specifically in Chubut coast, it is important to taking actions to develop these new technologies. An important aspect to take into account in the arrangement of these devices is that they operate in a highly aggressive environment, from the point of

view of corrosion of metallic parts. This thesis describes the general characteristics of astronomical tides on the Patagonian coast in order to select potential sites for energy use on the Chubut coast. A study of the performance of a hydrokinetic rotor will be presented using techniques and numerical analysis to determine the most convenient type of rotor, considering the characteristics of the different sites evaluated. An analysis of the behavior against corrosion of certain materials will be presented as well.

Among the main results, it is observed that this type of project can be implemented on the coast of the Chubut province. The region presents potentially good sites to install a THC, given the hydrodynamic conditions (current speeds) and the shape of the coast. These sites are mouth of Nuevo Gulf, mouth of San Jose Gulf, the Leones Channel and the mouth of the Chubut River at Rawson Harbor. It was concluded that the latter one would not be suitable to install a THC.

Regarding the hydrokinetic rotor, a three-bladed, small-dimension, horizontal-axis model of the tubed-buoyant type was chosen. The proposed model was able to capture a high percentage (between 80-100%) of the theoretical design power of 2200 W. The analysis of corrosion showed that all of the materials suffered corrosion except anodized aluminum. This outcome allows demystifying the behavior of immunity against corrosion of stainless steels, frequently considered as a resistant alternative, since they actually suffered deterioration in marine environment. The results of laboratory test on metallic corrosion showed good agreement with those observed in the field.

Introducción general

Tendencia a la diversificación de la matriz energética

En los últimos años se está reconociendo el importante potencial de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables. El plan energético mundial contempla el uso de estos recursos para la diversificación de la matriz energética. Los mismos deben garantizar el suministro oportuno, confiable, seguro y eficiente de energía a toda la sociedad, además de contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mitigación frente al cambio climático. Según el informe de la IEA (2020), algunas de las acciones más importantes para lograr cero emisiones de gases de efecto invernadero en el 2050 pasan por la generación del 75 % de la electricidad mundial de fuentes renovables para el 2030. Con el desarrollo de las energías renovables, se espera que disminuya la participación de la generación a base de carbón y gas, teniendo como resultado una estabilización de las emisiones de CO₂ hasta el 2025 y luego una drástica disminución en los siguientes años (IEA 2023).

Las energías renovables están disponibles universalmente y pueden cubrir la demanda energética en áreas rurales permitiendo su desarrollo, ya que es posible aprovecharlas en lugares alejados de centrales de producción de electricidad. Cualquiera sea el sistema elegido, los equipos deben brindar un servicio confiable en condiciones de trabajo continuo y escaso mantenimiento. En el caso de utilizar turbinas, deben tener robustez y confiabilidad. Si bien se presume que para tener servicios energéticos satisfactorios es necesario conectarse a las redes de electricidad y gas natural, para poblaciones dispersas y de bajos recursos, combinar energía renovable distribuida con electricidad de red o gas licuado puede resultar una opción eficiente, económica y más limpia.

La transición energética hacia un mix energético más renovable se plasmó con la firma del acuerdo de París. En el mismo, los signatarios de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático acordaron realizar esfuerzos para tratar de limitar el aumento de las temperaturas globales para 2050 a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales (IRENA, 2022). Se prevé, luego, que la participación de las energías renovables en el mix energético global aumente del 29 % en 2022 al 35 % en 2025, y compensarían más de un tercio de la generación mundial para 2025, (IEA, 2023). A pesar del crecimiento continuo en 2022, el informe indica que la proporción de renovables actual en el parque total de generación se mantiene por debajo del 25 % en el mundo.

La demanda energética primaria para el periodo 1810 a 2010 muestra una estrecha relación con el incremento de la población (Schiuma, 2017) (Anexo 1: Figura 1). Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2020), desde 1970 hasta el 2010 la población mundial se duplicó, mientras que la demanda de energía creció 2,3 veces. La International Energy Agency, (IEA, 2020), realizó una estadística de la evolución de la matriz energética primaria mundial (Figura 2, anexo I), donde se establecieron las tendencias de producción y consumo de energía en un período de 45 años, entre 1973 y 2018. Los datos revelan que, a pesar

de que la utilización de petróleo disminuyó con los años, todavía hoy se depende mayoritariamente de combustibles fósiles, a pesar de los avances en energías renovables. De hecho, la participación de estas fuentes de energía fósil es tan grande que se hará difícil independizarse de las mismas. En la figura se destaca una muy baja participación de las energías “limpias”, tanto la proveniente de fuentes hídricas como la proveniente de fuentes alternativas o renovables (eólica, solar, del mar).

Otro aspecto interesante en el empleo de fuentes de energías renovables es la dependencia material y la disponibilidad de minerales críticos que utilizan. Si el empleo de energías limpias aumenta, también lo hará la necesidad de metales, minerales y otros materiales para construir turbinas, paneles solares, baterías, etc. De acuerdo a IEA (2021), el aumento en la generación de energías limpias implicaría un aumento en la demanda de minerales y materiales tres veces más que el consumo actual a nivel global para 2040, lo que exacerbaría aún más las amenazas contra la biodiversidad. Esta problemática se podría enfrentar con planificación estratégica en la extracción de minerales para las energías renovables y la implementación de diversas fuentes de generación, que utilizarían materiales diferentes evitando así la falta de disponibilidad de los mismos. El mercado de los materiales críticos para la construcción de dispositivos energéticos con cero emisiones de carbono se ha convertido en una cuestión geopolítica, que traspasa la línea de intereses estrictamente comerciales.

Energías marinas renovables

A pesar de que en el país ya está instalada la tecnología para el aprovechamiento de la energía hidráulica, eólica y solar como fuentes de origen renovable (catálogo GEMA, 2018), es importante iniciar acciones para el desarrollo de nuevas tecnologías no convencionales de generación, tales como el uso de equipos de generación a pequeña escala, entre los que se destacan las turbinas hidrocínéticas (THC). La energía hidrocínética o energía de las corrientes de mareas es reconocida como una fuente energética renovable alternativa que permite la explotación de la energía de ríos, canales y mareas. Para esta última en particular, la potencia teórica ha sido estimada globalmente en alrededor de 500 GW (4380 TWh/año) (Samsò *et al.*, 2023).

La principal ventaja de la energía de mareas es que no sufre el mismo tipo de variabilidad que la solar y la eólica en diferentes escalas de tiempo (diaria, estacional e interanual). Las mareas son el resultado de dos aportes: la parte astronómica y la componente meteorológica. La predicción de las mareas astronómicas es mayormente determinística, y se pueden pronosticar con un alto grado de certidumbre con la ayuda de modelización numérica, imágenes satelitales y mediciones *in situ* (Pedlosky, 1998, Tonini, 2010, Simionato *et al.*, 2004, Dragani, 2006).

El recurso mareomotriz está compuesto por dos tipos de aprovechamiento: extracción de energía debida al cambio de nivel del mar o potencial de mareas, que utiliza la energía potencial, y la debida a la energía cinética de las corrientes

asociadas. La utilización de la energía potencial de mareas supone la construcción de diques o represas para almacenar el agua y funcionan con el ascenso y descenso del agua que atraviesa turbinas eléctricas. El principio de funcionamiento es muy similar al realizado en las centrales hidroeléctricas. Este aprisionamiento del agua implica un impacto ambiental importante que afecta la flora y fauna, el paisaje, el curso natural de las aguas, o incluso la navegación y tiene asociado costos altos de la obra de ingeniería civil (Castro-Santos and Haro, 2015, Gonzales y Esteves, 2008). La energía cinética de mareas o la energía de sus corrientes, no implica la construcción de diques, requiriendo únicamente de la instalación de una turbina que, al no ser de grandes dimensiones, es probable que funcione sin alterar de forma significativa el flujo natural de la corriente y el hábitat marino. Las turbinas hidrocínicas son una alternativa atractiva por su modularidad y extensibilidad, si bien debemos considerar que su eficiente desempeño dependerá de una elección apropiada de los sitios de instalación y un correcto diseño (Cardona-Mancilla *et al.*, 2018).

La industria mareomotriz constituye además un significativo vector para la investigación y desarrollo de otras actividades, como la gestión medioambiental, donde se destacan la elección del lugar de emplazamientos de dispositivos, la evaluación de impactos ambientales, y la planificación espacial marina y litoral. Asimismo, tendría implicancias en el ámbito de la oceanografía, con la monitorización de variables y parámetros, características del recurso, previsión de producción, condiciones de operatividad, entre otras. La utilización de la energía de las mareas también puede contribuir al desarrollo de la ingeniería naval, obras y cables submarinos, fondeos, anclajes, sistemas flotantes, e incluso en la industria eléctrica: conexiones, red terrestre, operación y mantenimiento.

Una cuestión importante a tener en cuenta en la implementación de estos dispositivos en el mar es que operan en un ambiente altamente agresivo desde el punto de vista de la corrosión de las partes metálicas de los mismos. Se deben utilizar materiales que presenten alta resistencia de corrosión o implementar sistemas de protección (Lacal-Arantechi *et al.*, 2014, Lazzari y Pedferri, 2000). La evaluación de estos aspectos es de gran relevancia para profundizar los conocimientos que permitan un correcto aprovechamiento de las THC como fuentes alternativas de energía.

Contexto internacional

Los combustibles fósiles tales como el petróleo, el carbón mineral y el gas, constituyen en forma predominante el actual sistema energético mundial (IEA, 2020). Estas fuentes de generación de energía están siendo ampliamente cuestionadas pues son recursos que se encuentran en puntos concretos del planeta, y su uso a gran escala está provocando graves efectos sobre el medio natural y sobre la salud de las personas (Mohaded, 2018). A su vez, constituyen reservas limitadas, lo que compromete el futuro desarrollo de las nuevas generaciones. Se ha alcanzado un amplio consenso sobre la existencia del cambio climático y la preocupación por proteger el medio ambiente. La producción de energía marina renovable se considera como reemplazo de las energías convencionales fósiles, cuyo

consumo cada vez más elevado está provocando el agotamiento de los recursos y graves problemas ambientales (OMM, 2021).

Como consecuencia del uso de combustibles fósiles, la temperatura media de la Tierra ha sufrido un aumento de casi 1,4°C por encima de los niveles preindustriales (Organización Meteorológica Mundial OMM, 2021) y, como resultado, existe una disminución real de la cobertura del hielo polar y aumento de la frecuencia e intensidad de huracanes, sequías y lluvias torrenciales. Pese a que las fuentes de energías marinas renovables constituyen una alternativa ecológica, considerada inagotable y menos nociva para el medioambiente, su implementación está por debajo de lo necesario y continúan siendo desaprovechadas. Esto puede deberse a un alto costo de inversión inicial y de mantenimiento de los dispositivos energéticos, sobre todo aquellos de generación marina, donde el acceso a los mismos es difícil y muy costoso. Las estimaciones de costos son muy variables y la falta de implementación a escala comercial de dispositivos energéticos marinos hace que sea difícil evaluar con precisión los costos reales tanto de la instalación a gran escala como de la operación. Se debe tener en cuenta además que el costo de producción energética marina no es competitivo frente a otras tecnologías más conocidas: el costo de producción de energía a partir de las mareas oscila entre 2 a 4 veces más que la generación hidroeléctrica (Dragani *et al.*, 2016). Sumado a esto, la necesidad creciente de energía por parte de las sociedades modernas contribuye a que se apele mayormente a combustibles fósiles con mayor capacidad de generación (Mohaded, 2018). Dentro de esta evolución dinámica, emergen las energías marinas como un recurso de energía predecible con un alto potencial energético y un alto factor de utilización. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA 2020) solo la generación de energía a partir de las olas y de las mareas se incrementará desde algo menos que 1 TWh que se producía en 2010 hasta casi 60 TWh en 2035, y con potencia instalada que crecerá desde menos de 1 GW hasta 15 GW. De acuerdo a Ali Khan *et al.*, (2022), para 2050, la capacidad total instalada de energía oceánica habrá aumentado de alrededor de 1 GW en 2013 a 37 GW. A pesar de esto, los autores señalan que, en la actualidad, la energía oceánica representa menos del 1 % de la generación total de electricidad renovable.

Desarrollos tecnológicos más relevantes en el mundo

La energía potencial mareomotriz lleva 512 MW instalados, potencia que se reparte entre dos grandes proyectos: una planta de 254 MW en la República de Corea y una planta de 240 MW en Francia (catálogo GEMA, 2018, Barclay *et al.*, 2023). La potencia de estas instalaciones equivale a más del 90 % del total de la capacidad instalada en energía oceánica (Samsò *et al.*, 2023). Según IRENA (2020), la energía oceánica incluye undimotriz, mareomotriz (cinética y potencial), conversión térmica oceánica y gradiente salino.

La tecnología para la explotación energética de las corrientes de mareas está todavía en la etapa conceptual y de desarrollo (Bhuiyan *et al.*, 2022); sin embargo, en los últimos años se han planteado algunos prototipos de turbinas. Coiro *et al.*, (2005) diseñó y construyó la turbina de eje vertical Kobold de paso variable. La planta piloto se instaló en el Estrecho de Messina, cerca de la costa siciliana de

Italia. Esta turbina fue la primera con estas características, con una eficiencia global del 25 % y una potencia de 160 kW con velocidades de corrientes de 3,6 m/s y diámetro de 6 m. La turbina Gorlov (USA) por otro lado, tiene una estructura de hélices helicoidales con potencia nominal de 1,5 kW para velocidades de agua de 1,5 m/s. El modelo estándar de esta turbina es de 1 m de diámetro, (Benelghali *et al.*, 2007). El prototipo a escala real, conocido como GEM y diseñado para producir una potencia de 20 kW para corrientes de 1,5 m/s y 3 m de diámetro, fue desarrollado, construido e instalado en un sitio de prueba en la Laguna de Venecia, Italia (Coiro *et al.*, 2018). La compañía The Marine Current Turbines SeaGen junto con la 'Atlantis Turbine' están trabajando desde 2018 en el desarrollo y validación del Sistema Atlantis' AR2000, para ser dispuesto en Escocia. Esta turbina puede operar con velocidad de 1 m/s y generar una potencia de 2 MW para flujos de 3,05 m/s. El tamaño de esta turbina es de 20 m de diámetro del rotor (Marine Current Turbine, 2012, Ibrahim *et al.*, 2021). MeyGen, el primer sistema de turbinas de gran escala en el mundo, ha generado más de 8 GWh de energía entregada a la red hasta el momento (Marine Energy Wales, 2019). El proyecto MeyGen es actualmente el arreglo de turbinas hidrocínicas más grande del mundo (Meygen, 2020, Nachtane *et al.*, 2020). Orbital Marine Power desarrolló el SR2000, una turbina flotante que ha generado más de 130 MWh de energía en las islas Orkney (Orbital Marine Power, Ibrahim *et al.*, 2021, Nachtane *et al.*, 2020). La energía generada por el SR2000 durante un año, trabajando en condiciones óptimas es suficiente como para cubrir las necesidades energéticas de aproximadamente 830 hogares en Reino Unido (Nachtane *et al.*, 2020). Marine Current Turbines Ltd (MCT) instaló una turbina de 300 kW de eje horizontal, conocida como 'sea flow' en las costas de Inglaterra en 2004. La compañía Hammerfest Strøm desarrolló el concepto de Blue or E-Tide (Noruega) en 2003. Este concepto es una turbina hidrocícnica de 300 kW que puede ser instalada en el suelo offshore o nearshore dependiendo de la fuerza de la corriente (Aqua-RET 2003). Niebuhr *et al.*, (2019) realizó una compilación de prototipos de turbinas. Por ejemplo, los autores mencionan la turbina de flujo axial de potencia 3500 W de Guinard Energies, diseñada en 2018. Describen el prototipo de la empresa Instream Energy Eystem, de una turbina de flujo transversal del tipo Darrieus de potencia de diseño de 25 kW. La empresa Hydroquest River desarrolló el prototipo de turbina para ríos (2019) de eje transversal y potencia de 40 kW. Ibrahim *et al.*, (2021), realizaron una comparación de prototipos de turbinas en etapa pre-comercial; uno de los ejemplos mencionados es la turbina desarrollada por Verdant Power, un sistema de 3 palas de eje horizontal de 35 kW. Otro ejemplo citado por los autores es la turbina perteneciente a Atlantis Resources, conocida como AR1500, de tres palas de flujo horizontal, capaz de producir 1500 kW. Este modelo está pensado para ser instalado sobre el lecho marino. Tocardo (2021), propuso un prototipo de 2 palas de eje horizontal, de 100 kW, que requiere la construcción de una estructura de soporte. El Proyecto FloTEC, establecido en 2016 por fondos de la Unión Europea fue destinado a demostrar el potencial de los sistemas flotantes para generar energía ya sea por su característica de predictibilidad, confianza, bajo costo y bajo riesgo, (Nachtane *et al.*, 2020). La **Tabla 1** sintetiza los desarrollos más destacados.

Tabla 1. Desarrollos tecnológicos en el mundo

Tipo de turbina	Potencia	Velocidad de operación (m/s)	Diámetro (m)	Nombre	Fuente bibliográfica
eje vertical y paso variable	160 KW	3,6	6	Kobold	Coiro <i>et al.</i> 2005
estructura de hélices helicoidales	1,5 KW	1,5	1	Gorlov	Benelghali <i>et al.</i> , 2007
prototipo a escala real	20 KW	1,5	3	GEM	Coiro <i>et al.</i> , 2018
prototipo a escala real	2 MW	3,05	20	Sistema Atlantis' AR2000	Marine Current Turbine, 2012, Ibrahim <i>et al.</i> , 2021

Contexto nacional

El 98 % de los hogares argentinos tiene acceso a los servicios eléctricos, pero aproximadamente 500.000 personas aún carecen de electricidad, localizadas principalmente en áreas rurales aisladas, de difícil acceso y costoso tendido de redes (Jacinto, 2018). Esto ha generado un impacto negativo con respecto a la densidad demográfica rural y ha contribuido a una migración de la población a zonas urbanas. Por otro lado, existe una concientización limitada de los consumidores respecto del uso de fuentes de energía. La protección del medio ambiente mediante el uso racional, así como la aplicación de fuentes renovables de energía no son consideradas aún como una problemática que se debe poner en discusión. Solo recientemente, debido a la presión internacional respecto al cambio climático y a una mejor administración de los recursos energéticos, aparece una toma de conciencia sobre la conservación de los recursos, la aplicación de tecnologías apropiadas y el uso de energías no convencionales y renovables (Devalis, 2018).

La Matriz Energética Argentina es fuertemente dependiente de los hidrocarburos con predominio del gas natural (Castelao Caruana, 2019). El uso del petróleo y gas representan el 86 % de la oferta energética total, recursos no renovables que generan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), responsables del cambio climático. Esta situación trascurre en un país donde la demanda eléctrica registró aumentos durante el 2022, y se espera un crecimiento moderado en el 2023-2025 (IEA 2023). Si bien se considera que las tecnologías de la energía renovable son costosas frente a los hidrocarburos, conforme pasa el tiempo, se vuelven más competitivas al tener en consideración el costo que producen los daños causados por éstas a personas y al medio ambiente.

La situación energética actual argentina se produce en un país con una extensa superficie marítima jurisdiccional, (4800000 de km²) con casi 5.000 km de costas continentales (catálogo GEMA, 2018), que contiene innumerables recursos, en su mayor parte desconocidos o sin cuantificar. El potencial energético del Mar Argentino incluye energías provistas por las olas, corrientes, mareas y gradientes térmicos y salinos. Sin embargo, la información de su aprovechamiento es escasa y dispersa (catálogo GEMA, 2018). El desarrollo del aprovechamiento de las energías marinas en nuestro país no ha superado la etapa de los planteos preliminares. Los desarrollos tecnológicos requieren un relevamiento detallado de parámetros oceanográficos con el fin de definir los mejores sitios para las instalaciones de

generación y establecer los criterios ingenieriles adecuados en cada contexto específico. La definición de los posibles lugares de explotación debe complementarse con estudios de carácter ambiental, donde se evalúen los posibles impactos sobre la biodiversidad. La energía marina es una de las formas de energía renovable que mayor potencial ofrece en el mediano y largo plazo (Informe Pampa Azul).

Evaluación del recurso y desarrollos tecnológicos: antecedentes

En la provincia de Santa Cruz, Vitorino *et al.* (2017) realizaron mediciones de corrientes de mareas en la Ría San Julián y evaluaron la instalación de un prototipo de turbinas hidrocínéticas en la costa de esa provincia. Labriola y Alvarez (2016) realizaron la evaluación del recurso mareomotriz y plantearon como posible localización de un prototipo de turbina hidrocínética flotante la ría de Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina. Los autores hicieron una recopilación de datos de marea y corriente marina del Servicio de Hidrografía Naval (en adelante, SHN- Ministerio de Defensa. 2015), complementadas con mediciones directas del recurso (velocidad del fluido, alturas de marea, temperatura, batimetría, etc.). Luego de analizar las mediciones, los autores concluyeron la localización del prototipo en un muelle en desuso en la Ría de Río Gallegos, con condiciones estructurales óptimas, además de presentar algunas ventajas como la cercanía a la ciudad y presencia de la Prefectura Naval Argentina en la zona para el control de las actividades náuticas. Barclay *et al.*, (2023) examinaron el recurso teórico y técnico de la energía potencial de mareas en la plataforma continental argentina a través de un atlas de alta resolución (TPXO9). Los autores llegaron a la conclusión que el potencial teórico de mareas es de 913 TWh (104 GW), superando considerablemente el consumo energético estimado de Argentina (~ 143 TWh en 2021). Zabaleta *et al.*, (2016) realizaron una evaluación detallada del potencial de generación de energía a partir de las corrientes de mareas en el estuario de Río Gallegos mediante modelos matemáticos (Delft3D y SWAN). Los autores lograron describir los campos de corrientes y la dinámica costera de la zona. Dentro del estuario, el canal sur presentó las mejores condiciones en cuanto a velocidades, con densidades de potencia del orden de los 7,5 kW/m². Buono *et al.*, (2020) realizaron un estudio hidrodinámico en 5 estuarios patagónicos (Ríos Deseado, Santa Cruz, Coyle, Gallegos y Grande) mediante herramientas de modelación numérica (Delft3D), con el objetivo de determinar y analizar las corrientes mareales y realizar una evaluación del potencial energético. El alto potencial de corrientes de mareas presentes en la zona sur del país (precisamente en Río Gallegos) fue advertido en el trabajo de Shadman *et al.*, (2023). Los autores señalan que, a pesar de que actualmente no se han instalado dispositivos energéticos en el mar argentino, existen diversos proyectos en fase experimental. Por ejemplo, se cita el trabajo de Y-TEC (YPF Tecnología) y la UTN Regional Santa Cruz, iniciado en el 2013. El mismo tenía como objetivo determinar el potencial energético en la costa sur de la provincia de Santa Cruz utilizando mediciones *in situ* y la construcción de prototipos de pequeñas centrales eléctricas para aprovechar estas fuentes de energía. Además, se pretendía recopilar información sobre su rendimiento técnico. Biancucci y Labriola (2007) analizaron posibles lugares con valores de cota de diferencia de amplitud de mareas promedio y buenas condiciones de viento

(velocidades medias de viento de 8 a 10 m/s a una altura de 10 metros y bajos niveles de turbulencia atmosférica, según cartas y tablas de mareas del SHN, 2006), además de contar con facilidades de acceso. Los lugares propuestos por los autores fueron: el puerto de Río Gallegos, donde se originan corrientes que en mareas de sicigias llegan a velocidades comprendidas entre 2 a 6 nudos (1 a 3 m/s); Puerto Deseado, con intensidad de corrientes promedios de 5 a 6 nudos (2,6 a 3,09 m/s), y el Puerto San Julián, con intensidades de corrientes promedios de 4 nudos (2,06 m/s). Varios autores, a través de modelado numérico, han destacado el gran potencial energético de mareas en la zona Sur del golfo San Matías (Simionato *et al.*, 2004, Moreira *et al.*, 2011, Tonini *et al.*, 2006, Glorioso, 2000, Barclay *et al.*, 2023).

En cuanto al desarrollo tecnológico, Labriola y Peralta, (2014) propusieron reacondicionar un banco de pruebas en el Laboratorio de Energía Renovable de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), en Santa Cruz, para modelar el comportamiento de una turbina. El objetivo del proyecto fue establecer relaciones de semejanzas entre el modelo de turbina y datos del SHN, en Caleta Paula, Santa Cruz, y establecer hasta qué tamaño o potencia pueden extrapolarse los resultados. El modelo propuesto por los autores fue un modelo horizontal de dos aspas sumergidas de 2 kW, con un mínimo impacto sobre la fauna marina y bajo costo de instalación. Vitorino *et al.*, (2016) plantearon las bases de diseño y construcción de turbinas hidrocínicas para aplicaciones tanto marítimas como fluviales, en el extenso litoral marítimo argentino desde Viedma hasta Tierra del Fuego, para lo cual se utilizaron mediciones de corrientes del SHN para el año 2010. La conclusión arribada por los autores fue que es factible implementar turbinas hidrocínicas en Puerto San Julián; en particular, dos turbinas de 5 kW. El INVAP ha diseñado y fabricado un rotor de tamaño pequeño (del orden de 1 kW), con el objetivo final de ofrecer turbinas comerciales de distintas potencias (9 a 10 kW) en un rango bastante amplio, de acuerdo a cada necesidad y a las características de los diferentes cursos de agua aprovechables (Vitorino *et al.*, 2016). La intención es llegar, en un futuro cercano, a equipos que superen 1 MW para ser utilizados en aplicaciones mareomotrices. Por otro lado, ENARSA (empresa nacional creada en 2003) comenzó estudios para el desarrollo de proyectos de energía mareomotriz en la provincia de Santa Cruz, una de las zonas del mundo con mayor amplitud de mareas, (Dembicz, 2008).

Desde 1998, existen marcos jurídicos de apoyo y promoción a las energías renovables en el país. En 2006, se sancionó la Ley Nacional 26.190 (Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica). Esta ley fijó el objetivo que para 2016 el 8 % del consumo eléctrico local debería ser abastecido con fuentes de energías renovables. Lamentablemente, debido a condiciones económico-financieras no fue posible cumplir con la meta del 8 % de fuentes renovables en la matriz de generación proyectada para el 2016. Por tal motivo, en el 2015 fue aprobada la ley 27.191 (reformando a la Ley 26.190), que dictaminó el objetivo de que el 20 % de la matriz energética Argentina sea de fuentes renovables para 2025. Con este objetivo, la ley estableció un régimen de inversiones con beneficios fiscales a la producción eléctrica renovable. En el año 2002 las energías renovables representaban solo el 0,5 % y para fin de 2021 representaron alrededor del 10-12 %. (informe del

Ministerio de Economía de la Nación, 2022). Sin embargo, este crecimiento estuvo dado por tecnología eólica, bioenergías, solar fotovoltaica y pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, no por tecnologías de producción energética marina.

Objetivo general y objetivos específicos

El objetivo general de esta tesis apunta a contribuir al desarrollo de turbinas hidrocínéticas, mediante el diseño preliminar de un rotor hidrocínético y a través de la evaluación de posibles sitios de instalación en la costa de Chubut. A su vez, se pretende establecer consideraciones relativas a alcances y límites del empleo de algunos materiales que se suelen usar con frecuencia en ambiente marino.

Los objetivos específicos que permitirán dar cumplimiento al objetivo general son:

- Evaluar el recurso energético de corrientes de mareas mediante la estimación de la densidad de la potencia teórica.
- Plantear el diseño de una hélice, con el fin de evaluar su comportamiento en un medio ambiente variable como son las corrientes asociadas a las mareas en las costas.
- Estudiar el comportamiento frente a la corrosión de materiales seleccionados en un ambiente agresivo como el marino.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, esta tesis se estructuró en 3 capítulos. En el Capítulo I se inspeccionaron y seleccionaron sitios aptos para el aprovechamiento energético de corrientes de mareas en la costa de Chubut, entendiéndose como aptos, que presenten características hidrodinámicas y físicas/geomorfológicas que favorezcan la instalación de un prototipo. Para esto se describieron las características generales del fenómeno de las mareas astronómicas en el litoral chubutense. La evaluación de los sitios se realizó a través de la estimación de la densidad de potencia cinética teórica de mareas. En el Capítulo II se presentó un estudio del desempeño del rotor de una turbina utilizando herramientas de modelización, para determinar el tipo de hélice más conveniente considerando las características de los diferentes sitios evaluados. En el Capítulo III se evaluó el comportamiento a la corrosión de algunos materiales mediante el empleo de técnicas electroquímicas y exposiciones "*in situ*" completadas con estudios de análisis superficial. En la última sección, se presentaron las consideraciones finales.

A continuación, se presenta el Capítulo I con el análisis del recurso y selección de posibles sitios de emplazamiento de una turbina en Chubut.

Capítulo I. Recurso energético

1.1 Introducción y Objetivo

En los últimos años, se está reconociendo el importante potencial de aprovechamiento de las corrientes de mareas como un valioso recurso sustentable para la generación de energía eléctrica (catálogo GEMA 2018). El alto factor de carga resultante de las propiedades del fluido y sus características de predictibilidad hacen a este recurso particularmente atractivo con respecto a otras energías renovables. El potencial energético de mareas en la zona patagónica se encuentra entre los cuatro más importantes del mundo (**Tabla 1.1**) (World Energy Council, 2003).

Tabla 1.1. Energía potencial de algunos sitios en el mundo (adaptado de World Energy Council, 2003).

País	Rango medio de marea/m	Area Cuenca Km2	Capacidad instalada/ MW	Salida: anual (aprox)/TWh x año	Factor de carga anual/%
Argentina					
San José	5.8	778	5040	9.4	21
Golfo Nuevo	3.7	2376	6570	16.8	29
Río Deseado	3.6	73	180	0.45	28
Santa Cruz	7.5	222	2420	6.1	29
Río Gallegos	7.5	177	1900	4.8	29
Australia					
Secure Bay	7.0	140	1480	2.9	22
Alcott inlet	7.0	260	2800	5.4	22
Canadá					
Cobequid	12.4	240	5338	14	30
Cumberland	10.9	90	1400	3.4	28
Shepody	10.0	115	1800	4.8	30
India					
Gulf of Kachchh (Kutch)	5.0	170	900	1.6	22
Gulf of Cambay (Khambat)	7.0	1970	7000	15	24
Korea (Rep)					
Garolim	4.7	100	400	0.836	24
Cheonsu	4.5	x	x	1.2	
México					
Río Colorado	6 a 7	x	x	54	
USA					
Passamaquoddy	5.5	x	x	x	x
Knik Arm	7.5	x	2900	7.4	29
Turnagain Arm	7.5	x	6500	16.6	29
Federación de Rusia					
Mezeh	6.7	2640	15000	45	34
Tugur	6.8	1080	7800	16.2	24
Penzhinsk	11.4	20530	87400	190	25

Específicamente, las mareas están definidas como el cambio en el nivel de las aguas del mar, y su potencia teórica (potencial y de las corrientes asociadas) ha sido estimada globalmente en alrededor de 500 GW (Samsò *et al.*, 2023), o 4380 TWh/año de energía. Según IRENA (2023), la capacidad global de generación de energía renovable fue 3372 GW a fines del 2022, con lo cual, la capacidad estimada

de energía de mareas equivale a un 15 % de renovables. El informe de IRENA (2022) indicó una potencia mareomotriz de 3000 GW y 30000 GW de potencia renovables en total para el 2050.

Las mareas se pueden dividir en marea astronómica y marea meteorológica. La primera se debe al movimiento periódico de ascenso y descenso del mar producido por la atracción gravitatoria del sistema Sol-Luna –Tierra y a la rotación de este sistema (Lynn, 2013); la segunda es producida por el viento. El tránsito de la onda de mareas genera corrientes que en bahías con boca estrecha tienen grandes velocidades, las cuales pueden ser aprovechadas para la generación eléctrica. Estas corrientes inducidas por mareas se caracterizan por ser predecibles, aunque con un grado de incertidumbre. El movimiento neto del agua, que incluye el flujo periódico dado por las mareas, se conoce como circulación residual (Tonini, 2010), y generalmente tiene un orden de magnitud de velocidad menor a las corrientes mareales. El flujo residual es el resultado de componentes de carácter aleatorio por naturaleza, incluyendo la interacción no lineal del flujo con la topografía irregular, la geometría de la costa, fricción de fondo, turbulencia de gran escala, *eddies* e interacción entre corrientes y olas (Tonini, 2010).

Gracias a la simulación numérica, varios autores han notado la importancia de estos efectos no lineales en la Patagonia continental (Simionato *et al.*, 2004). Desafortunadamente, no hay evidencia observacional directa en la región, solo registros de corta duración en lugares específicos. Sin embargo, de acuerdo a Tonini, (2010), las magnitudes de velocidad de la corriente residual están entre un orden o dos de magnitud inferior a las corrientes debidas a las mareas, haciendo que el flujo periódico sea una fuente predecible. Moreira *et al.*, (2011) definieron los sitios propuestos para la explotación energética de este trabajo como un sistema macro-mareal, donde las corrientes de mareas tienden a ser más intensas que las corrientes residuales. Esta ventaja representa beneficios tecnológicos en términos de generación energética, planificación del suministro de energía y estructuras de flujos de red.

A nivel global, la amplitud de la marea es muy diferente de un litoral marítimo a otro según el mapa de distribución mundial de alturas de marea media (**Figura 1.1**) (Renewable Energy Agency, 2014). Por ejemplo, en el Océano Pacífico y en el Mar Mediterráneo alcanza valores muy bajos, solo decenas de centímetros. Por el contrario, se amplifica y alcanza valores notables en determinados sitios, como aquellos donde la profundidad del mar es baja, la costa presenta pendiente reducida, existe una geometría que produce interferencia por las costas, o donde existen fenómenos de resonancia (como sucede en algunas bahías, en las que el agua puede subir su nivel varios metros, debido a que el tiempo de llenado y de vaciado coincide con el período de la marea, (Lifschitz *et al.*, 2019). En el Atlántico se observan significativas amplitudes de marea, si bien existe un número limitado de zonas donde es posible la explotación de la energía mareomotriz. El rango de mareas en la Bahía de Fundy (Canadá) es de 15 m, mientras que en el Estuario de Severn (Reino Unido) alcanza los 12 m. La amplitud de mareas en el litoral sudatlántico de nuestro país es una de las mayores del mundo después de los sitios mencionados, (Renewable Energy Agency, 2014).

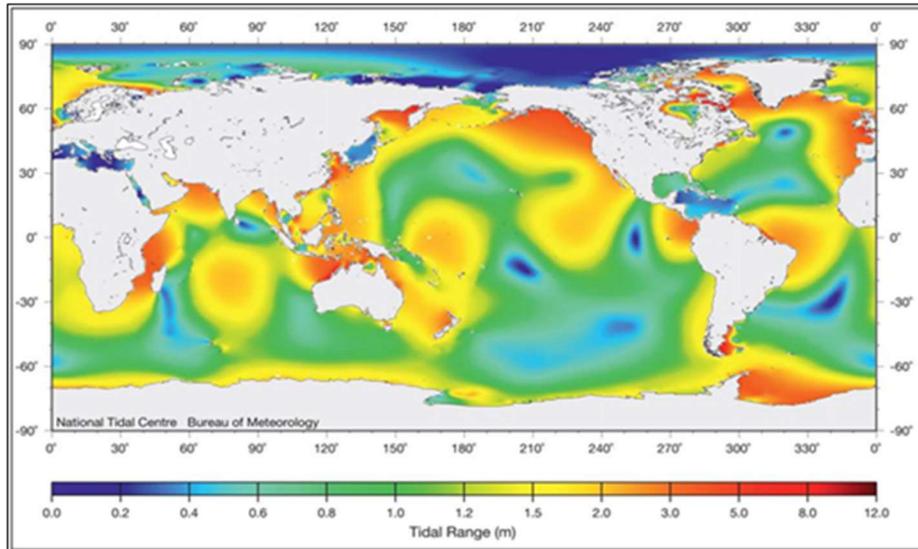


Figura 1.1. Mapa mundial de alturas de marea media (Renewable Energy Agency, agosto 2014).

La relación entre amplitud de mareas y corrientes depende de una interacción compleja entre el movimiento de grandes volúmenes de agua y la geomorfología y efectos locales batimétricos (Lynn, 2013). En mar abierto, las velocidades de las corrientes de mareas no son muy intensas. A medida que estas corrientes encuentran obstáculos topográficos tales como la costa, bahías con bocas pequeñas, canales angostos o someros, o circulaciones alrededor de islas, las velocidades de las corrientes se intensifican (Adcock y Draper, 2014; Elliot, 2012). La **Figura 1.2** exhibe las regiones costeras del mundo con magnitudes de corrientes de mareas importantes, donde se destaca la costa patagónica en Argentina, (Lynn, 2013).



Figura 1.2. Regiones costeras con un alto potencial de corrientes de mareas. (Lynn, 2013).

A pesar que hay claras indicaciones de alto potencial energético de corrientes de mareas en la zona patagónica, en la actualidad hay una significativa carencia de datos disponibles que respalden el desarrollo de la generación comercial de energía a partir de las corrientes de mareas. Los datos existentes son principalmente alturas de mareas para ubicaciones específicas, a través de tablas del SHN. Solo se cuenta con valores aislados de velocidades de las corrientes y para un número pequeño de sitios (SHN), (Dragani *et al.*, 2016). Más aún, no existe una medición sistemática de este parámetro en el litoral chubutense.

En este capítulo se realiza la descripción de las velocidades de corrientes de mareas utilizando datos históricos del SHN, mediciones propias y métodos alternativos de cálculo. El objetivo fue evaluar el recurso energético de corrientes de mareas mediante la estimación de la densidad de la potencia teórica, a fin de identificar sitios potenciales para el aprovechamiento energético en la costa de la provincia del Chubut.

1.1.1 Características y clasificación de las mareas astronómicas

Fuerzas astronómicas causantes de las mareas (Our Restless Tides, NOAA)

Las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol y la fuerza centrífuga del sistema Sol-Tierra-Luna, actúan sobre las aguas de los océanos produciendo las mareas. La Luna y la Tierra rotan alrededor de su centro común de masa conocido como el baricentro. Los dos cuerpos astronómicos tienden a atraerse por la atracción gravitacional y simultáneamente a separarse por la fuerza centrífuga producida a medida que rotan alrededor del baricentro. Estas fuerzas gravitacionales y centrífugas son balanceadas solamente en los centros de masa de los cuerpos individuales. En otros puntos sobre la superficie las dos fuerzas no están en equilibrio, dando como resultado las mareas en los océanos.

A medida que la Tierra rota alrededor del baricentro, la fuerza centrífuga producida en el centro de masa de la Tierra es dirigida fuera del baricentro. Debido a que el centro de masa de la Tierra está en el lado opuesto del baricentro con respecto a la Luna, la fuerza centrífuga producida en el centro de masa de la Tierra es alejada de la Luna. Todos los puntos sobre la superficie de la Tierra experimentan la misma magnitud y dirección de esta fuerza centrífuga. Por el contrario, el efecto de la fuerza gravitacional es diferente de un lugar a otro porque la magnitud de esta fuerza varía con la distancia del cuerpo atrayente. Para el sistema Tierra-Sol se aplica la misma teoría con la diferencia que el baricentro del sistema de la Tierra-Sol está en un punto bien adentro del Sol porque éste tiene más masa.

En cualquier punto de la superficie de la Tierra, la fuerza de producción de mareas puede ser resuelta en dos componentes: uno vertical, o perpendicular a la superficie de la Tierra, y otro horizontal, o tangencial a la superficie de la Tierra; ya que el componente horizontal no se opone de ninguna manera a la gravedad, las fuerzas de producción de mareas son generadas por esta componente.

Si las aguas oceánicas fueran a responder exclusivamente a las fuerzas de tracción y la Tierra estuviera cubierta de agua con profundidad uniforme, sin continentes ni obstáculos, la superficie se aproximaría a un esferoide alargado; en la cara de la Tierra que mira la Luna o el Sol, una fuerza de producción de marea neta (o diferencial) actúa en la dirección de la atracción gravitacional de la Luna o del Sol o hacia la Luna o el Sol. En la cara de la Tierra directamente opuesta a la Luna o al Sol, la fuerza de producción de marea neta actúa en dirección a la mayor fuerza centrífuga o lejos de la Luna o el Sol. A medida que la Tierra rota, uno puede esperar idealmente encontrar una marea alta seguida de una marea baja en el mismo lugar 6 horas después, luego la segunda marea alta después de las 12 horas y así sucesivamente. Este esferoide o envolvente de la fuerza de marea producida por el efecto de la Luna es acompañada por, e interactúa con, una fuerza de marea producida por el Sol. Sin embargo, existe un amplio rango de variables astronómicas en la producción de mareas. Algunas de éstas son las distancias cambiantes de la Luna con la Tierra y de la Tierra con el Sol, el ángulo que la órbita de la Luna forma con el ecuador de la Tierra, el ángulo en el que el Sol aparece en la órbita anual de la Tierra y de las fases variables de la Luna con respecto al Sol y la Tierra. Además, existen restricciones del flujo del agua causado por los continentes, las variaciones del fondo oceánico, los efectos meteorológicos, entre otros.

La amplitud de la marea en un lugar en particular no es constante, sino que varía día a día. Parte de esta variación es causada por los efectos del viento y del clima, pero mayormente es un fenómeno periódico relacionado con las posiciones del Sol y de la Luna en relación a la Tierra. Este cambio de día a día, responde a tres variaciones, cada una asociada con un movimiento particular de la Luna; la variación total en la amplitud de la marea es el resultado de la combinación de estas variaciones. Las mismas son:

Efecto de las fases de la luna: debido a la posición cambiante de la Luna en relación a la Tierra y al Sol durante sus fases de ciclo mensual, las fuerzas de tracción (combinación entre la fuerza gravitatoria y centrífuga) generadas por la Luna y el Sol actúan de distinto modo a lo largo de una línea común; se presentan situaciones de amplitudes máximas, con las mayores intensidades de corrientes (marea de sicigias) y de amplitudes mínimas con intensidades más bajas (cuadratura). Las mareas de sicigias ocurren dos veces por mes (cada 14/15 días), en luna llena o Luna nueva: las fuerzas de tracción del Sol y la Luna están alineadas, con lo cual, se suman. En mareas de cuadratura, la luna está en cuarto menguante y cuarto creciente, y las fuerzas del Sol y la Luna se oponen. La relación entre las amplitudes de sicigias y cuadratura puede alcanzar como máximo 2 o 1.

Efectos de Paralaje (de la Luna y el Sol): ya que la Luna sigue un patrón elíptico, la distancia entre la Tierra y la Luna variará a través del mes en cerca de 50 km. La atracción gravitacional de la Luna para las aguas de la Tierra cambiará en proporción inversa al cubo de la distancia entre la Tierra y la Luna, (Ley de Gravedad de Newton). Una vez cada mes, cuando la Luna está más cerca de la Tierra (perigeo), las fuerzas generadoras de mareas serán más altas de lo normal, por lo que se producirán mareas de amplitud por encima del promedio. Aproximadamente 2 semanas después, cuando la Luna está más alejada de la Tierra

(en apogeo), la fuerza de producción de marea lunar será más pequeña y las amplitudes de mareas serán menores al promedio. De igual manera, en el sistema Sol-Tierra, cuando la Tierra está más cerca al sol (perihelio), cerca del 2 de enero de cada año, las amplitudes de marea aumentarán y cuando la Tierra está más lejos del Sol (afelio), alrededor del 2 de julio, las amplitudes de marea se reducirán.

Efectos de Declinación Lunar: así como el plano de la órbita de la Tierra (la eclíptica) está inclinada 23. 5° con respecto al ecuador, esto produce las estaciones a medida que la tierra realiza su movimiento alrededor del sol, de manera similar la Luna cruza el ecuador provocando diferentes amplitudes de mareas.

Variabilidad temporal de las mareas astronómicas

El punto máximo que alcanza el nivel del mar se conoce como momento de pleamar. Cuando este nivel es el mínimo, se denomina bajamar. Entre ambas condiciones, se observa un período cuya duración oscila desde unos minutos hasta una hora, conocido como ‘estoa’, durante el cual las corrientes son prácticamente nulas. Un poco antes de las estoas, las corrientes de marea se debilitan gradualmente en intensidad, para luego incrementarse progresivamente hasta alcanzar magnitudes máximas con un cambio de rumbo de aproximadamente 180°. Consecuentemente, la corriente de marea presenta una variabilidad temporal cíclica diaria. Desde el punto de vista oceanográfico, las mareas astronómicas se clasifican en función de la importancia relativa de sus constituyentes. La onda de marea se puede describir como la suma de componentes armónicas con diferentes amplitudes y frecuencias (Lynn 2013, Gill 1982). Según Pugh (1987), la marea astronómica se clasifica en función de la importancia relativa de los constituyentes diurnos respecto a los semidiurnos mediante un factor de forma:

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}}, \quad (1.1)$$

donde F es el factor de forma, M_2 es la onda semidiurna lunar principal, de periodo 12.42 h, S_2 la semidiurna solar principal, con 12 h de periodo, K_1 la declinación lunisolar diurna con un periodo de 23.93 h. y O_1 la declinación lunar diurna con una periodicidad de 25.82 h, siendo H la amplitud asociada a cada constituyente (Lynn, 2013). La M_2 y S_2 son las constituyentes principales de la onda de marea. Valores de F entre 0 y 0,25 corresponden a mareas semidiurnas, entre 0,25 y 1,5 a mareas mixtas principalmente semidiurnas, de 1,5 a 3, mareas mixtas principalmente diurnas y valores superiores a 3 significa mareas diurnas. Las mareas diurnas presentan un solo pico máximo de amplitud por día, solo una pleamar y una bajamar diarias. Ejemplo de este tipo de mareas se encuentra en el norte del Golfo de México o en el sudoeste asiático. Las mareas de carácter semidiurno por lo general se producen dos flujos y dos reflujos cada 24 h 50’ (día lunar). Las situaciones de flujo son en la dirección de propagación de la onda de marea, y las de reflujo opuestas a las anteriores, pero con intensidades semejantes. Este tipo de mareas se encuentra en las costas atlánticas de Estados Unidos, Europa, y en particular en las costas patagónicas. Las mareas mixtas se deben a una combinación entre mareas diurnas y semidiurnas. Estas mareas son típicas de la

costa oeste de Estados Unidos y Canadá. La **Figura 1.3** muestra la variación temporal típica de alturas de mareas, medidas en Puerto Madryn para enero-marzo 2018 (tablas de marea, SHN).

Desde el punto de vista de la amplitud de la oscilación de la superficie libre del mar (clasificación oceanográfica clásica), se distingue entre marea micromareal, con amplitudes de mareas inferiores a un metro, mesomareal entre 1 y 3,5 m y macromareal por encima de 3,5 m (Hayes, 1979).

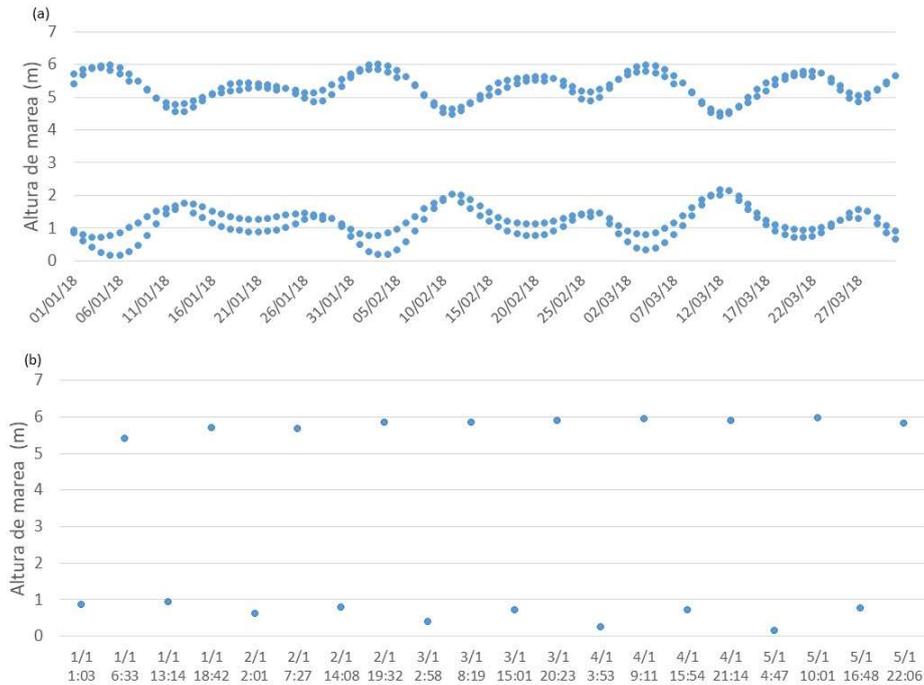


Figura 1.3. (a). Alturas de las pleamares y bajamares diarias ‘estimadas’ (m) en Puerto Madryn, enero-marzo 2018. (b) Estimaciones de altura (m) para los días del 1 al 5 de enero (Tablas de marea, SHN, 2018).

1.1.2 Mareas en el litoral argentino

Argentina tiene una longitud de costa de 5117 km y una plataforma continental de 960000 km², desde el Río de la Plata hasta las Islas Malvinas (catálogo GEMA, 2018), considerada como una de las plataformas más extensas del mundo. En el litoral atlántico argentino, la componente principal de las mareas es la semidiurna (Rivas, 1997; Tonini, 2010). Glorioso y Flather (1997) concluyeron que en esta región el flujo de energía debido a M₂, domina la circulación, siendo dos órdenes de magnitud mayor que las debidas a los otros constituyentes. La Patagonia Argentina cuenta con numerosos sitios en donde las amplitudes de marea alcanzan valores característicos de regímenes macro-mareales, es decir, superiores a los 4 metros (Bindelli *et al.* 2020; Moreira *et al.*, 2011). El SHN cuenta con una base de registros de corrientes que datan desde la década del sesenta y del setenta hasta la actualidad. Muchos de ellos se obtuvieron por el propio SHN, y otros tantos cedidos por terceros (por ejemplo, empresas petroleras). Basados en

esta información de campo, Dragani *et al.*, (2016) y Lifschitz *et al.*, (2019) realizaron un análisis sintético de las corrientes a lo largo del litoral argentino, entre la costa y la isobata de 15/20 m. (Figura 1.4). La gran amplitud de marea presente en la región de estudio (Tabla 1.1, Dragani, 2006), en conjunto con la geomorfología característica de la zona, crea condiciones para la explotación del recurso a partir de sistemas de generación eléctrica hidrocínética. La región costera patagónica comprendida entre el Sur del golfo San Matías y Tierra del Fuego presenta las mayores intensidades de corriente. En particular, el interior de las rías santacruceñas (Deseado, San Julián, Santa Cruz, Río Gallegos) y en las bocas de los golfos chubutenses San José y Nuevo donde se dan las mayores intensidades de corriente de marea de 2 m/s y 0,8 m/s respectivamente.

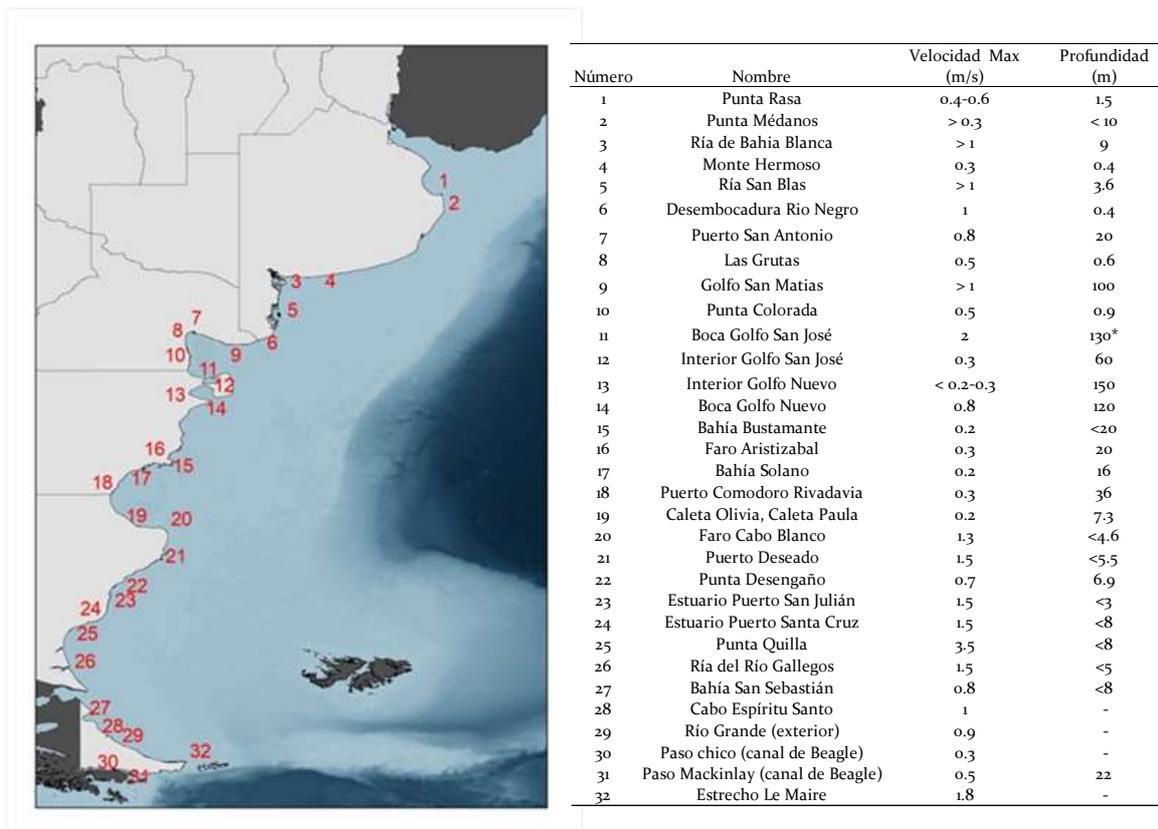


Figura 1.4. Corrientes de mareas en el litoral argentino (Dragani *et al.* 2016 y Lifschitz *et al.* 2019).

1.1.3 Sitios de estudio en la costa de Chubut

1.1.3.1 Aspectos territoriales y logísticos para la selección de sitios

El principal parámetro para determinar sitios favorables como para justificar un emprendimiento energético es la velocidad del fluido. En los primeros intentos para aprovechar las corrientes de mareas, desde un punto de vista energético, se establecía que éste debía superar un valor mínimo durante su ciclo. Para la mayoría de los investigadores este valor oscilaba entre 1,5 a 2,5 m/s. Polo *et al.*, (2008), indicaron un valor superior a 2m/s. La Electric Power Research Institute Inc. (EPRI, 2005) recomendó lugares que tengan flujos máximos mayores a 1,5 m/s;

a su vez, para la World Energy Council (2016) los lugares apropiados eran los que presentaban corrientes de mareas medias en sicigias con un mínimo de 2-2,5 m/s. Con el desarrollo de nueva tecnología, velocidades menores pueden ser consideradas para asegurar que el sistema sea capaz de entregar potencia de forma eficiente con un amplio rango de velocidades de corrientes.

En el presente estudio se realizó un análisis de aspectos territoriales y logísticos para la identificación de sitios donde se podrían ubicar la THC. Estos factores no intervienen en el cálculo de potencia en forma directa, pero se deben tener en cuenta para la determinación de sitios favorables:

Accesibilidad del lugar: para efectuar las labores de mantenimiento, el equipo debe ser alcanzable fácilmente. Para ello, se debe evaluar el tipo de acceso al dispositivo; es decir, si es posible acceder por vía terrestre (si se cuenta con caminos, pasajes) o acuática. En el primer caso debe evaluarse la existencia de rutas y/o caminos disponibles y su transitabilidad. Si el terreno es propiedad privada debe obtenerse el permiso correspondiente para circular. En el caso de accesibilidad por mar, debe considerarse la existencia de una costa navegable, con arrecifes o con rompientes.

Cercanía de los puntos de generación a los puntos de consumo eléctrico: para evitar pérdidas excesivas por caída de tensión, en las cercanías de los dispositivos deben concentrarse los potenciales usuarios de la energía. Además, el mantenimiento de los equipos debe ser realizado con técnicos capacitados y disponerse de repuestos e infraestructura básica para acceder a los mismos. Debe evaluarse si el abastecimiento será de carácter local o la producción energética se inyectará al Sistema Interconectado Nacional.

Seguridad física de la instalación: los dispositivos deben estar protegidos de posible vandalismo. Para ello es necesario el apoyo y supervisión de la prefectura o la policía local. Se debe contar con elementos de protección destinados a garantizar la integridad y funcionamiento de los aparatos conectados al sistema.

Interferencia con navegación: ni el dispositivo ni las estructuras asociadas deben interferir los canales de navegación civil, comercial ni militar, radas o zonas de maniobra de buques (Bhuiyan *et al.*, 2022). Tampoco deben obstruir las vías naturales de pasaje de mamíferos marinos, como las ballenas y la fauna acuática en general.

Interferencia con condiciones naturales: los dispositivos pueden generar modificaciones significativas en la hidrodinámica del ambiente, afectando los patrones de erosión y sedimentación, (Uihlein y Magagna 2016), patrones de circulación y clima de olas (Bhuiyan *et al.*, 2022). El flujo de agua y el nivel pueden verse modificados, incluso el rango de marea puede ser disminuido y los tiempos de pleamar y bajamar demorados (Fallon *et al.* 2014).

Existencia de una estructura civil: se debe contar con una estructura de apoyo que facilite el diseño y construcción del dispositivo y disminuya costos.

Zona protegida: es importante tener en cuenta si los sitios elegidos para la instalación del dispositivo pertenecen a zonas protegidas, como parques nacionales, reservas de biosferas u otras categorías. En estos casos, se debería contar con todos los permisos correspondientes otorgados por Parques Nacionales.

1.1.3.2 Sitios seleccionados – Descripción

Para la determinación de los sitios se inspeccionaron las cartas náuticas del SHN (se obtuvieron las corrientes y las profundidades), la base de datos de tablas de mareas del SHN, información suministrada por autoridades provinciales y registros de mediciones *in situ*. A estos datos se les sumó la determinación de algunos parámetros fisicoquímicos. Dado que la densidad del agua de mar también afecta la potencia contenida en el flujo, se realizó su determinación según el lugar de estudio. Los sitios seleccionados fueron: boca del Golfo Nuevo (GN), boca del Golfo San José (GSJ), que conforman la Península Valdés (PV), la desembocadura del Río Chubut en la zona del puerto de Rawson (RCH) y el Canal Leones al sur de la provincia (CL) (**Figura 1.5**).

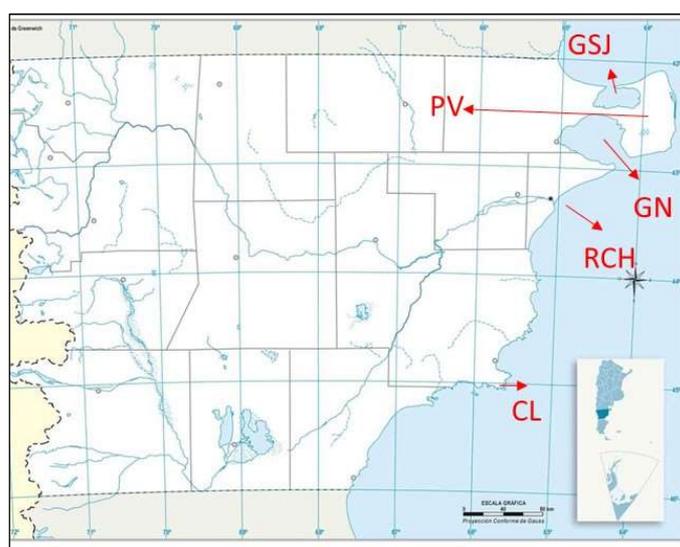


Figura 1.5. Sitios de la costa de la provincia del Chubut seleccionados para el análisis de recursos energéticos. GSJ: golfo San José, GN: golfo Nuevo, RCH: Río Chubut, CL: Canal Leones.

Desembocadura del Río Chubut

La inspección fue focalizada en dos puntos: el puerto y el paraje conocido como “El Elsa” (ubicación geográfica: $43^{\circ}20'5.11''S$; $65^{\circ}4'0.82''O$). Para estos sitios no se contaba con información de corrientes preexistentes, entonces se debieron realizar mediciones en la zona del puerto. Ambos sitios, el puerto y el puente, son de fácil acceso por la ruta provincial N° 1, o ruta nacional N° 3 (**Figura 1.6**).

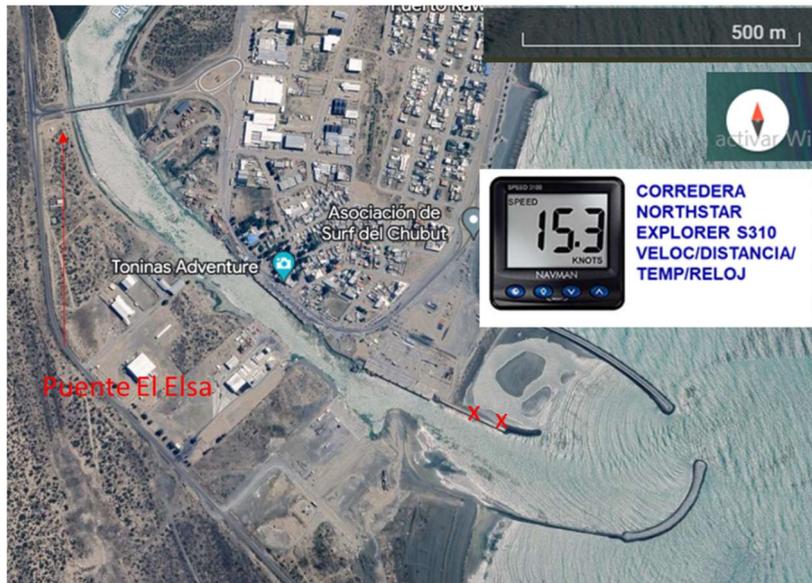


Figura 1.6. Foto satelital del Puerto de Rawson y paraje- puente 'El Elsa'. Se muestra la zona de mediciones de velocidad (izquierda) e instrumento (derecha).

El Río Chubut es el más importante curso de agua de la provincia. Tiene su origen en la cordillera y desemboca en el Atlántico formando un estuario mesomareal (Owen *et al.*, 2005). La descarga del río está altamente influenciada por el régimen mareal hasta 10 km río arriba de su desembocadura, particularmente durante la pleamar y en periodos de sicigias (Owen *et al.*, 2005). La interface entre mareas y la descarga del río controla el flujo hacia su desembocadura. El régimen mareal es semidiurno, con rangos de mareas promedios de 4,95 m durante sicigias y de 3,44 m en cuadratura (González y Estévez, 2008).

En condiciones climáticas normales, un frente de mareas penetra el estuario interaccionado con las aguas del río. La diferencia entre las densidades de los dos medios (producto de la salinidad y temperatura propias de ambos fluidos) produce una estratificación. La entrada de esta cuña reduce la descarga y eleva el nivel del río. Después de la estoa de pleamar, la marea comienza a retrotraerse, la descarga fluvial supera las aguas más densas afectando la estratificación. Esta interacción regula los desplazamientos de agua y, por lo tanto, los flujos de sal, nutrientes y sedimentos que entran y dejan el estuario diariamente (Industrias Bass, 2018). En condiciones normales, el río descarga 40 m³/s; sin embargo, durante pleamar este volumen es retardado produciéndose un embalsamiento de las aguas fluviales. Por el contrario, durante la bajamar, se escurren rápidamente entre 300 – 350 m³/s (Veiga Martinez, 1994).

En 2013 se planeó un proyecto que consistió en la construcción de un puente y dique de mareas en el estuario del río con el objetivo de generar energía y realizar una expansión agrícola para recuperar hectáreas productivas, a través de un dique de contención en el río situado muy cerca de su desembocadura en el Océano Atlántico. El proyecto preveía la colocación de dos turbinas que generarían en total 10 MW de potencia. Además de la construcción del dique para la generación de energía y la posibilidad de irrigar el agua a tierras para convertirlas en productivas,

se pretendía originar un impacto turístico a causa del puente que uniría el Puerto de Rawson con un sector de playa conocido como “Playa Magagna”. El objetivo original del proyecto se concretó parcialmente, ya que solamente se construyó el puente, inaugurado en 2016 (Secretaría de Producción y Ambiente de la municipalidad de Rawson, 2016).

Península Valdés

La Península de Valdés está ubicada en la zona noreste de Chubut, formada por los Golfos Nuevo al sur, alimentado por el Océano Atlántico y Golfo San José al norte, alimentado por el Golfo San Matías, y unida al continente a través del istmo Ameghino (**Figura 1.4; Figura 1.7**). Los primeros estudios energéticos se focalizaron en esta península. En esta zona, al fenómeno de apreciable altura de las mareas (**Tabla 1.1**) se le suma otro de origen topográfico, que favorece la reflexión de las aguas y perturba la propagación de las corrientes marinas. Este fenómeno produce un desfase horario entre 4 a 6 horas constante entre las alturas de mareas del Golfo San José y del Golfo Nuevo, que resulta en una diferencia de nivel de entre 5 y 8 m. Es decir que, mientras en uno de estos golfos la marea está próxima a la pleamar, en el otro está cerca de la bajamar y recíprocamente. Este evento se repite constantemente a través del tiempo. En definitiva, el fenómeno que en otras zonas se logra aprisionando con compuertas o cierres, en la zona citada, lo brinda la naturaleza.

Esta configuración de mareas excepcional y extremadamente favorable llevó a que, en el transcurso del tiempo, se proyectaran diversos aprovechamientos energéticos. En la década del sesenta se propusieron varios proyectos de aprovechamiento energético de mareas, pero ninguno de ellos progresó debido a los altos costos de inversión (Chingotto, 2005). La primera propuesta energética en la región estuvo a cargo de Oca Balda y Romero en 1928. Se trató de un emprendimiento de 2000 MW de capacidad que planteaba el cierre del GSJ y un sistema de operación de embalse simple. En 1929, Érranosle propuso conectar ambos golfos a través de un corte en el istmo, con un proyecto de capacidad de 55 MW. La misma idea fue presentada años más tarde por Sogreah en 1959 y Fenzloff en 1972, con una capacidad de 600 MW y 4900 MW respectivamente. En 1984, Aisicks y Zyngierman propusieron también el cierre del GSJ, haciendo un dique de embalse simple (Chingotto, 2005). En esa época, la variable ambiental no era considerada tan importante como lo es en el presente y, afortunadamente, estos planes no se concretaron, pues ambos golfos difieren en sus características oceanográficas (temperatura, salinidad) y biológicas. El impacto ecológico de unir ambos golfos hubiera sido catastrófico (Moreira *et al.*, 2011). El sistema de la Península de Valdés constituye una reserva natural de extrema importancia para el ecosistema marino, y diversos argumentos de conservación han impedido que se avance más en la zona, declarada “Patrimonio Natural de la Humanidad” en diciembre de 1999.



Figura 1.7. Península de Valdés (Chubut). La zona de color verde muestra los límites del área natural protegida. GSJ: golfo San José, GN: golfo Nuevo.

Golfo Nuevo

El Golfo Nuevo (GN) constituye una cuenca o bahía semicerrada que comunica al Océano Atlántico a través de una boca de unos 16 km de ancho entre punta Ninfas y Morro Nuevo (**Figura 1.7**) (Rivas y Ripa, 1989). Este golfo es el área más importante de reproducción y cría de la ballena franca austral y residencia y/o área de alimentación de delfines, orcas, lobos marinos y varias especies de aves marinas. Al sitio de estudio se accede a través de la ruta provincial N° 1, la cual permite llegar a Punta Ninfas (punta oeste del golfo). Este golfo posee una forma elíptica con una superficie aproximada de 2500 km² y una profundidad máxima registrada de 184 m. En la zona del estrecho de entrada las profundidades son en general menores a 50 m disminuyendo hacia la costa (Mouzo y Garza, 1979). En su parte central, presenta unos 70 km de longitud y 48 km de ancho, siendo considerablemente más profundo que la plataforma continental adyacente (Mazio *et al.*, 2004). La amplitud media de mareas es de 4,13 m, alcanzando máximas medias de 5,21 m y mínimas medias de 1,08 m (SHN, Tablas de Mareas, 2016).

La zona presenta un régimen meso a macromareal semidiurno con desigualdades diurnas. Según Krepper y Rivas (1979) no existe una circulación definida en las aguas costeras próximas a Puerto Madryn. De acuerdo a Mazio *et al.*, (2004), la circulación es dominada por las mareas, aunque las corrientes mareales dentro del golfo son menores respecto de aquellas en la plataforma continental adyacente (posiblemente debido a la profundidad del mismo). Las corrientes en la boca del GN pueden alcanzar 0,9 m/s en condiciones de sicigia (Dragani *et al.*, 2016), pero se reducen drásticamente hacia el interior y no exceden los 0,20/0,30 m/s.

Golfo San José

El golfo San José (GSJ) se encuentra situado al noreste de la Provincia de Chubut, separado del Golfo Nuevo por el Istmo Ameghino y comunicado con el

Golfo San Matías por el norte (**Figura 1.7**). Tiene una superficie de unos 8.14×10^8 m², siendo su profundidad media de alrededor de 30 m (Pizarro, 1975). Es de forma rectangular, siendo el largo mayor en el sentido este-oeste. La boca que lo comunica con el Golfo San Matías tiene unos 6.8 km de ancho y se sitúa hacia la mitad oeste del lado norte (Rivas and Beier, 1990). Desde el punto de vista batimétrico, el golfo puede ser considerado una 'hoya' ya que en la boca presenta un umbral de mucha menor profundidad. En cambio, la zona central es relativamente plana con profundidades de alrededor de 50 m. La mayor profundidad se encuentra en la boca donde existe una estrecha fisura de más de 80 m (Paterlini *et al.*, 2013), sin embargo, la profundidad media de la boca es de 12 m (Pizarro, 1975). El golfo presenta un régimen de mareas semidiurno; las pleamares varían entre un máximo de 8,47 m (mareas de sicigias) y un mínimo de 5,55 m (mareas de cuadratura). El nivel medio del golfo es de 4,11 m (Rivas and Beier, 1990). Las corrientes son muy intensas en la boca del golfo, pudiendo alcanzar en sicigia casi los 3 m/s en su costa oeste (punta Quiroga) (SHN 2013; Tonini *et al.*, 2006). Sobre su lado este (Punta Buenos Aires) las intensidades son de 0,6 m/s. En el interior del golfo las corrientes se reducen considerablemente y no superan los 0,30 m/s (SHN, 2013). Dragani (2006) hicieron mediciones en la playa Bengoa, en el interior del golfo, sobre su margen este (**Figura 1.7**) con un correntómetro AANDERAA RCM9 registrándose una velocidad media de solo 0,1 m/s.

Canal Leones

El Canal Leones (CL) se encuentra ubicado entre el continente y la isla homónima, en el sector norte del Golfo San Jorge (**Figura 1.4**, **Figura 1.8**). Tiene un ancho de 1 km aproximadamente y profundidades entre 18 y 22 m (carta náutica, SHN). Las costas sobre el continente y la isla son rocosas. La accesibilidad por tierra es complicada, pues solo puede llegarse al lugar a través de caminos de tierra y con vehículos de tracción total. La dinámica de la zona es compleja y variable. Las características de la circulación local son desconocidas y a excepción de estudios muy específicos regionales, no existe descripción observacional de la circulación en general (Matano and Palma, 2018). Desde el año 2008, esta zona es considerada Parque Interjurisdiccional Marino Costero Patagonia Austral. La **Figura 1.8** muestra el canal en cuestión.

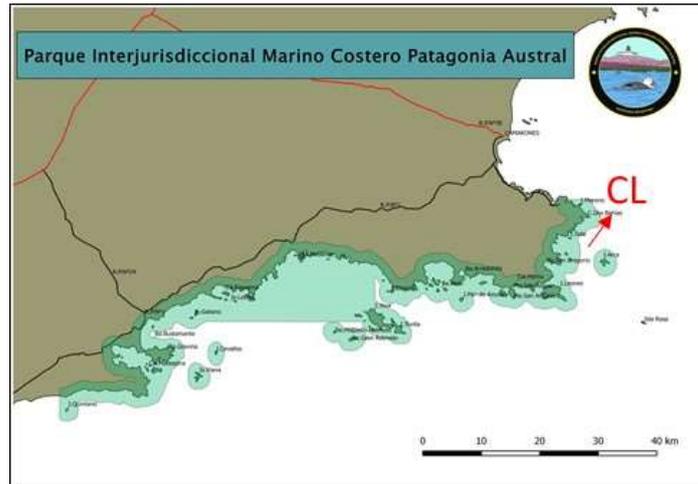


Figura 1.8. Parque Interjurisdiccional Marino Costero Patagonia Austral (página oficial de Parques Nacionales), se marca el Canal Leones.

1.2 Materiales y Métodos

1.2.1 Energía de las mareas

La energía de las mareas presenta dos componentes: energía potencial, dada por la amplitud de mareas, y energía cinética, resultante de las velocidades de corrientes asociadas. Según las ecuaciones de movimiento y conservación de masa en fluidos, la energía cinética contenida en una masa de agua m , con velocidad uniforme V unidireccional, está dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1.2)$$

El flujo másico m , de densidad ρ , a través de una superficie de control estacionaria de área frontal S_{tr} en un diferencial de tiempo dt , se puede expresar como:

$$m = \rho S_{tr} V dt \quad (1.3)$$

Consecuentemente, la energía cinética que pasa por S_{tr} es

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S_{tr} V^3 dt \quad (1.4)$$

Luego, la potencia cinética teórica de la corriente P (W) es proporcional al producto entre el cubo de la velocidad, el área transversal y la densidad (Lee y Turnok, 2008, Vitorino *et al.*, 2016, Ibrahim *et al.*, 2021).

$$\frac{dE_c}{dt} = P(t) = \frac{1}{2} \rho S_{tr} V^3 \quad (1.4.a)$$

La distribución espacial del campo de velocidades puede integrarse sobre toda la sección transversal S_{tr} , para cada instante de tiempo t :

$$P(t) = \iiint \frac{1}{2} \rho V^3 dS_{tr}, \quad (1.4.b)$$

Ecuación que describe la potencia hidrocínética contenida en un flujo de agua. La potencia presenta una variabilidad en el tiempo dada por la variación temporal de la velocidad del flujo, que describe un perfil característico de regímenes mareales, con variación casi cíclica inducida por el movimiento periódico de las mareas. Una estimación preliminar de la potencia teórica puede obtenerse utilizando las ecuaciones (1.4.a) y (1.4.b). Según las mismas, se debe especificar la velocidad del flujo y la forma y tamaño del área transversal S_{tr} , que tiene en cuenta las restricciones propias del canal.

1.2.2 Medición de las velocidades y densidades en la desembocadura del Río Chubut

Mediciones de velocidad superficial fueron llevadas a cabo en la desembocadura utilizando flotadores esféricos, durante marea creciente y bajante (momento correspondiente a la mitad del ciclo), capturando las intensidades más altas (velocidades máximas) entre estas dos condiciones. Para las mediciones se seleccionaron dos secciones transversales, suficientemente alejadas la una de la otra, a lo largo de un tramo de la zona recta del río (**Figura 1.6**). Buchanan y Somers (1976) documentaron este método como una forma alternativa de estimar las velocidades de flujo en el pasaje de un río. Los flotadores estuvieron parcialmente sumergidos y no hubo influencia del viento u olas durante las campañas (15 de septiembre y 15 de diciembre del 2018), ni se registraron vientos fuertes o ráfagas (velocidades inferiores a 20 km/h). Las mediciones de velocidades, en ambos días de campaña, se realizaron cuando la onda de marea se encontraba en período de transición desde marea de sicigias a cuadratura (Tablas de Mareas SHN, 2018). Las alturas de las olas fueron menores a 0,75 m (Tablas de Mareas SHN, 2018). Además, la desembocadura del río se encuentra aislada del oleaje fuera del puerto por dos rompeolas que protegen la entrada. Por lo precedentemente expuesto, se consideró que las mediciones realizadas no se vieron afectadas ni por el viento ni por el oleaje. Bajo estas condiciones, el método de flotadores tiene un error de 10 %, (Buchanan y Somers, 1976).

Para complementar las mediciones usando el método de flotadores, se tomaron registros de velocidades con una corredera náutica (Northstar Explorer S310 Veloc/Distancia/Temp/Reloj) en febrero de 2019 en el mismo lugar (**Figura 1.6**). Se montó un dispositivo sencillo para poder realizar las mediciones desde una embarcación fondeada, utilizando la corredera montada en el extremo de un caño con una placa de madera impermeabilizada en la cual se realizó la perforación para montar el transductor (**Figura 1.9**). Se utilizó una placa con una superficie tal que simule el comportamiento laminar del agua en el deslizamiento de un casco de embarcación sobre la superficie del agua. La placa se montó en el extremo de un soporte metálico de aproximadamente 3,5 m de longitud, de modo que fuera posible hundir y medir la velocidad a distintas profundidades. Con ese fin, se

realizaron marcas en el soporte a fin de poder sumergirlo cada 50 cm. El equipo se completó con una batería de plomo ácido de 12 V provista de un cable de alimentación con interruptor y fusibles para la protección de la misma. Las mediciones se realizaron sujetando en forma manual el medidor por sobre la borda de una embarcación semirrígida fondeada. Para determinar la densidad del agua en esta zona, se tomaron muestras en las condiciones de marea creciente y bajante durante las campañas de medición y fueron analizadas en el laboratorio del Centro Nacional Patagónico (CENPAT) de la ciudad de Puerto Madryn. Las mediciones fueron efectuadas con multi-sonda YSI 556 MPS, calibrada con solución YSI 3169 (50 mS/cm). Cabe señalar que, para el caso de la desembocadura del río en estudio, no se cuenta con cartas náuticas donde se registren datos de velocidad de corrientes de mareas.



Figura 1.9. Fotos del dispositivo utilizado en las mediciones de velocidad en Río Chubut.

1.2.3 Estimación de las velocidades y densidades en las bocas de los golfos y CL

1.2.3.1 Información disponible en la bibliografía

En el GN se cuenta con un registro de velocidades de corrientes de marea en su boca de corta duración (siete días) (Mazio *et al.*, 2004). El correntómetro utilizado fue colocado en la posición $4^{\circ}36''S$ $64^{\circ}14'06''W$. Las lecturas se efectuaron entre el 20 y el 27 de octubre del 1972, con un periodo de muestreo de 6 minutos a una profundidad de 70 m aproximadamente. Conjuntamente, el SHN cuenta con predicciones de corrientes en la boca del golfo para el año 2020. Para la boca del GSJ y CL no se poseen mediciones in situ, ni predicciones del SHN. El registro de velocidades en la boca del GN fue considerado insuficiente como para valorar el recurso. La densidad de las aguas de ambos golfos se calculó según los diagramas T-S presentados en el trabajo de Rivas y Beier (1990), quienes, en campañas oceanográficas realizadas durante abril y septiembre en el interior de los golfos, midieron temperatura y salinidad en varios lugares y consideraron valores promedios.

1.2.3.2 Métodos de cálculo de velocidades

El primer análisis aplicado fue utilizando las intensidades de corrientes según las cartas náuticas del SHN, para GN, GSJ y CL. Sin embargo, de acuerdo con las especificaciones técnicas (IEC, 2015), la velocidad máxima que figura en las cartas, en general no es suficiente para caracterizar el recurso y, por lo tanto, se aplicaron dos enfoques alternativos de cálculo para tener una estimación de la velocidad del flujo de marea a fin de poder estimar la potencia. El primero considera la velocidad promedio dada por las diferencias de alturas y periodos en pleamar y bajamar en un recinto cerrado con una única entrada/salida del agua. El segundo procedimiento de cálculo de corrientes supone un campo de velocidades, en la sección transversal, como el producto de dos funciones independientes que representan la variabilidad temporal y espacial. Este procedimiento requirió especificar una serie temporal de velocidades y se utilizó la serie resultado del primer método.

Método I. Velocidades derivadas de alturas y periodos de mareas

Este método fue propuesto por Contreras *et al.*, (2014) y consiste en utilizar una aproximación para obtener la velocidad en la boca de un golfo utilizando las alturas y periodos recolectados en un punto interior del mismo. El método es sencillo y requiere de poca información para calcular las corrientes de mareas. Los resultados obtenidos de esta manera proporcionan la variación temporal de la velocidad promediada en profundidad, con un periodo de observación promedio de 6 h. La información relevante consiste en el rango y duración de la marea en un punto interior durante un año, el área del golfo, y la sección transversal del canal de entrada/salida del recinto. Esta sección debe ser la única entrada o salida del agua (no debe existir canales subterráneos ni descarga de ríos), condición que cumplen tanto el GN como GSJ. Los datos de alturas y duración de la marea fueron en el caso del GN, mediciones *in situ* realizadas en el 2018 por el SHN en el muelle Luis Piedra Buena de la ciudad de Puerto Madryn y en el GSJ, son predicciones de alturas de mareas elaboradas por el SHN para el año 2020 en el fondeadero San Román (punto interior en el golfo). El método consiste en una serie de pasos que se detallan a continuación:

El rango ascendente/descendiente de mareas (R_{im}) es calculado a partir de los datos de nivel del mar para cada periodo (D_{im}). Así, la cantidad de agua que entra/sale el golfo (V_{ia}) será:

$$V_{ia} = R_{im} \cdot A_e \quad (1.5)$$

donde A_e es el área del golfo. Según Rivas y Ripa (1989), el área del GN es 2.44×10^9 m² y para el GSJ el área es 8.14×10^8 m² según Pizarro (1975).

Luego el flujo promedio (F_{im}) es:

$$F_{im} = \frac{V_{ia}}{D_{im}} \quad (1.6)$$

Y la velocidad del flujo (V) en la entrada del golfo se puede estimar como:

$$V = \frac{F_{im}}{S_{tr}} \quad (1.7)$$

Donde S_{tr} es el área transversal de entrada/salida. Debido a la naturaleza periódica de las mareas, el vector velocidad describe una elipse que oscila alrededor del cero. Por tal motivo, para obtener una evaluación preliminar de energía contenida en los flujos de mareas, se trabaja con las magnitudes de corriente.

Para tener una estimación del error cometido, las velocidades así calculadas se contrastaron con las intensidades que aparecen en las cartas náuticas y para la boca del GN fue posible contrastar el método aplicado a las predicciones de alturas de nivel del mar publicadas por el SHN para el año 2020 en Puerto Madryn. Las velocidades así obtenidas se compararon con las predicciones de corrientes del SHN.

Método II. Velocidades como resultado de considerar funciones independientes

El método hace suposiciones sobre el perfil de velocidad y sobre la batimetría. Se basa en suponer una dependencia temporal (t) y espacial (x, y, z) de la velocidad como dos funciones independientes, donde el espacio es representado por la profundidad de la sección, h :

$$v(x, y, z, t) = v(h, t) = v_{max}(t)v(h) \quad (1.8)$$

Donde $v_{max}(t)$ representa la marcha temporal de la velocidad máxima. Este enfoque requiere conocer la batimetría a lo largo de la boca del golfo. La misma se obtuvo de la carta náutica, de la zona en estudio, y fue necesario asumir un esquema de interpolación, optándose por la opción más simple que es una interpolación polinomial. La forma del fondo, a lo largo del canal fue definida tomando puntos de referencias extraídos de la carta náutica. Para una profundidad del lecho marino relativamente baja, el perfil de velocidad en la columna de agua puede ser estimado mediante una ley de potencia de $1/7$ (Lewis *et al.*, 2017) que se puede expresar como:

$$U(z) = \left(\frac{z}{\beta h}\right)^{\frac{1}{7}} \bar{U} \quad (1.9)$$

Donde z es altura sobre el fondo marino, β es un factor de rugosidad del fondo, h es la profundidad y \bar{U} es la velocidad promediada en profundidad. Si la velocidad en la superficie (U_s) es conocida, la ecuación puede reescribirse como:

$$U(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{7}} U_s(t) \quad (1.10)$$

Las velocidades obtenidas de esta manera son relativas al valor en superficie considerado unitario y disminuyen conforme aumenta la profundidad. Esta parte del análisis tuvo como objetivo estimar una distribución espacial de la velocidad en toda la sección transversal del canal. Para completar la descripción, se debe conocer la variación en el tiempo de la velocidad. Una vez descrita la distribución

en el tiempo y el espacio en la sección transversal del recinto, es posible estimar el recurso energético útil disponible con la ecuación (1.4.2).

1.3. Resultados y discusión

1.3.1. Sitios de estudio en la costa de Chubut

La elección de los sitios idóneos, para instalar una turbina hidrocínética, fue realizada teniendo en cuenta una serie de criterios, donde la velocidad del flujo y la profundidad del lugar constituían los principales factores para la decisión. Aspectos territoriales y logísticos que podrían favorecer o limitar el emprendimiento energético como: la accesibilidad del lugar, la cercanía a los sitios de generación y consumo energético, la seguridad de las instalaciones, la interferencia con el ambiente, la existencia de estructuras civiles y la presencia de áreas protegidas han sido, además, consideradas para la evaluación. Se seleccionaron cuatro sitios: la desembocadura del Río Chubut, la boca del Golfo Nuevo, el Canal Leones y la boca del Golfo San José. Cabe señalar que el litoral presenta otros sitios que podrían ser considerados para realizar futuros estudios de potencialidad energética, tales como Playa Magagna, Cangrejales y Bahía Bustamante, entre otros. El análisis de los aspectos logísticos mostró que, en la desembocadura del río Chubut, un emprendimiento de estas características no era justificable dada la baja potencia y profundidad observada, además, de un angosto canal de acceso al puerto (72 m) que podría interferir con el pasaje de los barcos pesqueros.

Los otros tres sitios seleccionados se encuentran en cercanías de importantes centros de posible consumo de la energía producida, como son Puerto Madryn, Camarones y Puerto Pirámides. Este último lugar, en particular, representa un sitio de gran atracción turística para la región, aumentando significativamente su población y consumo de energía en la temporada estival y de avistaje de ballenas. El canal Leones, si bien su acceso desde tierra es dificultoso, se encuentra relativamente cerca de la población de Camarones (60 km aproximadamente). En esta ciudad, el Gobierno de la provincia de Chubut tiene en agenda la realización de obras de interconexión eléctrica entre la localidad de Garayaldes y Camarones. Se planea construir, montar y poner en funcionamiento una estación transformadora en la localidad de Camarones y mejoras en la estación de subtransmisión de Garayaldes. La obra incluye, además, la construcción de una línea de alta tensión que conectará la nueva estación transformadora de Camarones a esta última localidad. Se piensa que esta obra eliminará la generación eléctrica aislada y tendrá un impacto positivo en el desarrollo de la industria regional, principalmente pesquera y turística, (página oficial del Gobierno de la Provincia de Chubut, julio 2023).

Con respecto a la interferencia con el ambiente, los dispositivos hidrocínéticos instalados actualmente presentan tamaños comprendidos entre 1 m y 10 m de radio, no interfiriendo significativamente en la deriva costera y en la circulación del agua, a diferencia de una central hidroeléctrica que obstruye el

flujo. Las THC pueden colocarse a media agua, a una profundidad donde el efecto de las olas y el viento sea despreciable, así también lejos del fondo para evitar turbulencias.

La formación de *biofouling* u obturaciones por algas marinas pueden ser minimizados a través de un diseño adecuado. Por ejemplo, la instrumentación de una tobera que proteja el dispositivo o una correcta elección de las palas del rotor. Estos aspectos se desarrollarán en el siguiente capítulo.

Otro aspecto a considerar en un emprendimiento energético, utilizando THC, es lo concerniente a la localización del dispositivo en áreas marinas protegidas. La Patagonia es una región extremadamente biodiversa y, como tal, tiene muchas áreas protegidas (Barclay *et al.*, 2023). Dos de los sitios estudiados en este trabajo (norte de Península Valdés, **Figura 1.7**, y Canal Leones), pertenecen a Área Natural Protegida Península Valdés y a la reserva de biosfera Patagonia Azul (al norte del Golfo San Jorge), respectivamente. Este último lugar es considerado un santuario de reproducción para muchas aves y mamíferos, y alberga la colonia de pingüinos de Magallanes más grande del mundo (Barclay *et al.*, 2023). Con respecto al riesgo de colisión entre fauna marina y las turbinas, existe una importante carencia de datos experimentales y dado que hay aun pocas turbinas instaladas, es difícil poder observar las interacciones, y el riesgo de colisión sigue siendo incierto (Copping and Grear, 2018, Copping *et al.*, 2017). De todas maneras, se considera que una colisión entre un mamífero marino y una turbina sea muy poco probable, basándose en las capacidades sensoriales y de flotabilidad de estos animales (Wilson *et al.*, 2006). La baja velocidad de giro de los dispositivos hidrocínéticas, el tamaño reducido del dispositivo y su lugar de instalación no representaría un riesgo para la fauna local (Yuce y Muratoglu, 2015). De todos modos, será imprescindible realizar un estudio de impacto ambiental de los dispositivos de producción energética siguiendo los lineamientos jurídicos de la provincia.

Densidad

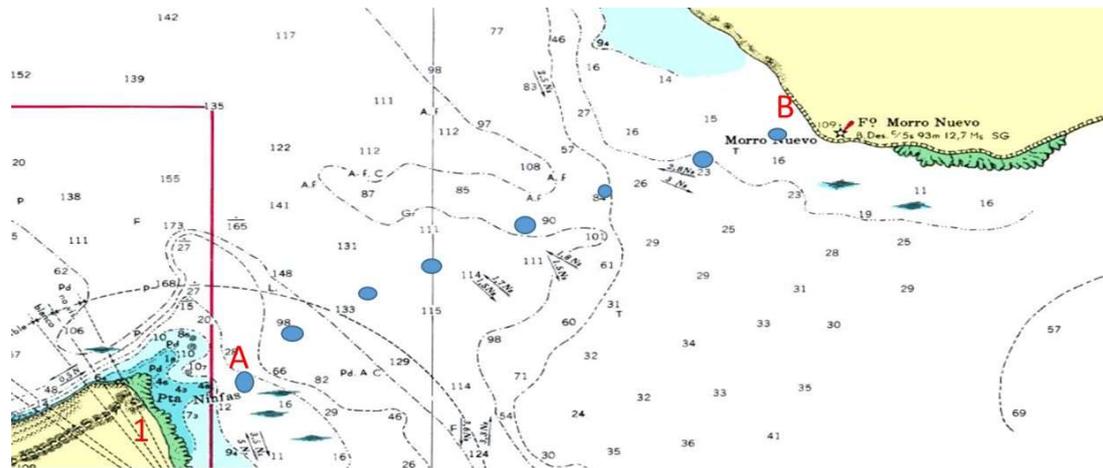
Las mediciones de este parámetro en la zona del puerto de Rawson fueron: 1028.19 Kg/m³ en el caso de marea creciente, con un exceso de la cuña salina y durante marea bajante 1019.26 Kg/m³, producto de la disolución con agua dulce proveniente del deshielo en la cordillera. Se decidió trabajar con un valor de densidad promedio de 1023.7 kg/m³. En el GN se estimó una densidad media de 1025.85 kg/m³ y para GSJ fue 1025.5 kg/m³. Para el Canal Leones se consideró este mismo valor (1025.5 Kg/m³).

1.3.2 Área transversal

El área transversal, S_{tr} , se determinó siguiendo criterios extraídos de la bibliografía y cartas náuticas del SHN. Para el GN, la forma de la boca se consideró como un trapecio de base mayor igual al ancho de la boca (16 km) y base menor la distancia entre los puntos más profundos según la carta batimétrica. Para la altura del trapecio se tomó la máxima profundidad encontrada en la bibliografía en el centro de la boca, igual a 100 m aproximadamente (Rivas y Ripa 1989). La forma

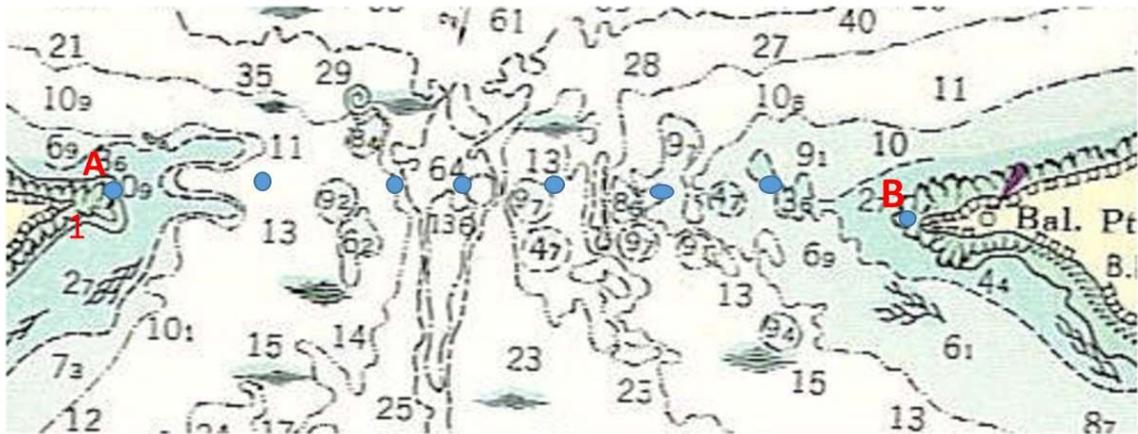
geométrica de la boca del GSJ se consideró un rectángulo de 6.8 km de ancho y profundidad media 12 m (Paterlini *et al.*, 2013; Pizarro, 1975), a pesar de tener una grieta de gran profundidad en la boca, que, según Paterlini *et al.*, (2013), es de estrecha dimensión.

Para la sección transversal en la desembocadura del Río Chubut se consideró un rectángulo de igual ancho y profundidad que el canal, 72 m y 6 m respectivamente. El área transversal fue 187.2 m². En el caso del CL se consideró una sección de forma trapezoidal. Las **Figuras 1.10 – 1.12** muestran un tramo de las cartas náuticas del SHN utilizadas para estimar el área transversal. Se definió, en cada caso, la coordenada distancia desde el extremo oeste del canal, X (m) (punto de referencia 1 sobre el continente) usando un mapa digital (Google Earth), y se registraron las profundidades en cada punto. Luego se aplicó una interpolación para definir la batimetría total de la sección. La **Tabla 1.4** resume los resultados obtenidos para S_{tr} .



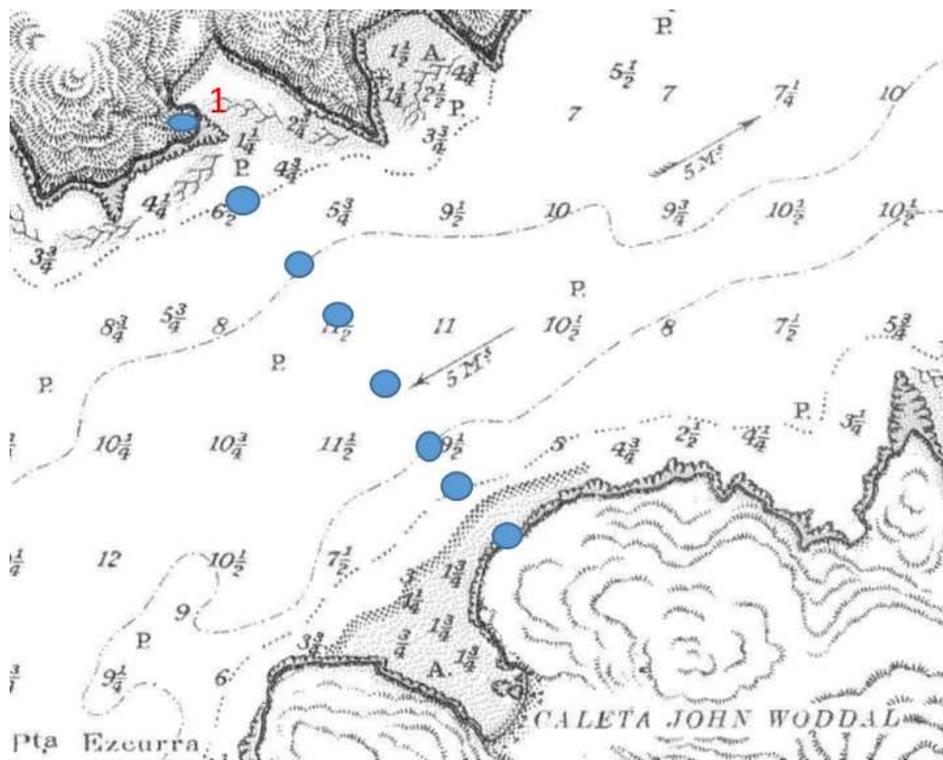
Distancia al punto 1 (m)	(A) 2600	4200	6000	7800	9560	11300	13000	(B) 15800	
Profundidad (m)	16	98	114	114	90	84	23	16	
Velocidad (m/s)	2.57/1.8			0.87/0.77		0.93/0.77		1.44/1.54	

Figura 1.10. Distancias y profundidades en la boca del Golfo Nuevo (carta náutica H218, SHN).



Distancia al punto 1 (m)	(A) 0	1300	2300	3350	4200	5300	(B) 6800
Profundidad (m)	1	13	14	64	9.7	4.7	2.7
Velocidad (m/s)				1-3/1-3			

Figura 1.11. Distancias y profundidades en la boca del Golfo San José (carta náutica H217, SHN).



Distancia al punto 1 (m)	123	258	439	570	685	779	875
Profundidad (m)	13	19	23	23	18	12	0
Velocidad (m/s)			2.57	2.57			

Figura 1.12. Distancias y profundidades para el CL (carta náutica SHN).

Para el GSJ, el valor del área transversal calculado a partir de la carta náutica resultó ser similar al área S_{tr} encontrada en la bibliografía (81650 y 81600 m²

respectivamente, Paterlini *et al.*, 2013). Esta similitud de áreas permitió aplicar el mismo procedimiento para calcular el tamaño y forma del área transversal de la entrada del GN y del CL (**Figura 1.13**). Sin embargo, se debe notar que la resolución de la batimetría en los sitios analizados es baja y no uniforme. Este hecho podría conducir a calcular densidades de potencia por exceso. Una representación batimétrica de mayor precisión y resolución se podría implementar para estimar la potencia disponible en la región con mayor rigor.

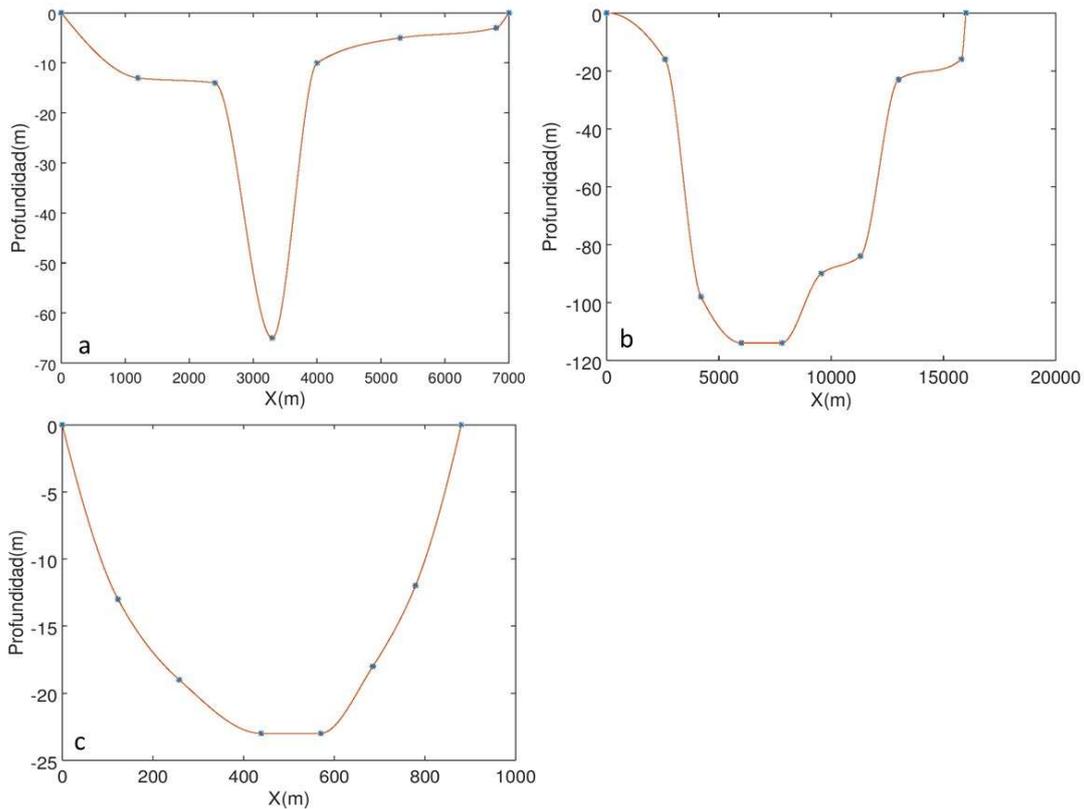


Figura 1.13. Perfil batimétrico (m) asumido en (a) la boca del GSI (b) la boca del GN (c) el CL.

1.3.3 Velocidades

1.3.3.1. Desembocadura del Río Chubut (RCH)

Las velocidades de corrientes promedio, medidas usando flotadores, resultaron ser de $0,6 \pm 0,1$ y $0,9 \pm 0,1$ m/s en septiembre y diciembre respectivamente. Durante la marea creciente, las mediciones resultaron ser menores a 0,2 m/s. Está marcada diferencia entre los valores de corrientes registradas durante la pleamar y la bajamar se debe a la dirección neta del flujo durante estos eventos. Durante la pleamar, la dirección del flujo dado por mareas y la descarga natural del río son opuestas. Durante la bajamar estos flujos tienen la misma dirección resultando en intensidades mayores. La velocidad promedio

medida con la corredera náutica a 50 cm por debajo de la superficie resultó ser igual $0,9 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$.

1.3.3.2. Velocidades en Golfo Nuevo, Golfo San José y Canal Leones

Velocidades según Método I – Validación

Las predicciones del SHN en el GN permitieron efectuar una comparación con los datos obtenidos en el Método I. El método fue aplicado a las predicciones de alturas y periodos en el año 2020 y las velocidades resultados se compararon con las predicciones de velocidades de corrientes del SHN. Se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 1.2**. La **Figura 1.14**. muestra una comparación cualitativa (los pares de datos no corresponden a un mismo tiempo de registro) de las intensidades de corrientes obtenidas con el método y las predicciones según SHN. Con un nivel de significancia del 10 %, las estimaciones de velocidades contienen a la media de las predicciones del SHN.

Tabla 1.2. Estimación (Método I) y predicción (SHN) de velocidades (m/s) en la boca del Golfo Nuevo

	Velocidad (m/s)		
	Media	Máxima	Mínima
Estimación	0.52	0.91	0.23
Predicción	0.53	0.8	0.25

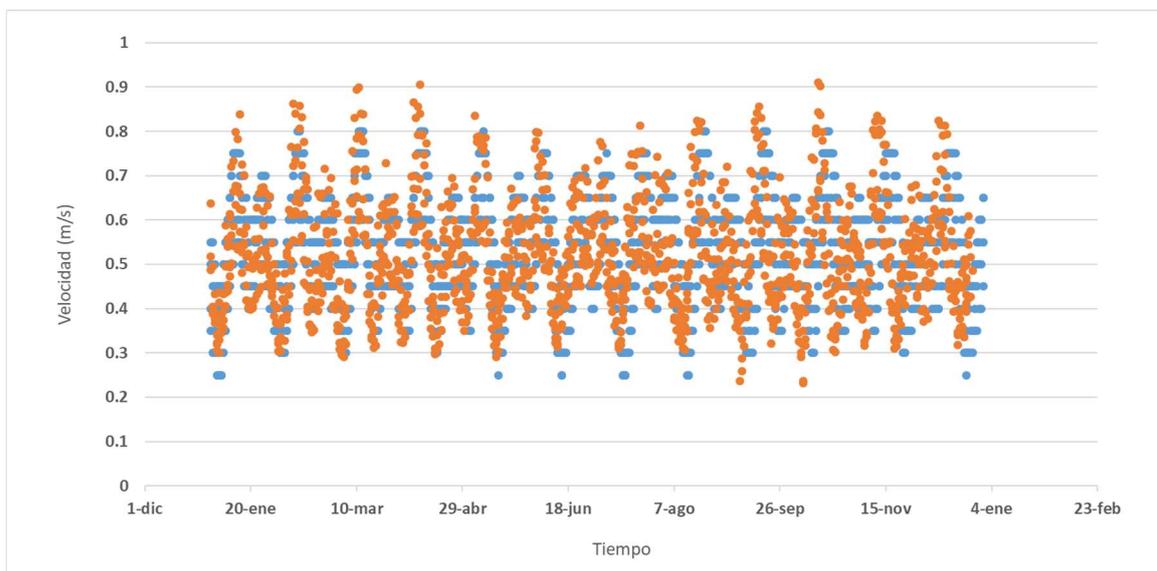


Figura 1.14. Velocidades según predicción del SHN (línea azul) y obtenida con metodología propuesta, Método I (línea naranja), año 2020.

Luego de comparar el método aplicado con las predicciones de corrientes disponibles del SHN, se consideró que el mismo puede ser utilizado para estimar velocidades medias con un error aceptable (del 10%) tanto en el GN como en el GSJ. Los resultados se resumen en la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3 Velocidades estimadas con Método I.

Sitio	Velocidad media (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)
boca Golfo Nuevo	0.57	0.96	0.28
boca Golfo San José	2.64	4	1.5

Estimaciones numéricas realizadas por Tonini *et al.*, (2006), en el norte de Península Valdés, dieron como resultado una velocidad máxima de 3 m/s. Este resultado más información de las cartas náuticas del SHN (**Tabla 1.4**), permitieron establecer que las velocidades máximas con este método están sobreestimadas, siendo más evidente en el caso del Golfo San José.

Velocidades según el Método II

Los perfiles de velocidad resultado del Método II se muestran en las figuras a continuación en las bocas de ambos golfos y el CL (**Figura 1.15, 1.16, 1.17**).

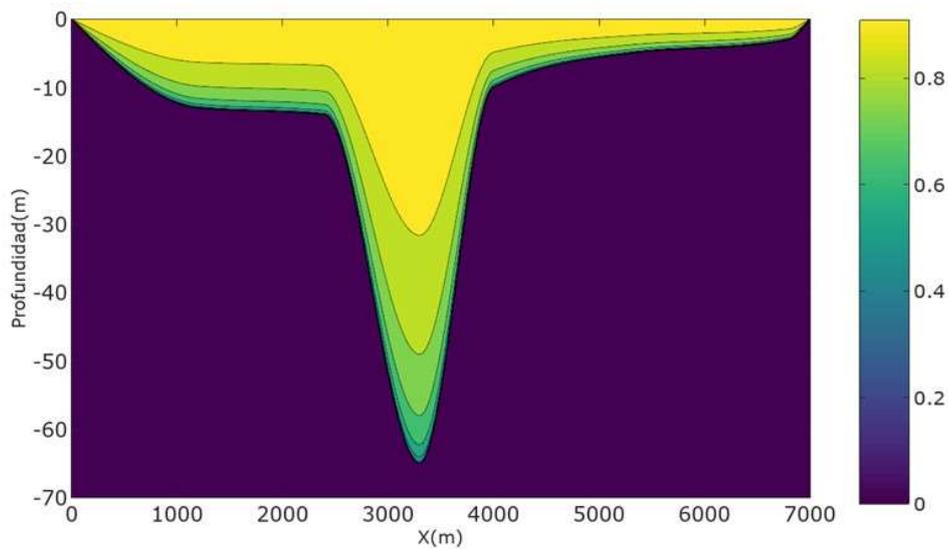


Figura 1.15. Perfil de velocidades (m/s) en la boca del GSF (Lifschitz *et al.*, 2022).

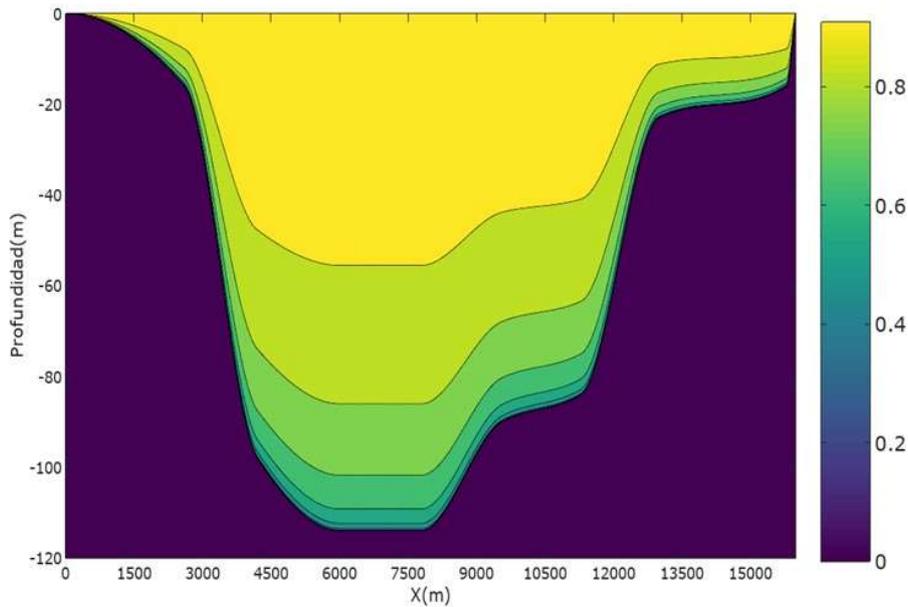


Figura 1.16. Perfil de velocidades (m/s) en la boca del GN.

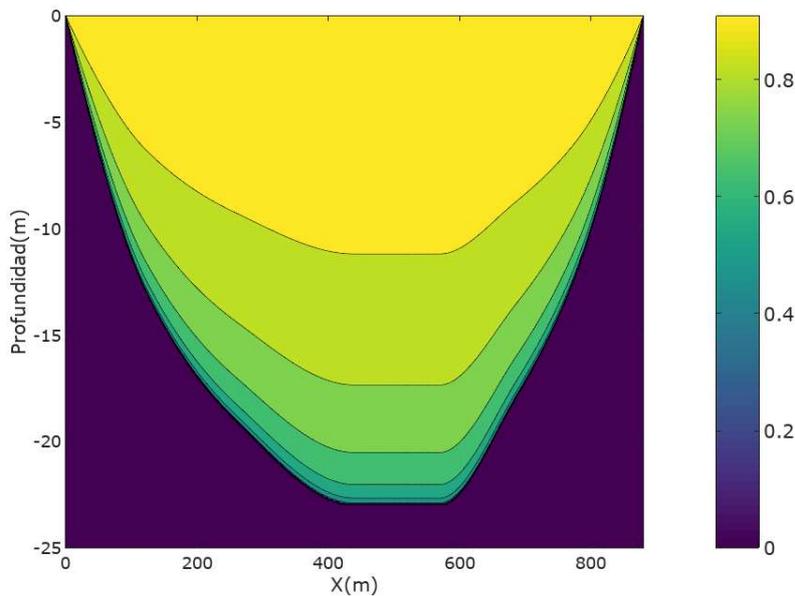


Figura 1.17. Perfil de velocidades (m/s) en la boca del CL.

Ambos enfoques permitieron cierta variabilidad de la velocidad en el tiempo, pero se diferencian en cuanto a la forma de variación con la profundidad: el Método I plantea un único valor de velocidad promedio máxima para toda la columna de agua. El Método II, por otro lado, considera variación de la velocidad en profundidad (admite un perfil de velocidad no nulo) y estos perfiles son relativos a la velocidad asumida en superficie, igual a 1 m/s. Por esta razón, solo es válido una comparación de estos resultados entre los sitios analizados.

El método I propone una metodología sencilla, que requiere de pocos datos para su aplicación y da como resultado velocidades promedios para toda la columna de agua permitiendo cierta variabilidad en función del tiempo. No obstante, las velocidades obtenidas no representan condiciones puntuales en

tiempo y espacio; existen otros métodos de obtención de velocidades más sofisticados, tales como boyas de deriva con seguimiento satelital y registros con ADCP (perfiles de velocidad en función de la profundidad y en el tiempo). Este instrumento permite mediciones de velocidad del movimiento del agua a distintas profundidades con alta precisión y generando registros de larga duración. Se realizaron mediciones con ADCP en el interior del Golfo Nuevo, aproximadamente 50 m del muelle Piedra Buena (Dellatorre, F. G., 2009). Estos registros no pudieron ser utilizados en el presente estudio debido a las bajas velocidades de corrientes de marea detectadas: las intensidades promedio de las corrientes medidas fueron del orden de 0,01-0,02 m/s. Otro antecedente de mediciones efectuadas en la costa chubutense utilizando ADCP son los registros de velocidades en el norte del golfo San Jorge, a 50 km al sur de una de las zonas elegidas como aptas para un emplazamiento de THC, el Canal Leones. Si bien constituían un registro detallado de velocidad, el lugar de medición estaba más lejos de un centro de consumo de energía (la ciudad de Camarones) que el lugar elegido y se decidió no utilizarlas respondiendo a uno de los criterios de selección de sitios.

En cuanto a la utilización de boyas de deriva, no se disponían de registros en el momento de realizar esta tesis. La metodología empleada en este trabajo, a excepción de las velocidades extraídas de las cartas náuticas, corresponden a un cálculo preliminar y es necesario contar con registros de mediciones in situ u obtenidas de las tecnologías mencionadas para representar la variabilidad temporal y espacial de las velocidades de corrientes de mareas. De todas maneras, la comparación de velocidades del Método I con predicciones de velocidad en el Golfo Nuevo (SHN) tuvieron un error bajo (10 %) a los efectos de cálculo.

1.3.4 Potencia cinética teórica

1.3.4.1. Potencia en desembocadura del Río Chubut

En la desembocadura del Río Chubut fue posible medir la velocidad, con una intensidad máxima de 0,9 m/s. Empleando la ecuación (1.4.1), con área transversal de 187,2 m², se obtuvo una potencia máxima menor a 0,07 MW.

1.3.4.2. Potencias en Golfo Nuevo, Golfo San José y Canal Leones

En la **Tabla 1.4** se presentan los valores obtenidos de potencia media utilizando la ecuación (1.4.1) para velocidades de corrientes según cartas náuticas del SHN para el GN, GSJ y en el Canal Leones.

Tabla 1.4. Estimaciones de potencia según velocidades de cartas náuticas.

Sitio	S _{tr} (m ²)	Velocidad (m/s)	Potencia (MW)	Densidad de Potencia (MW/Km)
Golfo Nuevo	8.9x10 ⁵	0,93	370	23
Golfo San José	8.16x10 ⁴	3	1130	170
Canal Leones	10695	2,57	93	93

El GSJ presentó un elevado valor de potencia debido a las altas velocidades de flujo, a pesar que el área transversal es relativamente pequeña. Los valores de potencia en el GN son altos debido a una mayor superficie de entrada/salida del agua (mayor ancho de boca y mayor profundidad), pero la velocidad registrada es muy inferior comparada con el otro golfo y CL. En el caso del CL, a pesar que la velocidad es de considerable magnitud, al ser un canal relativamente estrecho, la potencia disponible es menor a las anteriores. Las estimaciones presentadas en la **Tabla 1.4** corresponden a valores de velocidades máximas, por lo tanto, las potencias disponibles calculadas con estas velocidades corresponden a valores máximos y resultan una estimación por exceso del recurso.

Un segundo análisis de las potencias se obtuvo mediante la implementación de los métodos alternativos de cálculo de velocidades. Para aplicar el Método II, se requiere conocer la variación de la velocidad en profundidad. Este historial de tiempo podría obtenerse utilizando datos experimentales, pero debido a la falta de los mismos se optó por utilizar la serie temporal anual obtenida con el Método I para GN y GSJ. Estas intensidades mostraron un intervalo de muestreo variable debido a oscilaciones en los momentos de pleamar, bajamar y estoas. Se consideró un intervalo de tiempo medio igual a 6 h y la serie fue interpolada a fines de obtener la variación de la velocidad horaria. Se probaron dos esquemas de interpolación para la velocidad en superficie, pero no se evidenció diferencias significativas en la potencia (menor al 3%), revelando que el resultado no depende significativamente del esquema de interpolación aplicado. Para el CL, al no disponer de una serie temporal de velocidades en superficie, el cálculo de potencia se realizó con el único valor disponible en este trabajo, extraído de la carta náutica del SHN. Las potencias anuales disponibles fueron 31 MW para el GN, 315 MW para el GSJ y en el CL la potencia estimada fue 0,02 MW, siendo un valor muy inferior al de los otros sitios. Esta desigualdad podría atribuírsele a la diferencia de áreas transversales consideradas, dado que los perfiles de velocidad en los tres sitios son semejantes. A pesar de la baja potencia estimada, este sitio resulto prometedor por contar con altas velocidades.

Las potencias medias anuales usando las velocidades dadas según el Método I fueron 85 MW para el GN y 770 MW para el GSJ aproximadamente. La geomorfología en la zona del CL no satisfacía los requerimientos del método. Existen en la literatura antecedentes de estimaciones de potencia de mareas integradas en toda la costa argentina. Estos trabajos utilizaron modelos matemáticos con diferentes características (batimetría, esquemas, forzantes, constituyentes de mareas). A pesar de esta diferencia, los autores señalaron a la plataforma continental y particularmente la región de estudio, como una zona con gran potencial energético. Glorioso (2000), concluyó que las mareas en la plataforma patagónica pueden alcanzar una amplitud excepcional debido a fenómenos de resonancia. Cálculos previos de la potencia en la plataforma patagónica son 228 GW por Glorioso and Flather (1997), 117 GW (componente principal M₂), por Simionato *et al.*, (2004), Glorioso and Flather (1995), por su parte, estimaron un valor (en 1 mes) de 172,8 GW, considerando solamente las mareas. Posteriormente, en un dominio más regional (que abarcó desde el Golfo San Matías hasta los 44 ° S, aproximadamente, Moreira *et al.*, (2011) calcularon un

resultado de 87 GW. Estimaciones más recientes realizadas por Barclay *et al.*, (2023), concluye que el golfo San Matías (debido a la resonancia natural de su cuenca con las componentes de marea), es una de las regiones de la costa de Argentina que posee mayor potencial de energía de mareas. Este resultado es novedoso y posterior a la elaboración de esta tesis, y se podría considerar este sitio en un futuro estudio.

Un aspecto a considerar en la metodología utilizada en este trabajo es que no plantea un modelo matemático estricto, con una serie temporal y espacial definidas, sino en maneras de aproximar velocidades a partir de mediciones y predicciones de alturas y periodos de mareas. Esta forma de cálculo no consideró otros factores que modifican las mareas, como vientos, forzamiento offshore, fricción de fondo, y aspectos no lineales (Tonini and Di Palma, 2017); todos estos términos producen disipación de la energía y luego, las estimaciones descriptas en este trabajo resultaron por exceso. Estudios previos (Moreira *et al.*, 2011, Tonini and Di Palma, 2017) indicaron que en las bocas de los golfos existe una reducción significativa de las corrientes de mareas hacia el interior, y, por lo tanto, en estos sitios se presenta valores de energía considerables, en concordancia con los resultados informados en este trabajo. Los valores de potencia obtenidos proporcionaron una primera aproximación de la energía cinética en la zona.

1.4. Conclusiones

Los datos obtenidos de las cartas náuticas y de las tablas de mareas del Servicio de Hidrografía Naval, sumados a la información disponible, métodos de cálculo y al registro de mediciones in situ de velocidades de corriente muestran que existe un alto potencial de mareas en la costa de Chubut para fines energéticos. La consideración de características territoriales y aspectos logísticos permitieron seleccionar cuatro sitios potencialmente idóneos para el emplazamiento de turbinas hidrocínicas: la desembocadura del Río Chubut (Puerto de Rawson), la boca del Golfo San José y la boca del Golfo Nuevo, que conforman la Península de Valdez, y el Canal Leones. Sin embargo, dada la baja potencia y profundidad observada en la desembocadura del Río Chubut, un emprendimiento de estas características no resulta justificable. Aspectos a considerar para la selección del lugar como la interferencia de la turbina con el ambiente y formación de *biofouling* u obturaciones por algas marinas, se pueden minimizar a través de un diseño adecuado. Otro aspecto a considerar es la localización de turbinas en áreas marinas protegidas. La baja velocidad de giro de los dispositivos y su tamaño reducido indican que no representarían un problema para la fauna local. El riesgo de colisión entre fauna marina y las turbinas es incierto por la falta de datos experimentales, pero es considerado poco probable según Wilson *et al.*, (2006). De todas maneras, es imprescindible realizar el correspondiente estudio de impacto ambiental de acuerdo a la legislación provincial.

Las velocidades estimadas en este trabajo presentaron un error del 10 % al compararlas con predicciones de velocidad del SHN, pero la falta de mediciones con tecnologías más robustas (ADCP, boyas con seguimiento satelital) y representaciones batimétricas de mayor precisión y resolución, resultaron una

limitante para los alcances de este trabajo. Los valores de potencia estimados evidenciaron un alto potencial energético en la zona, en concordancia con resultados de otros autores, quienes, a través de modelos matemáticos, indicaron que la región es uno de los lugares más energéticos del mundo. (Simionato *et al.*, 2004, Moreira *et al.*, 2011, Tonini *et al.*, 2006, Glorioso 2000 Glorioso and Flather, 1995, 1997). Los estudios realizados en este trabajo representan un punto de partida y sientan las bases para continuar con las investigaciones que permitan determinar el potencial energético en la costa de la provincia de Chubut.

En el siguiente capítulo se realiza el diseño de rotores hidrocinéticos, utilizando los valores de velocidades estimados y obtenidos mediante mediciones *in situ*.

Capítulo II. Rotores hidrocínéticas

2.1 Introducción y objetivo

La energía contenida en un flujo de agua (energía cinética) puede aprovecharse transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación (energía mecánica), y luego a energía eléctrica, por medio de una turbina hidrocínética (THC), dispositivo similar a una turbina eólica. Las THC son máquinas sumergidas que operan en corrientes marinas, ríos y canales artificiales, sin interrumpir el flujo natural del agua (Badea *et al.*, 2014, Vitorino *et al.*, 2016). Para el uso de las THC no se requiere construir una gran infraestructura civil como la necesaria en las grandes centrales hidroeléctricas y estas no dependen de grandes alturas o caídas de agua, lo cual las convierten en una tecnología de menor costo, bajo tiempo de implementación, y bajo impacto ambiental (Chica *et al.*, 2015; Filho *et al.*, 2010; Garden y Bibeau, 2010; Yuce y Muratoglu, 2015).

Las THC pueden caracterizarse por la orientación del eje rotacional con respecto a la dirección del flujo del agua, en turbinas de flujo axial y turbinas de flujo cruzado o transversal. Las THC del primer grupo tienen su eje de rotación paralelo a la dirección de la corriente, empleando rodetes tipo hélice. Estas turbinas presentan diferentes disposiciones (**Figura 2.1**). La turbina de eje inclinado (a) se usa con más frecuencia en ríos pequeños, mientras que las demás disposiciones (b, c y d) se implementan principalmente para extracción de energía en océanos (Vermaak *et al.*, 2014).

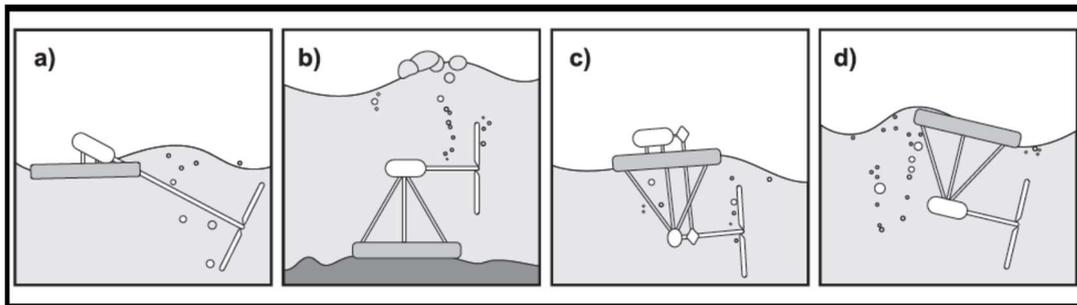


Figura 2.1. Turbinas hidrocínéticas de flujo axial de: a) eje inclinado, b) amarre rígido, c) generador no sumergido y d) generador sumergido. (adaptado de Vermaak *et al.*, 2014, adaptado de Ibrahim *et al.*, 2021).

Por otro lado, las turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado o transversal tienen su eje de rotación perpendicular a la dirección del flujo de agua (**Figura 2.2**). Pueden clasificarse en dos tipos: turbinas de eje horizontal en disposición transversal (a) y turbinas de eje vertical (b, c, d, e y f).

En la **Figura 2.3** (adaptado de Vermaak *et al.*, 2014, Vitorino *et al.*, 2016) se muestra un rotor con sus álabes para una turbina de eje horizontal. El área barrida por las aspas se utilizará para el dimensionamiento del rotor. La disposición de eje vertical permite el aprovechamiento energético de todas las direcciones del flujo

incidente. La disposición del eje horizontal, por otro lado, presenta una eficiencia mayor (Alidadi, 2009).

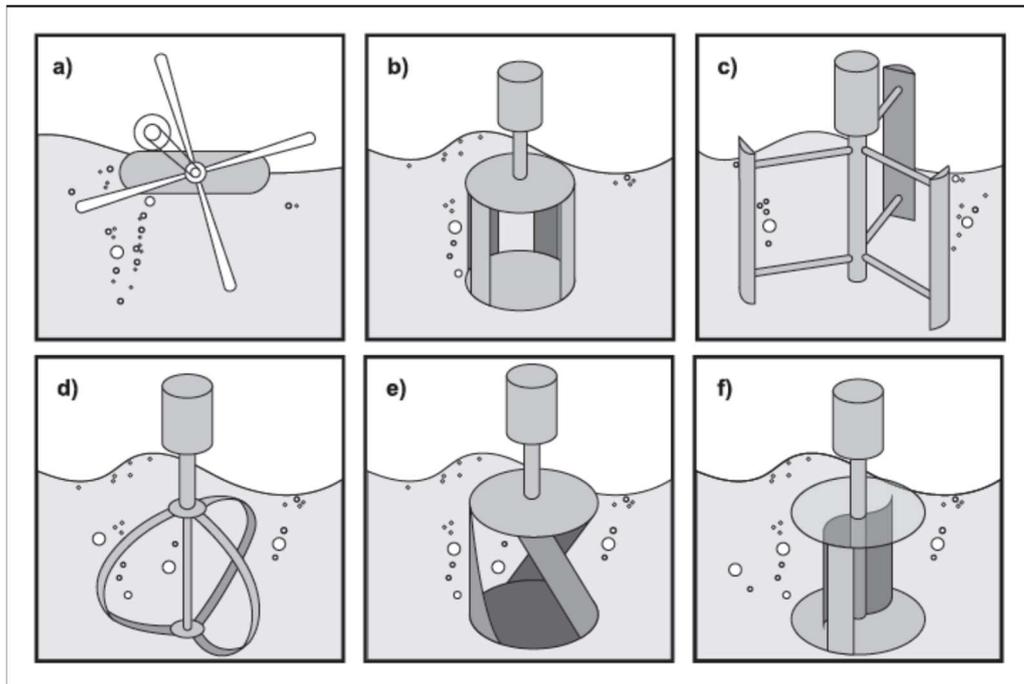


Figura 2.2. Turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado: a) de eje horizontal, b) jaula de ardilla Darrieus, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Gorlov y f) Savonius. (adaptado de Vermaak *et al.*, 2014, adaptado de Ibrahim *et al.*, 2021).

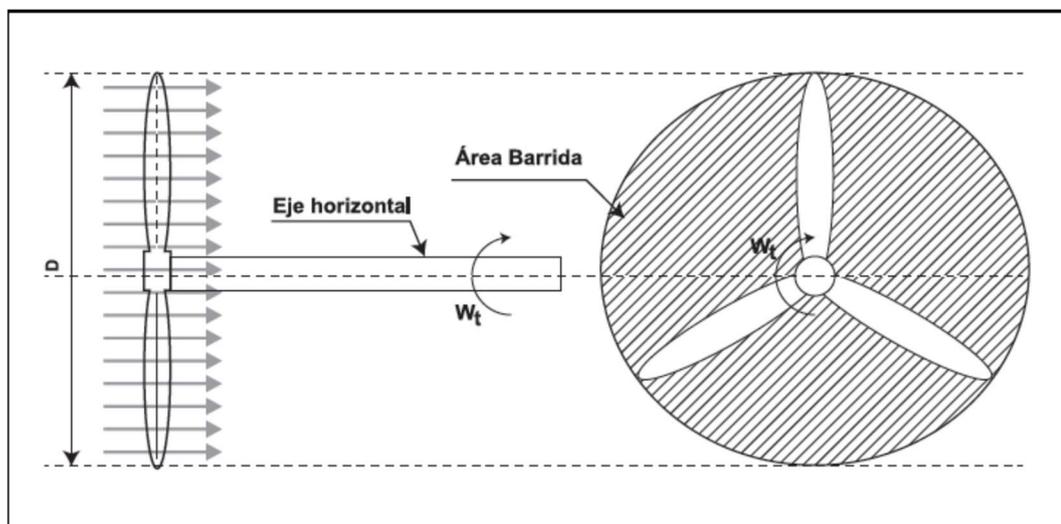


Figura 2.3. Álabes y rotor para un THC de eje horizontal (adaptado de Vermaak *et al.*, 2014, adaptado de Vitorino *et al.*, 2016).

Otra clasificación de los dispositivos energéticos de corrientes de mareas es básicamente según la profundidad donde estén colocados:

1) De fondo: en este diseño la profundidad es una limitación por problemas de sellado y estanqueidad del sistema. Además, el equipo está sometido a grandes presiones externas. Un ejemplo de turbinas de este tipo es la desarrollada por la

compañía Hammerfest Strøm, que está pensada para ser instalada en el fondo marino cerca o costa afuera (Aqua-RET, 2003).

2) De superficie con rotor ligeramente sumergido: ejemplo del mismo es el prototipo de turbina Kobold de eje vertical presentado por Coiro *et al.*, (2005).

3) Suspendido en la columna de agua: suele contar con una cola vertical con una veleta para orientarlo respecto de la dirección de la corriente. Un prototipo de estas características, de 100 KW, (GEMSTAR kite), fue construido y emplazado en la laguna de Venecia por el Departamento de ingeniería industrial de la Universidad de Nápoles II en colaboración con la empresa Seapower SCRL (Coiro *et al.*, 2018a).

El objetivo de este capítulo es diseñar un prototipo de rotor de THC para ser instalado en zonas seleccionadas en la provincia de Chubut, Argentina. Además, se propone evaluar la factibilidad de instalación de una THC con un diseño de rotor adecuado para las condiciones locales. El prototipo tiene carácter exploratorio y presenta la característica de ser de bajo costo de construcción.

2.1.1. Turbinas hidrocínéticas contra turbinas eólicas

Las THC son dispositivos similares a las turbinas eólicas y la energía puede ser extraída de manera análoga (Guney and Kaygusuz 2010, Vitorino *et al.*, 2016). Sin embargo, existen diferencias. La principal discrepancia entre los dispositivos radica en la diferencia de densidades del fluido en cuestión. Puesto que el agua de mar posee una densidad aproximadamente 840 veces superior (1025 kg/m^3 a 1 atm y 15°C) que el aire (1.225 kg/m^3 , a 1 atm y 15°C), en el agua es posible extraer la misma cantidad de energía a una menor velocidad. Este hecho se ilustra en la **Figura 2.4**, donde se describen las curvas de densidad de potencia para un generador eólico e hidrocínético (adaptado de Yuce y Muratoglu, 2015). Se observa que, para obtener la misma potencia, las velocidades de corrientes de viento y agua son muy diferentes. Por ejemplo: para una densidad de potencia de 250 W/m^2 se requiere una velocidad de 10 m/s en el aire frente a solo 1,5 m/s en el agua. A su vez, para esta misma potencia, se evidencia la diferencia entre los diámetros de rotores de 0,7 m de un aerogenerador frente a 0,4 m para una THC.

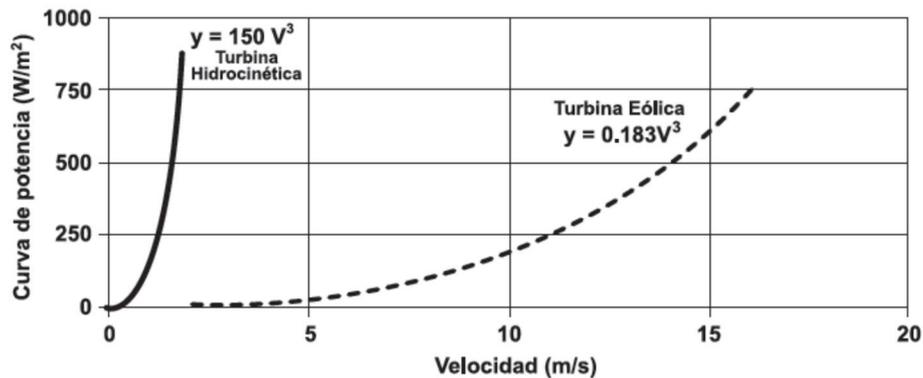


Figura 2.4. Comparación de la densidad de potencia entre turbinas de agua y de viento (adaptado de Yuce y Muratoglu, 2015).

Cabe señalar, además, que las corrientes de mareas pueden ser pronosticadas con menor incertidumbre que el viento y no alcanzan valores extremos que pongan en peligro la instalación. Esta diferencia entre las mareas y el viento, en relación a su aprovechamiento para generación de energía, es que el viento tiene un comportamiento más estocástico. La potencia de un aerogenerador no se puede garantizar día a día. A diferencia del viento, las corrientes de marea presentan una variación cuasi periódica definida y relativamente independiente de las condiciones meteorológicas. Por lo tanto, la generación de energía a partir de la circulación mareal es bastante predecible, a diferencia de la producción de energía eólica, que depende de situaciones locales del viento, o de la de energía solar, que es regida por la nubosidad (Khaligh and Onar, 2010). Este comportamiento de las mareas asegura la disponibilidad de energía en el tiempo. En contraposición, las turbinas hidrocinéticas pueden sufrir cavitación (Batten *et al.*, 2006), y presentan mayor dificultad de instalación, mantenimiento y conexión a la red, mayores requerimientos estructurales debido a los mayores esfuerzos y problemas de corrosión y *biofouling*. Si bien la tecnología está en desarrollo, se han utilizado los resultados de turbinas eólicas para ser aplicadas en agua (Cardona-Mancilla *et al.*, 2017, Rourke *et al.*, 2010). La transferencia de tecnología es posible dado que en ambos casos por las características de los fluidos y las velocidades en juego se consideran fluidos aire y agua como incompresibles.

2.1.2. Rotor de una THC- Conceptos y fenómenos en 2D

Las turbinas hidrocinéticas se consideran turbo máquinas de acción de flujo externo. Esto significa que el flujo del cual se extrae la energía rodea por completo a la turbina. El rotor está compuesto por las palas y el cono central, elemento estructural al cual se unen las palas. En general, en rotores tripala, el cono es rígido y está formado por una estructura metálica. El rotor convierte la energía cinética del flujo en energía mecánica, transmitiéndola al eje del generador (Vitorino *et al.*, 2017).

2.1.2.1. Perfiles

La sección transversal de un aspa se conoce como perfil hidrodinámico, y es el responsable de producir la fuerza hidrodinámica útil para la rotación de la hélice. El perfil es una característica muy importante para el diseño de una turbina, debido a que condiciona el rango de operación y limita la potencia (Paparazzoa *et al.*, 2018). Cada perfil tiene una geometría determinada que fija el desempeño dinámico.

Características del perfil alar

Los perfiles más usados en la industria eólica e hidrocinética fueron desarrollados por el Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica (NACA por sus siglas en inglés), durante la primera guerra mundial (Pinzón Paz, 2013). Surgió así, en 1933, el primer informe de perfiles NACA de 4 dígitos, y desde entonces se ha dado una evolución de NACA de más dígitos y perfiles más sofisticados (como los FX), (Pinzón Paz, 2013, Mendoza Gomero, 2018). La **Figura 2.5** muestra un perfil y su sección transversal, donde se detallan las características propias que los describen.

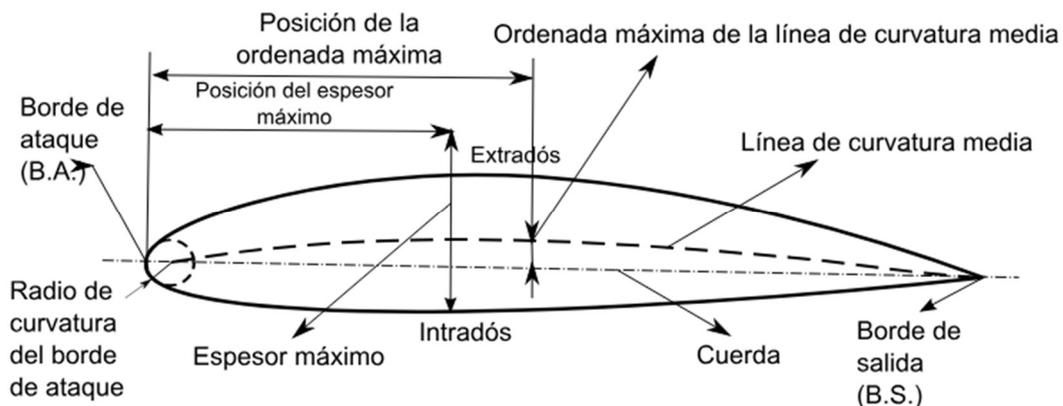


Figura 2.5. Partes y regiones de un perfil alar (Vitorino *et al.*, 2017).

- **Borde de ataque (B.A.):** es la parte delantera del perfil alar. Se le denomina “borde de ataque” ya que es la primera parte que toma contacto con el fluido, provocando que éste se bifurque hacia el intradós y el extradós. Es redondeado y de forma lisa y suave, que permite que el perfil actúe con elevado rendimiento a distintos ángulos de orientación de la corriente.
- **Borde de salida (B.S.):** también llamado “borde de fuga” y corresponde al punto en el que las corrientes del fluido provenientes del intradós y extradós, confluyen y abandonan el perfil. Es afilado con el objeto de evitar que la corriente le rodee, causando turbulencias o un brusco desprendimiento de la capa límite.
- **Intradós:** es un término genérico que denota la parte interior de una estructura y en un perfil corresponde a la parte inferior del mismo desde el borde de ataque hasta el borde de fuga.

- Extradós: término genérico que denota la parte exterior de una estructura y en un perfil corresponde a la parte superior del mismo desde el borde de ataque hasta el borde de fuga.
- Región de curvatura máxima: es el área de un perfil comprendida entre el punto de inicio del borde de ataque y la abscisa de la curvatura máxima.
- Radio de curvatura del borde de ataque: define la forma del borde de ataque y es un valor que influye de manera importante en la pérdida de sustentación. Geométricamente corresponde al radio de un círculo que debe ser tangente tanto al intradós como al extradós y su centro debe estar ubicado en una tangente al origen de la línea de curvatura media. Su longitud se mide en porcentaje del valor de la cuerda.
- Cuerda: longitud de la línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida. Su valor es una característica particular de cualquier perfil.
- Línea de curvatura media (*camber line*): línea equidistante entre el extradós y el intradós. A partir de ella, se define la curvatura del perfil, es decir si esta cae por encima de la cuerda, se dice que el perfil posee curvatura positiva, mientras que, si esta cae por debajo de la cuerda, se dice que el perfil posee curvatura negativa.
- Ordenada máxima (o curvatura máxima): distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda (se conoce como *camber* del perfil). El valor de su ordenada y la posición de esta se expresa por lo general en porcentaje de la longitud de la cuerda.
- Espesor máximo: distancia máxima entre el extradós y el intradós. Corresponde al ancho máximo posible del espesor de un perfil. El valor de su ordenada y el de la abscisa como valor de posición, se expresan por lo general en porcentaje de la longitud de la cuerda: t/c (espesor relativo).

Es posible una sencilla clasificación de los perfiles desde un carácter geométrico, en perfiles simétricos o asimétricos. En los primeros la línea de curvatura media coincide con la cuerda y tanto la superficie superior como la inferior tienen la misma forma y equidistan de la línea de la cuerda. Los perfiles asimétricos lo conforman perfiles en que sucede lo contrario. Esta clasificación, básicamente permite identificar a cada perfil por las palabras NACA y un conjunto de dígitos, en un determinado orden, con los que se determinan sus dimensiones geométricas. En los perfiles conocidos como NACA de 4 dígitos, el primer dígito significa el porcentaje de curvatura (*camber*) del perfil en porcentaje de la cuerda. El segundo dígito indica la localización del máximo *camber* medido en porcentaje de cuerda desde el ángulo de ataque. El tercer y cuarto números indican el espesor máximo. Si los primeros son cero, indica que el perfil es simétrico (*cero camber*). Por ejemplos, el perfil NACA 0009 tiene un 9 % de espesor respecto a su cuerda y

un perfil NACA 2412 tiene la curvatura máxima del 2 % de la cuerda, situada en el punto del 40 % de la cuerda (medido desde el borde de ataque, $0.4c$) y con un espesor máximo del 12 % de la cuerda. La **Figura 2.6** se observa la diferencia entre estos perfiles.

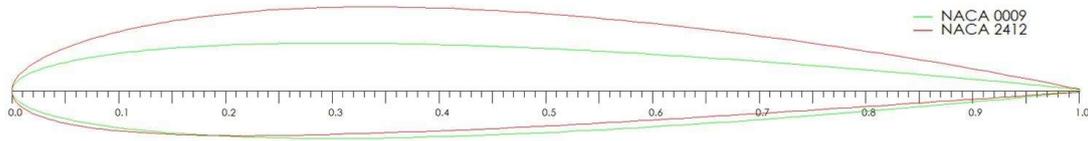


Figura 2.6. Tipos de perfil: simétrico NACA 0009 en verde, asimétrico NACA 2412 en rojo. Ambos perfiles construidos con el software Qblade.

Fuerzas sobre un perfil hidrodinámico

La mayor parte de los estudios sobre THC han sido desarrollados de forma empírica, sobre todo en la etapa de diseño, donde los perfiles utilizados son adaptados de los resultados obtenidos en pruebas realizadas sobre turbinas eólicas (Cardona-Mancilla *et al.*, 2018). Las fuerzas hidrodinámicas sobre un perfil se estudian según la teoría aplicada a aerogeneradores como referencia, ya que los principios físicos son similares (Batten *et al.* 2006). La acción de un fluido en movimiento sobre la superficie de un objeto sumergido ejerce una distribución de esfuerzos con una fuerza resultante sobre el mismo, F y un momento ejercido por ésta (**Figura 2.7**). Esta fuerza depende básicamente de la geometría del objeto y del ángulo de incidencia del fluido. En un instante inicial, cuando el rotor está en reposo, la componente de la fuerza resultante en la dirección normal a la dirección de la velocidad de corriente libre V_∞ , se denomina sustentación y se denota por L (*lift* en inglés), consecuencia del gradiente de presión entre las superficies superior e inferior del perfil. La misma puede ser ascendente o descendente en función de la geometría del cuerpo (Hansen, 2008). Por otra parte, la componente de la fuerza resultante paralela a la dirección del flujo libre, pero en sentido contrario al movimiento, se conoce como arrastre, D (*drag* en inglés) y es la resistencia al avance debida a los esfuerzos de fricción y del campo de presiones generado alrededor del cuerpo. Una vez iniciado el movimiento de rotación de la hélice, la sustentación y el arrastre se convierten en normal y paralela a la dirección del flujo resultante respectivamente. Esto es debido a la combinación (suma de vectores) de velocidades del flujo libre V_∞ y la velocidad tangencial dada por la rotación de las aspas. El momento de la fuerza resultante, se conoce como ‘momento de cabeceo’ (*pitching moment* en inglés). Generalmente se acepta que el punto de aplicación de estas cargas sea (para perfiles NACA de 4 dígitos), un cuarto de la cuerda (25 %) medido desde el borde de ataque ($c/4$) (Hansen, 2007, Abbott and Von Doenhoff, 1959), conocido como centro de presión (CP) del perfil.

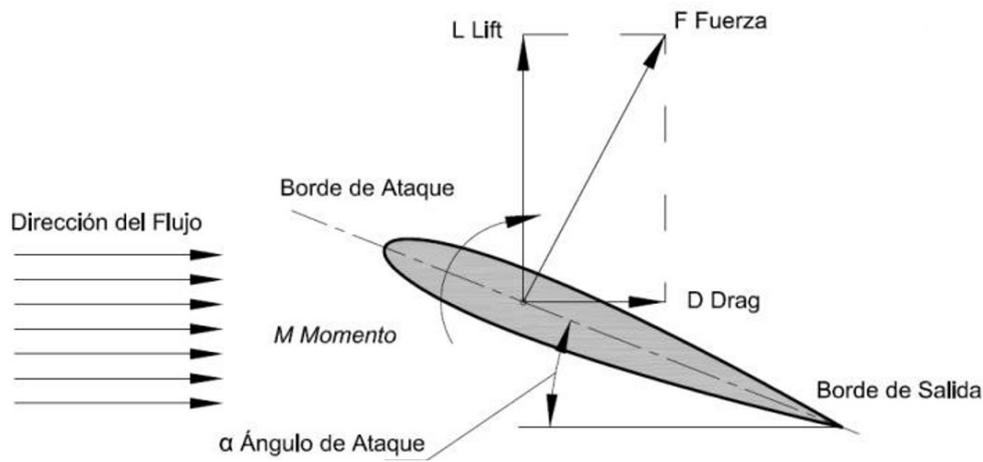


Figura 2.7. Fuerzas generadas sobre un perfil: L es la sustentación, D es el arrastre, M es el momento y F es la fuerza resultante (López Hermida *et al.*, 2021).

Con el objetivo de realizar la caracterización dinámica del perfil en los siguientes párrafos se definen los coeficientes hidrodinámicos y los ángulos de trabajo del perfil.

Coeficientes hidrodinámicos

La caracterización de los perfiles, en la práctica, se hace a través de la definición de coeficientes adimensionales de sustentación (C_l), arrastre (C_d), presión (cpr) y momento (C_m). Los mismos permitirán determinar la magnitud de las fuerzas que actúan sobre los perfiles y, en definitiva, sobre el total de la pala. Por definición se tiene:

$$C_l = L / \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (2.1)$$

$$C_d = D / \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (2.2)$$

A es el área de referencia del cuerpo, también llamada "superficie alar" (m^2), ρ es la densidad del fluido y v la velocidad. Ambos coeficientes dependen del ángulo de ataque, de la geometría del perfil y del número de Reynolds, número adimensional definido como el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, y su valor determina el carácter laminar o turbulento de un fluido. El coeficiente C_m (generalmente, respecto al CP del perfil) está definido como:

$$C_m = M / \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (2.3)$$

siendo M el momento.

La presión estática del líquido actuante sobre la superficie de un objeto sumergido en él contribuye a las fuerzas hidrodinámicas. La distribución de presión sobre el ala de un perfil se hace a partir del coeficiente de presión, cpr definido como:

$$cpr = \frac{P - P_\infty}{q_\infty} = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (2.4)$$

cpr indica la magnitud de la presión local P a través de la diferencia entre esta presión y la presión en el flujo libre P_∞ , relativo a la presión dinámica del flujo libre q_∞ , y v la velocidad. La magnitud del cpr provee indicación de cuan alta o baja es esta diferencia. Para ángulos de ataque pequeños, y despreciando la fricción, el C_l se obtiene integrando la diferencia de los cpr superior e inferior (Corda, 2017). Además, el cpr es utilizado en el análisis de cavitación, fenómeno físico que afecta la eficiencia del perfil y en consecuencia el desempeño del rotor.

Ángulos de trabajo

Se definen los ángulos de trabajo según la **Figura 2.8**. El ángulo phi (Φ) se conoce como el ángulo de flujo, y está formado por la velocidad (V) con el plano de rotación. Alfa (α) es el ángulo de ataque, el mismo es el ángulo determinado por la cuerda del perfil y la dirección del flujo relativo o resultante V_r . μ se define como el ángulo entre la cuerda del perfil con el plano de rotación. De la figura se tiene que:

$$\Phi = \text{artg}\left(\frac{v}{\Omega r}\right) \quad (2.5.a)$$

$$\Phi = \alpha + \mu$$

$$V_r = \sqrt{V^2 + (\Omega r)^2} \quad (2.5.b)$$

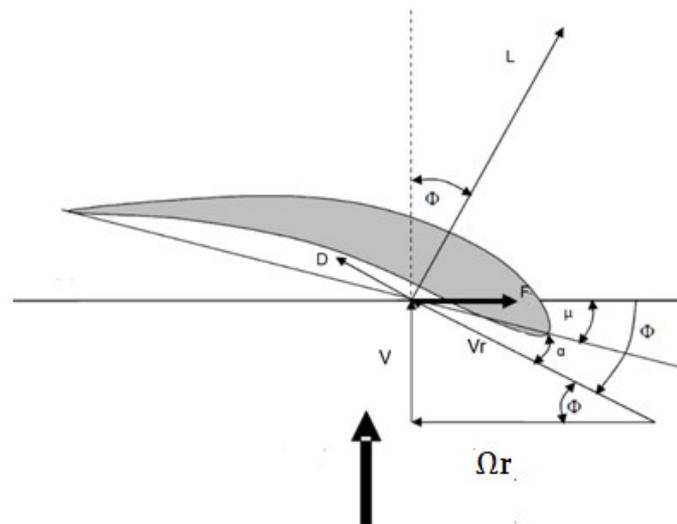


Figura 2.8. Relación de velocidades y ángulos de trabajo formados por el vector velocidad relativa, cuerda del perfil y plano de rotación (adaptado de Bastianon, 2008). V es la velocidad incidente, Ωr es la velocidad tangencial, Φ es el ángulo de flujo, α es el ángulo de ataque, V_r es la velocidad relativa, D es el arrastre, L es la sustentación y μ es ángulo entre la cuerda del perfil con el plano de rotación.

Curvas hidrodinámicas- ángulo óptimo

Las características dinámicas del perfil se pueden describir convenientemente graficando los coeficientes en función del ángulo de ataque α . La curva polar del perfil (o directamente polar de un perfil) describe el coeficiente de sustentación en función del coeficiente de arrastre, permitiendo obtener en una comparación de perfiles, cuál ofrece menor resistencia con mayor sustentación o definir cuál de todos ellos tiene la máxima relación entre C_l y C_d . Se define la eficiencia hidrodinámica de un perfil, como el cociente entre la sustentación y el arrastre (L/D o lo que es lo mismo C_l/C_d) para cada ángulo de ataque que pueda llegar a tener el perfil (Abbott and Von Doenhoff, 1959). Una vez elegido el perfil en base a la curva polar, se debe escoger para qué ángulo de ataque el cociente entre sustentación y arrastre es el máximo. El valor del ángulo correspondiente a la máxima eficiencia se conoce como ángulo óptimo. Es aconsejable trabajar en la zona donde C_l sea lineal con el ángulo de ataque, generalmente desde 0° a $12-15^\circ$, dependiendo del perfil, pues es la zona donde el perfil es estable (Hansen, 2008). Las figuras a continuación resumen la variación de los coeficientes según el ángulo de ataque (**Figura 2.9** y **Figura 2.10**). C_l es lineal con el ángulo de ataque hasta un valor máximo, luego decrece rápidamente. Para ángulos de ataque negativos, el rango lineal es el mismo para perfiles simétricos y no difiere sustancialmente para perfiles asimétricos (Corda, 2017). C_m es lineal en el rango de ángulos en que C_l es lineal y resulta no lineal para ángulos mayores. C_d se mantiene bajo para ángulos pequeños hasta el ángulo de máximo C_l , luego crece rápidamente. El cpr a lo largo de la superficie superior e inferior es graficado en función de la coordenada no dimensional x/R (**Figura 2.11**). Por convención, valores negativos de cpr son graficados arriba de la abscisa y valores positivos de cpr son graficados por debajo. Un cpr negativo en la superficie superior está indicando que la presión local disminuye por debajo de la presión en el fluido libre. Por el contrario, en la superficie inferior, cpr es positivo o menos negativo que en el extradós, lo cual indica una presión local mayor a la presión libre. En la parte superior, la presión cerca del borde de salida se vuelve positiva indicando que la presión se incrementa levemente (Corda, 2017). La **Figura 2.12** describe el polar de un perfil.

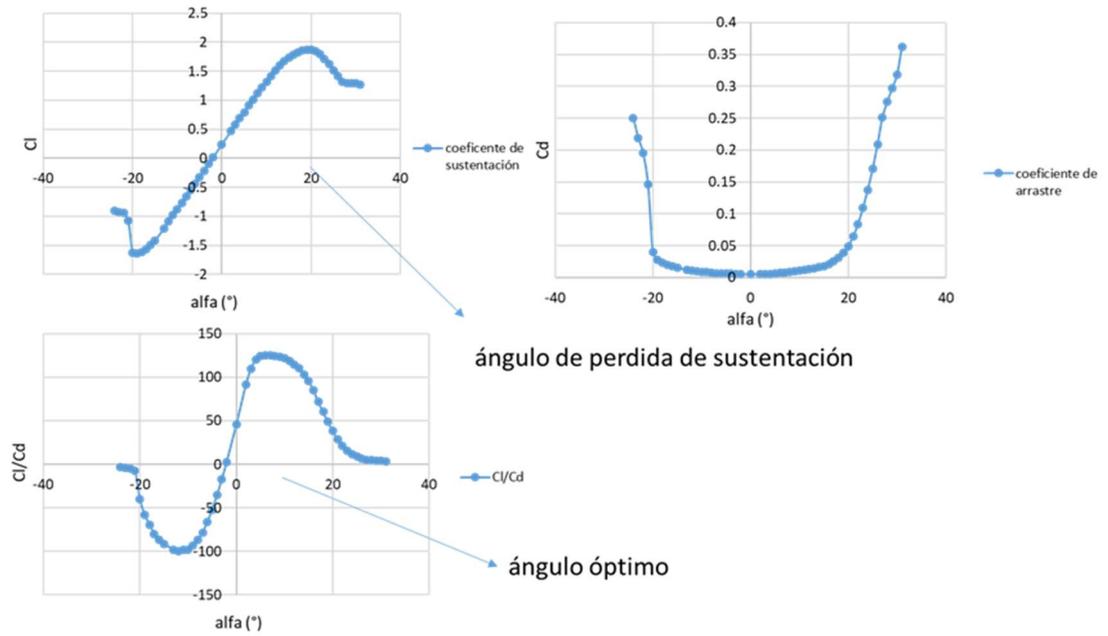


Figura 2.9. Sustentación y arrastre en función del ángulo de ataque en un perfil NACA.

2412.

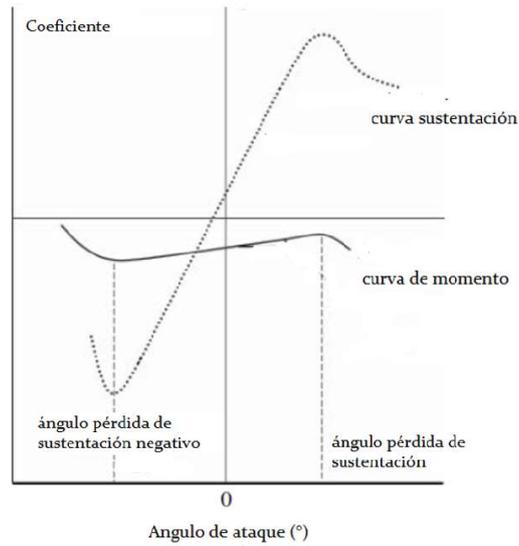


Figura 2.10. Curva de C_m y C_l en función de los ángulos de ataque (adaptado de Corda, 2017).

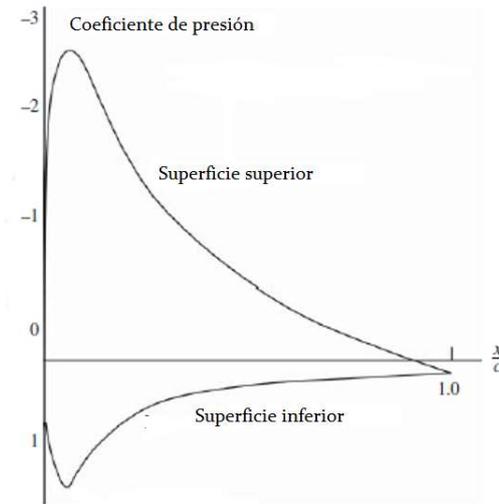


Figura 2.11. Coeficiente de presión para un ángulo de ataque general (adaptado de Corda 2017).

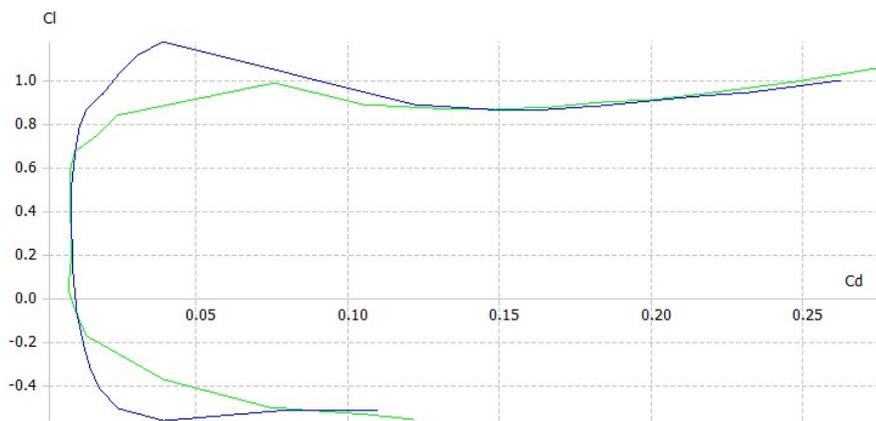


Figura 2.12 C_l en función de C_d , conocido como polar de un perfil, para dos perfiles particulares (realizado con el software Qblade).

La **Figura 2.13** muestra curvas de c_{pr} utilizando Qblade (software computacional para evaluar el desempeño de turbinas), para diferentes ángulos de ataque con una velocidad del fluido de 2 m/s y perfil NACA 2412. En la figura se observa que la presión en el borde superior disminuye rápidamente desde el borde de ataque hacia el borde de salida, pero en la superficie inferior, la presión aumenta en todas las curvas.

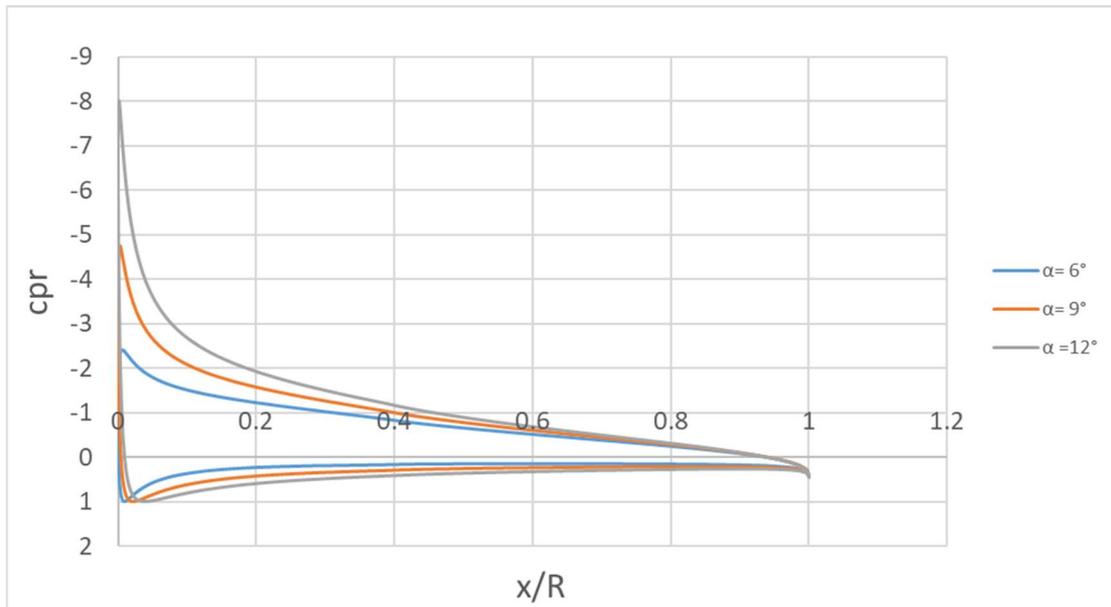


Figura 2.13. Coeficiente de presión para diferentes ángulos de ataque, x/R coordenada lineal del asa. Velocidad del fluido 2 m/s y perfil NACA 2412.

Calidad hidrodinámica del perfil

La forma geométrica del perfil determina la sustentación y resistencia dinámica que éste produce. Los coeficientes de sustentación y resistencia, C_l y C_d , como así también su relación C_l/C_d , (eficiencia) varían en función del ángulo de ataque. En generadores de tipo horizontal, el *Lift* hidrodinámico es la fuerza responsable de generar el torque que hará girar las palas para producir potencia. Por lo tanto, es deseable maximizar este coeficiente a través de un diseño apropiado. Por el contrario, es esencial minimizar la contribución de la fuerza de resistencia, opuesta al movimiento. Para una sección del perfil, se desea tener un elevado coeficiente de sustentación y simultáneamente un bajo coeficiente de arrastre (Maalawi and Badr, 2003). El valor máximo alcanzado de la eficiencia es uno de los parámetros fundamentales para el análisis del comportamiento de las hélices. El alfa que maximiza la relación, el alfa óptimo, será el ángulo de ataque particular que tendrá cada sección. La eficiencia está limitada por la calidad de fabricación de las palas; para obtener una mayor calidad dinámica, se requiere mayor calidad de terminación, estado superficial, curvatura del perfil, siendo más significativo en perfiles de alto rendimiento tales como los FX (Bastianon, 2008).

Pérdida de sustentación

Si la inclinación de la pala es muy elevada, el ángulo de ataque excede su punto máximo, α_s , y el perfil entra en pérdida de sustentación debido al desprendimiento de la capa límite en la cara superior del perfil. En este punto el gradiente de presión adverso existente más allá del punto de máximo espesor se desvanece, la velocidad disminuye y se produce el desprendimiento del flujo; por lo tanto, las palas dejan de sustentar. La sustentación depende directamente del ángulo de ataque, y a ángulos mayores, la misma disminuye y el arrastre aumenta,

lo que se traduce en la necesidad de emplear estructuras más fuertes, costosas y con mayor estabilidad en el agua y requerimientos más complejos, (Gaden and Bibeau, 2010). Por esta razón, es importante que las formas de los perfiles tengan un gradiente de presión reducido para que, de este modo, el desprendimiento ocurra en la parte posterior del perfil, próximo al borde de fuga, y la sustentación se mantenga elevada por más tiempo (Vitorino *et al.*, 2017). El coeficiente de arrastre será pequeño mientras el ángulo de ataque también lo sea. Al entrar en pérdida, la fuerza de arrastre sobre el perfil aumenta rápidamente y el perfil deja de ser efectivo. La pérdida de sustentación en un diagrama C_l en función del ángulo de ataque se evidencia por una brusca disminución del C_l inmediatamente después de alcanzar el valor del ángulo de pérdida de sustentación (**Figura 2.9** y **Figura 2.10**). La **Figura 2.14** muestra un flujo adherido al perfil y la situación cuando el perfil entra en pérdida produciéndose el desprendimiento del fluido.

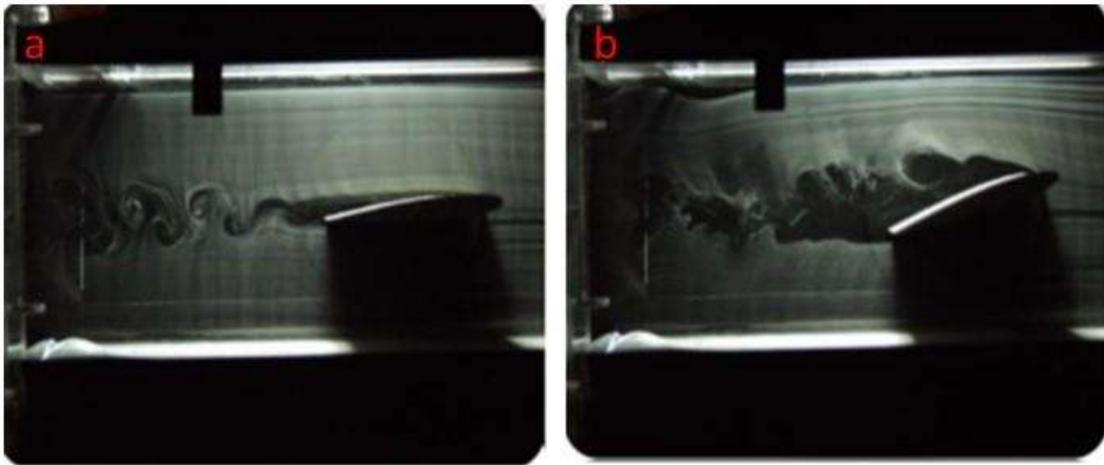


Figura 2.14. Comportamiento de: a) flujo adherido al perfil, b) desprendimiento del flujo y entrada en pérdida (Coiro *et al.*, 2018b).

Cavitación

Este fenómeno consiste en la formación de burbujas de vapor en un flujo de agua debido a una disminución de la presión en un punto, alcanzando la presión necesaria para el cambio de fase. Este efecto es común en turbinas hidráulicas convencionales o bombas centrífugas y tiene consecuencias destructivas cuando las burbujas impactan contra la superficie del rotor dando lugar a fenómenos de cavitación-corrosión, que implican pérdida de rendimiento (el desempeño disminuye, decreciendo el C_l y aumentando C_d), ruido, vibraciones y daños estructurales con eventual pérdida de rigidez (Nachtane *et al.*, 2019, Muratoglu *et al.*, 2015). El inicio de la cavitación ocurre cuando la presión local en la sección del aspa cae a, o por debajo, de la presión de vapor del fluido. La cavitación depende principalmente del coeficiente de presión (c_{pr}). Se define el número adimensional de cavitación, sigma, como:

$$\sigma = \frac{(P_{at} + \rho gh - P_v)}{0.5 \rho V^2} \quad (2.6)$$

donde P_{at} es la presión atmosférica, ρ la densidad del agua, P_v la presión de vapor y v la velocidad del flujo. La cavitación ocurrirá cuando el valor absoluto del coeficiente de presión (c_{pr}) sea igual o mayor a σ , $|c_{pr}| \geq \sigma$ (Muratoglu *et al.*, 2015, Da Silva *et al.*, 2015). Cuanto mayor sea $|c_{pr}|$ más susceptible a cavitación es el perfil. La cavitación se ve influenciada por el ángulo de ataque, la velocidad y temperatura del fluido y la profundidad del cauce, y afecta mayormente a la punta del aspa, donde las velocidades son mayores que en el resto de la pala. La cavitación es el fenómeno más importante que limita el diseño tanto para turbinas hidrocínéticas de eje horizontal como vertical. La **Figura 2.15** muestra la formación de burbujas sobre un ala en un túnel de prueba, y el daño sobre una hélice por cavitación: las continuas implosiones debidas a la cavitación en la hélice de esta turbina llegan a perforar el acero inoxidable de forma notable tanto en la unión de la pala con el buje central como en sus bordes.

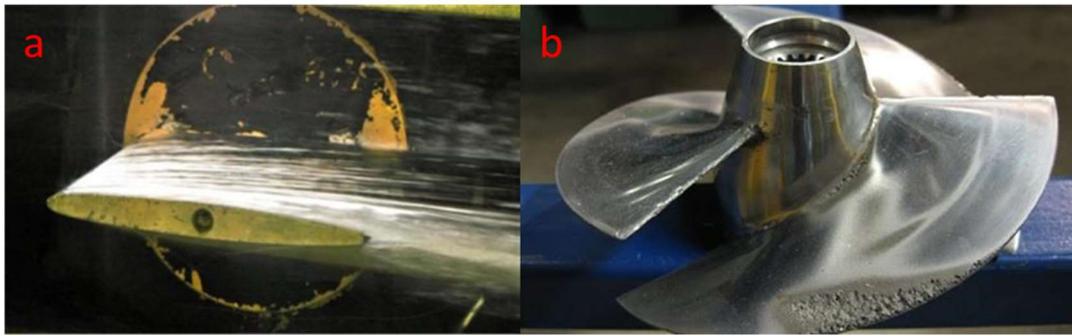


Figura 2.15. a) formación de burbujas sobre un ala en un túnel de agua de prueba. (Coiro *et al.*, 2018), b) daño estructural provocado por la cavitación de un propulsor (Nachtane *et al.*, 2019).

Turbulencia del flujo: número de Reynolds (Re)

Las propiedades físicas de un fluido están determinadas según los números adimensionales: el número de Reynolds (Re) y el número de Mach. Re fue definido anteriormente y el número de Mach es el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Este último parámetro es importante cuando se tiene un fluido compresible, y no es aplicable a líquidos, considerado entonces nulo y no necesario para los cálculos. Re es una medida de la importancia relativa entre las fuerzas inerciales y viscosas que actúan en un fluido. Este número determina el carácter laminar o turbulento de un fluido dentro de la capa límite. Se define como:

$$Re = \rho V_{\infty} L / \mu d \quad (2.7)$$

donde μd es la viscosidad dinámica del fluido, V_{∞} es la velocidad del flujo libre, ρ es la densidad y L la longitud característica del objeto. En la práctica, es muy difícil determinar los valores de Re críticos para un flujo laminar o turbulento. Se fijan valores de manera aproximada: si Re está por debajo de 100.000, el flujo probablemente será laminar. Si Re es mayor a 500.000, es muy posible que el flujo

se comporte como turbulento. Entre esos límites, se establece una zona de transición.

Entrada en pérdida - relación con Re

Para ángulos mayores que el α_s , el flujo se desprende con una repentina disminución de C_l y un aumento rápido de C_d . El valor de Re es importante para saber si el flujo en la capa límite permanece unido o se separa. La separación es demorada si la capa límite es de carácter turbulento, debido a una mayor energía cinética media del flujo, la cual permite vencer al gradiente adverso de presión manteniéndose adherido a la superficie del perfil, mejorando el comportamiento respecto al flujo laminar. Puede obtenerse un mayor α_s con una capa límite turbulenta. La curva de C_l es poco sensible a cambios de Re para ángulos de ataque pequeños, hasta que se alcanza el ángulo de pérdida de sustentación, a partir del cual, se observa que a medida que Re aumenta, la curva se desplaza hacia la derecha: los valores de C_l máximo y α_s aumentan (**Figura 2.16**). En el caso de C_d , un aumento en el Re significa un coeficiente de arrastre menor. Este comportamiento se puede visualizar en la **Figura 2.17**, donde C_d disminuye al aumentar Re. La curva de C_m como función de alfa es relativamente insensible a cambios de Re hasta alcanzar mayores ángulos. (Corda, 2017).

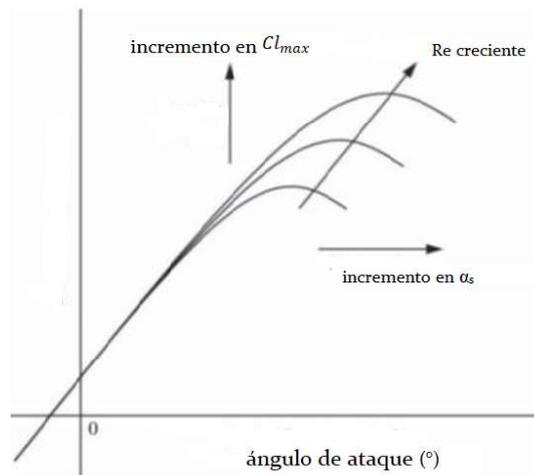


Figura 2.16. Efecto del número de Re sobre C_l (adaptado de Corda 2017).

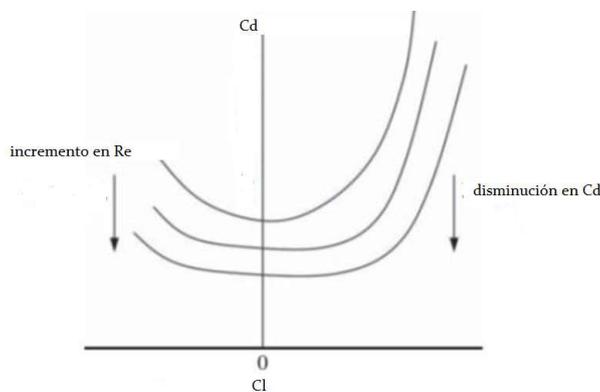


Figura 2.17. Efecto del número de Re sobre C_d (adaptado de Corda 2017).

2.1.3 Rotor de una THC- Conceptos y fenómenos en 3D

Los fenómenos tridimensionales se presentan sobre el conjunto de perfiles que forman la pala del rotor. Los mismos afectan los coeficientes hidrodinámicos e influyen en la potencia.

2.1.3.1 Potencia teórica y potencia extraíble

La potencia mecánica del fluido a través del rotor es el parámetro más importante para evaluar el desempeño de una turbina, y está determinada por la dimensión del mismo (área barrida por las aspas) y velocidad del fluido (Lynn, 2017). Dada la forma de funcionar de una hélice, por razones físicas, es necesario que haya un flujo continuo a través del plano de la misma y en consecuencia no se podrá capturar toda la energía del flujo. De capturar toda la energía del flujo su velocidad sería cero y se perdería continuidad. Esta condición impone una restricción sobre la potencia efectivamente extraíble o útil que puede capturar un rotor, siendo proporcional al coeficiente de potencia o eficiencia de conversión (C_p), característica de cada dispositivo. Este coeficiente se define como la relación entre la potencia producida por la turbina o potencia útil y la potencia teórica contenida en el curso de agua. De esta manera, la potencia del flujo interceptado por el rotor (ecuación 1.4) se reescribe como:

$$P = \frac{1}{2} \rho S_{tr} C_p V^3 \quad (2.8.a)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p V^3 \quad (2.8.b)$$

donde P es la potencia, S_{tr} la sección transversal, ρ la densidad del agua, r el radio del área barrida y V la velocidad del fluido. C_p indica la capacidad de la hélice para captar la energía y su efecto sobre la densidad de potencia puede apreciarse en la **Figura 2.18**. De acuerdo con Yuce y Muratoglu (2015), un sistema bien diseñado tiene una eficiencia entre 0,4 y 0,45.

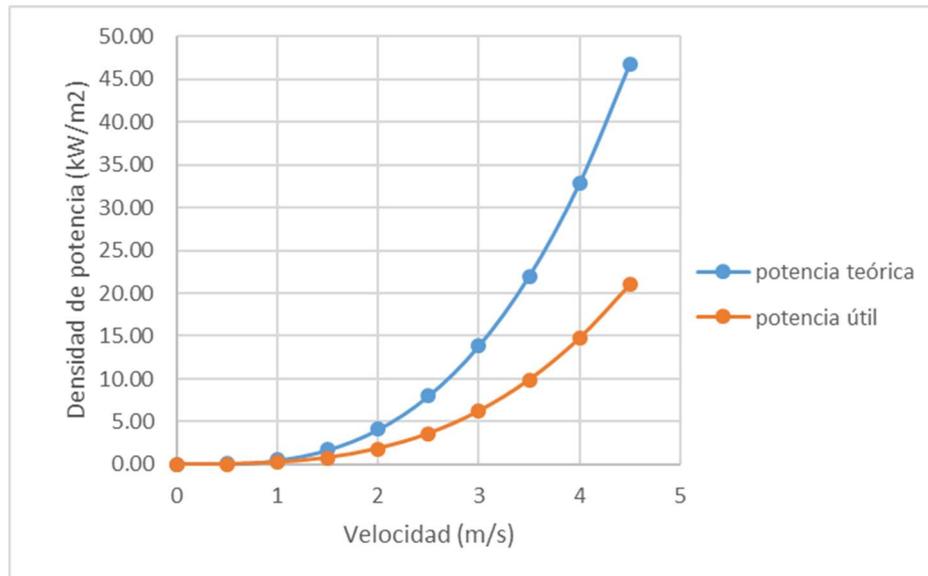


Figura 2.18. Curvas de densidad de potencia (KW/m²), ($C_p = 0.45$, $\rho = 25.5 \text{ ‰}$).

La ecuación (2.8.b) muestra que la potencia aumenta con el cuadrado del radio del área barrida por las aspas (S_{tr}) y con el cubo de la velocidad del fluido. Si duplicamos el diámetro del rotor, bajo la misma intensidad de flujo, se obtendría cuatro veces más potencia, pero si la velocidad aumenta al doble de intensidad, la potencia se multiplicará por ocho. Esta expresión muestra el interés en seleccionar lugares con altas velocidades de corrientes para reducir el diámetro del rotor y, por lo tanto, los costos de construcción. Si se utiliza un artefacto para aumentar artificialmente la velocidad del agua, se podría extraer energía con rotores relativamente pequeños.

2.1.3.2 Factores que influyen en la potencia

Velocidad media específica (TSR, del inglés *Tip Speed Ratio*, o λ)

Se define la velocidad específica o velocidad media específica (TSR) como la relación entre la velocidad lineal (tangencial) de la punta del álabe (ΩR) siendo R su longitud, y Ω la velocidad rotacional, y la velocidad libre del fluido V_∞ (Bastanian, 2008, Vitorino *et al.*, 2017).

$$TSR = \lambda = \frac{\Omega R}{V_\infty} \quad (2.9)$$

El TSR sustituye al número de revoluciones por minuto del rotor, n , para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas. El número de revoluciones se obtiene según:

$$n(RPM) = \frac{60\lambda V}{2\pi} \quad (2.10)$$

Generalmente se grafica la potencia en función de la velocidad del fluido, velocidad angular del rotor o TSR (en la figura designado como λ) (**Figura 2.19**). La variación del coeficiente de potencia en función del TSR se conoce como curva (semi empírica) de desempeño y resume las características de cada rotor. El TSR

puede variar entre uno, para turbinas con múltiples álabes de baja velocidad, hasta seis para turbinas modernas de alta velocidad con dos álabes. Se puede distinguir que los dispositivos de eje horizontal bipala y tripala, (conocidos como rápidos) poseen mayores rendimientos que todos los demás, incluso que los de eje horizontal multipala. Los generadores de eje vertical, como el rotor Savonius o el rotor Darrieux, poseen un rendimiento más bajo que los de eje horizontal.

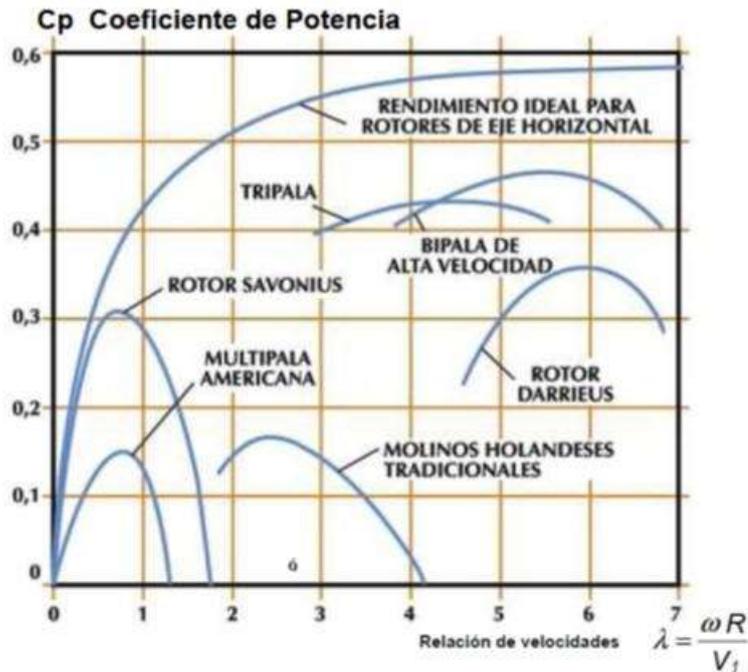


Figura 2.19. Curvas de desempeño experimentales de hélices de molinos y turbinas de viento (Bastianon, 2008).

El TSR se relaciona directamente con el número de álabes que componen el rotor de una THC. Voneschen (1989) confeccionó una tabla donde se relaciona el TSR con el número de álabes (**Tabla 2.1**).

Tabla 2.1. Relación entre número de álabes y TSR.

Número de álabes	TSR
16	1
4	2
3 (rápida)	3-5
2 (rápida)	7-9 o más

La **Figura 2.20** muestra la variación del Cp en función de TSR para diferentes valores de eficiencia: si este cociente es bajo, un aumento en el TSR de la máquina no producirá un aumento en la potencia que puede obtenerse.

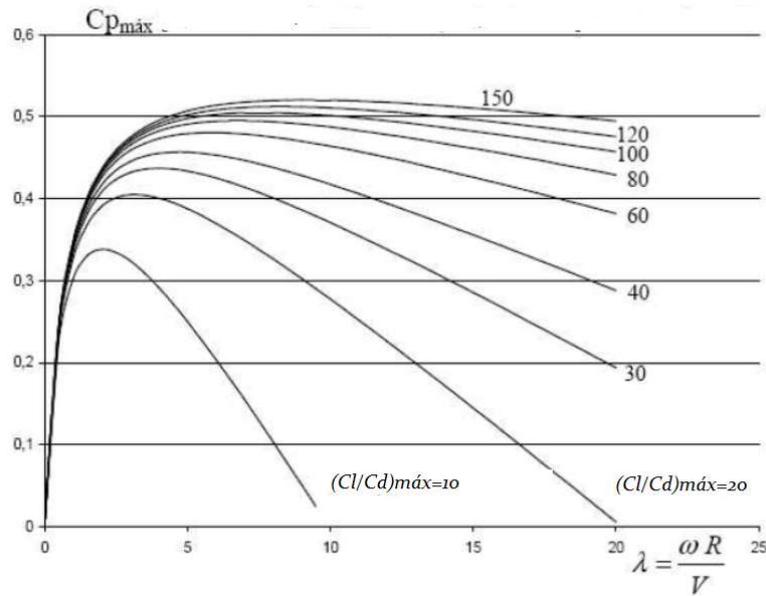


Figura 2.20. Influencia de la calidad dinámica sobre el C_p para una hélice de tres palas (adaptado de Bastianon, 2008).

Solidez S

La solidez (S) se define como la relación entre el área ocupada por las palas del rotor (A_b) y el área barrida:

$$S = N A_b / \pi R^2 \quad (2.11)$$

$$S = N c / \pi R$$

La S depende del tipo y número de las palas (N). Cuando se incrementa el número de palas, la fuerza hidrodinámica y el torque aumenta, por lo tanto, aumenta la potencia máxima que el rotor puede extraer, hasta un cierto valor más allá del cual el desempeño decrece. La **Figura 2.21** muestra la potencia en función de TSR para rotores con diferentes números de aspas. La diferencia de potencia para rotores de tres no varía significativamente a la potencia del rotor de cuatro aspas. El aumento de eficiencia entre dos aspas y tres se estima que está dentro del 3%. Sin embargo, el aumento en la eficiencia de un molino de tres a cuatro aspas es solamente un 0.5% (**Figura 2.21**). Si se elige un rotor de tres aspas, se ahorran costos de fabricación. Los rotores de tres palas tienen menos vibraciones frente a los bipala ya que por su geometría están mejor equilibrados, además producen menor impacto sonoro y una mayor potencia. Un mayor número de aspas reduciría la distancia entre ellas, y, por lo tanto, la influencia de cada una en la siguiente aumenta, lo que podría llevar a la turbina a trabajar fuera de las condiciones nominales. Por todo lo mencionado, la mayoría de las THC se construyen de tres palas.

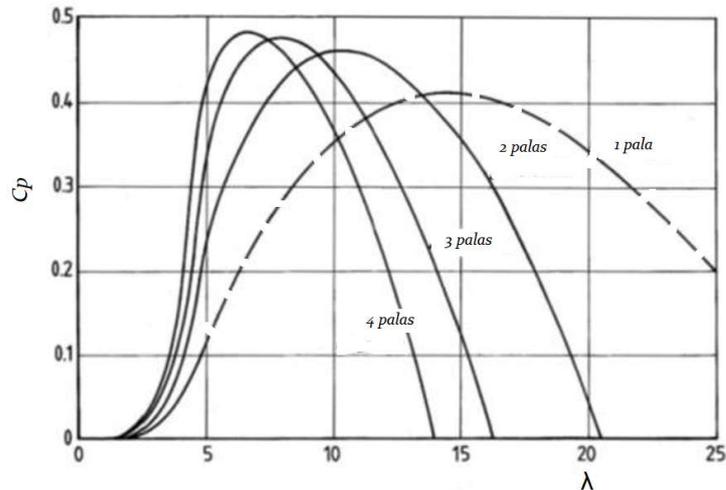


Figura 2.21. Rendimiento para rotors con diferente número de palas (adaptado de Coiro, 2018).

La solidez del rotor está relacionada con el torque de arranque, de modo que un rotor de alta solidez posee un torque de arranque elevado y gira a baja velocidad. Al disminuir la solidez de la hélice, el momento de arranque también se reduce. Éste no deberá descender por debajo del mínimo que permita arrancar.

Esbeltez o relación de aspecto (AR , del inglés *aspect ratio*)

Experimentos en túneles de viento de diferentes alas mostraron que la dependencia de los coeficientes de sustentación y arrastre con el ángulo de ataque está fuertemente influenciada por la relación de aspecto o esbeltez del ala (Abbott and Von Doenhoff, 1959). La relación de aspecto o esbeltez, AR , se define como el cociente entre el largo de la pala (envergadura, b) al cuadrado y área en planta de la misma (A):

$$AR = \frac{b^2}{A} \quad (2.12.a)$$

Si se considera la pala como un paralelogramo, su área es el producto entre la envergadura por la cuerda geométrica, cg , definida como el promedio entre la cuerda del perfil raíz y la cuerda del perfil punta de pala. Reemplazando esta expresión en la definición de AR se tiene:

$$AR = b/cg \quad (2.12.b)$$

El AR mide la relación existente entre la longitud y el área del ala: cuan larga es la pala en relación a su ancho. Por ejemplo: si este cociente fuera 1 estaríamos ante un ala plana de igual longitud que ancho. AR surge del hecho de que el ala tiene longitud finita. Los coeficientes hidrodinámicos calculados luego en este trabajo, son considerando el flujo en dos dimensiones, lo que se traduce en un ala de longitud infinita. Cuando se considera la longitud real del ala, el flujo en la punta tiende a equilibrarse de abajo hacia arriba produciendo una resistencia inducida

que sumado al movimiento rotacional del aspa, se traduce en torbellinos y vórtices en las puntas (Bastianon, 2008) (**Figura 2.22**). Este efecto de punta influye en los coeficientes hidrodinámicos y por lo tanto en el funcionamiento del rotor. Obviamente a medida que este valor se hace más elevado, el ala es más larga y estrecha y en el límite AR infinito se tiene un flujo en dos dimensiones. La esbeltez afecta a esta resistencia inducida de forma que, a mayor esbeltez, menor resistencia. En general, las alas cortas y anchas son fáciles de construir y muy resistentes, pero generan mucha resistencia; por el contrario, las alas alargadas y estrechas generan poca resistencia (y mayor potencia extraíble) pero son difíciles de construir y presentan problemas estructurales.

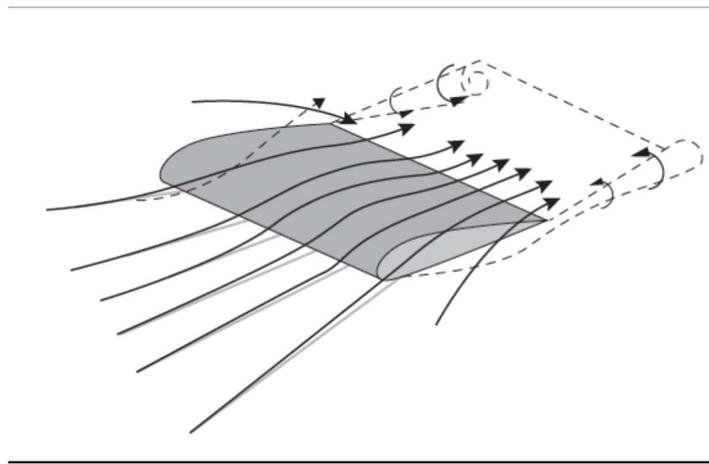


Figura 2.22. Esquema de vórtices en la extremidad del ala (adaptado de Bastianon, 2008).

Como resultado de la experimentación en túneles de viento se tiene (Abbott and Von Doenhoff, 1959):

$$C_d = C_{d0} + \frac{Cl^2}{\pi AR} \quad (2.13)$$

$$\alpha = \alpha_0 + Cl/\pi AR$$

Donde C_{d0} y α_0 son el coeficiente de arrastre y ángulo de ataque para AR =infinito. A medida que AR aumenta, el efecto del flujo en 3D sobre cada sección del perfil tiende a despreciarse (Abbott and Von Doenhoff, 1959). En la **Figura 2.23** puede observarse el efecto de la esbeltez sobre los coeficientes hidrodinámicos a menor AR el C_d aumenta y C_l disminuye, observándose una pérdida de rendimiento de la pala por baja esbeltez. En esta figura está representada la variación del polar de un perfil para diferentes AR , desde un valor uno hasta siete. Puede notarse que a partir de $AR = 5$ los puntos de C_l/C_d máximos se solapan. La **Figura 2.24** muestra el efecto del alargamiento sobre el C_l , cuanto menor es el AR la pendiente de la curva disminuye. Consecuentemente, una pala de baja esbeltez necesitaría un mayor ángulo de ataque para obtener la misma sustentación que en una pala con AR alto.

Biofouling Marino

El *biofouling* marino o el crecimiento de organismos marinos en superficies sumergidas en el mar, puede tener un impacto operativo y económico significativo. (Song *et al.*, 2019). El *biofouling* es potencialmente diverso y se desarrolla secuencialmente desde una capa inicial de materia orgánica e inorgánica adsorbida, hasta una comunidad de plantas y animales macroscópicos. Estas incrustaciones reducen el rendimiento a lo largo del tiempo. Este evento hace necesario un mantenimiento constante del estado de las palas. El rotor también puede ser dañado por escombros que estén en el mar, golpeando las palas y deteriorándolas.

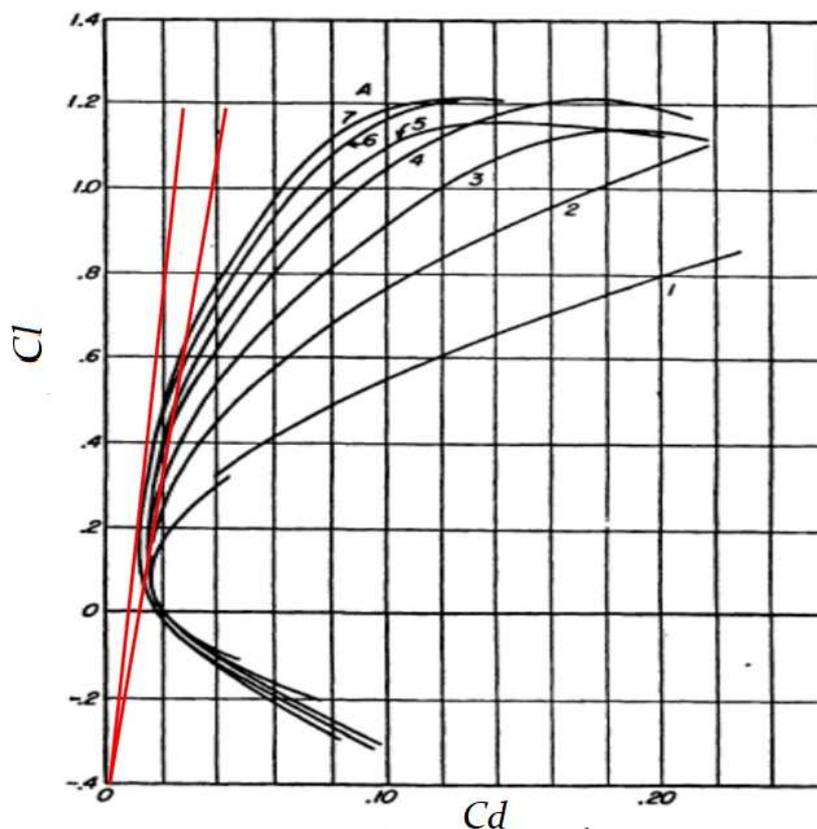


Figura 2.23. Diagramas polares para alas con diferente AR (adaptado de Abbott and Von Doenhoff, 1959). Rectas rojas marcan las tangentes de las curvas para los diagramas de $AR=1$ y $AR=7$.

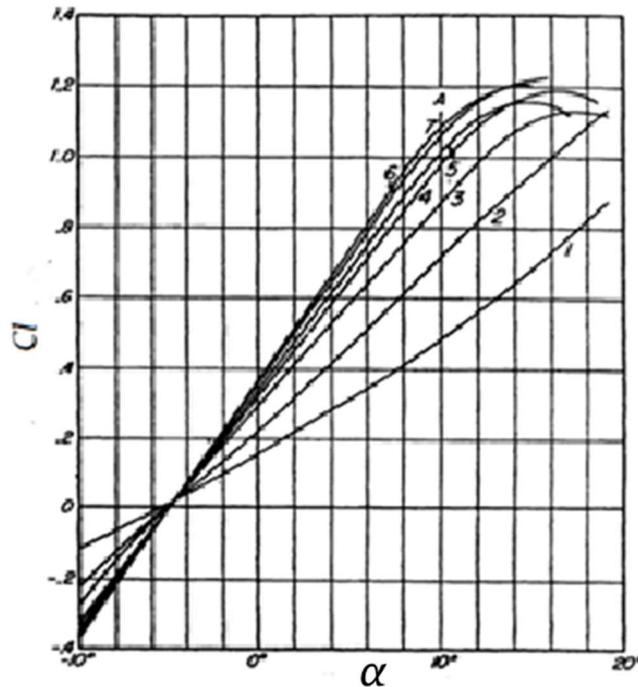


Figura 2.24. Coeficiente de sustentación (C_l) en función del ángulo de ataque (α) para diferentes valores de AR (adaptado de Abbott and Von Doenhoff, 1959).

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Condiciones y métodos de diseño

2.2.1.1. Potencia, dimensionamiento del rotor y perfil de trabajo

El diseño comienza con la elección de la potencia a producir por el rotor (potencia en el eje del rotor) y la velocidad nominal. Con estas condiciones es viable establecer el dimensionamiento del mismo, suponiendo que éste opera según las condiciones de funcionamiento nominal. Si se aplica la ecuación (2.8.a), es posible establecer el valor que debería tener el área barrida por las aspas para obtener el valor de potencia deseado, y luego, despejar la longitud de las mismas. El valor de C_p es fuertemente dependiente del tipo de dispositivo y de sus características específicas. Además, en esta instancia se debe definir el tipo de perfil hidrodinámico que se empleará.

2.2.1.2. Profundidad

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño del rotor es la profundidad del lugar. Para evitar pérdida de eficiencia es aconsejable que el dispositivo este completamente sumergido en todo momento. Además, es aconsejable colocar a una profundidad donde el efecto de las olas y del viento pueda considerarse mínimo o nulo. Este valor depende fuertemente del lugar y de las condiciones

meteorológicas y está sujeto a una gran variabilidad. A su vez, tampoco es conveniente que las aspas del rotor se encuentren cerca del lecho, para evitar turbulencias, sedimentos y efectos de contorno (marcada disminución de la intensidad de corriente causada por rozamiento y rugosidad del fondo).

2.2.1.3. Implementación de una tobera

Un factor interesante es la implementación de una tobera. Las turbinas que operan dentro de un conducto (tobera) se introducen como un medio para alterar la potencia en dispositivos de rotor de tamaño pequeño desplegados en corrientes de velocidad relativamente baja. Varios autores han estudiado el efecto de implementar una tobera para acrecentar la potencia de salida (Munch *et al.*, 2009, Garden y Bibeau, 2010, Shives and Crawford, 2010, Ambarita *et al.*, 2021, Cardona-Mancilla *et al.*, 2017). La mejora del rendimiento se obtiene esencialmente aumentando el caudal másico que atraviesa el rotor. Estas mejoras se pueden obtener utilizando una forma convergente, con un área de entrada del conducto mayor que el área de la sección donde está el rotor. De esta manera se consigue acelerar el flujo para poder producir una potencia similar a la potencia de diseño. Un artefacto de esta naturaleza también puede ser necesario para reducir al máximo los efectos de punta de pala maximizando la eficiencia de la hélice. La relación entre el área y la velocidad puede obtenerse considerando una cantidad de masa m , que pasa por cierta sección en la unidad de tiempo y con velocidad V :

$$m = S_{tr} \cdot V \cdot \rho \quad (2.14.a)$$

Aplicando logaritmo,

$$\ln m = \ln S_{tr} + \ln V - \ln \left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (2.14.b)$$

y diferenciando en el caso de un fluido permanente ($m=cte$) e incompresible, $\rho=cte$ y $d(1/\rho)=0$

$$\frac{dS_{tr}}{S_{tr}} + \frac{dV}{V} - \frac{d\left(\frac{1}{\rho}\right)}{\frac{1}{\rho}} = 0 \quad (2.14.c)$$

$$\frac{dS_{tr}}{S_{tr}} = -\frac{dV}{V} \quad (2.14.d)$$

donde $\bar{S}_t = (S_1+S_2)/2$, es el área promedio y $\bar{V}=(V_1+V_2)/2$, es la velocidad promedio. dS_{tr} y dV son el incremento del área y velocidad respectivamente. Dado que se necesita que la velocidad sea creciente a lo largo del ducto, las secciones deberán ser decrecientes, o sea la tobera será del tipo convergente. El diseño final de la tobera debe realizarse luego que se defina el tipo y tamaño del generador a emplearse.

2.2.1.4. Alabeo de la hélice

El alabeo de la hélice es otro parámetro de diseño, dado por el ángulo de trabajo μ , y su distribución sobre la pala se conoce como la torsión geométrica, alabeo o *twist*. La torsión de la pala es necesaria para asegurar que todos los perfiles (excepto el perfil raíz) estén trabajando en el ángulo de ataque óptimo. En este aspecto, el rotor de una THC es similar a las propelas de los barcos (Lynn, 2017).

2.2.1.5. Coeficientes hidrodinámicos - software Qblade

La obtención de los coeficientes hidrodinámicos fue realizada implementando la herramienta computacional Qblade. El software Qblade es una plataforma libre de simulación para el diseño de perfiles de palas de turbinas desarrollado por el grupo de energía eólica del Departamento de Fluidomecánica Experimental de la Universidad Técnica de Berlín. Los datos de entrada del software son el tipo de perfil y las propiedades físicas del fluido de trabajo expresados a través del número de Reynolds. La implementación del software Qblade tiene bajo costo computacional y simplificación de diseño. Las especificaciones del software son:

1. Definición del perfil hidrodinámico: el programa dispone de una librería con las descripciones de los perfiles dinámicos con nomenclatura NACA.
2. Estudio de las propiedades hidrodinámicas de un perfil para un determinado Número de Reynolds: coeficientes de sustentación, arrastre y momento en función del ángulo de ataque. El mismo varía en un rango de 0° a 10° , con un incremento de 1° .
3. Extrapolación polar: permite transformar los resultados en coordenadas polares de la sección anterior a 360° . Durante el proceso de iteración del Qblade, pueden darse temporalmente ángulos de ataque en un rango *post* la pérdida de sustentación, con lo cual, los datos del polar (C_l y C_d) de todos los ángulos deben estar disponibles para asegurar la continuidad del algoritmo. Para realizar la extrapolación, el software proporciona dos métodos: Montgomery y el modelo *post Stall* de Viterna-Corrigan. El manual aconseja utilizar el primer método.

El software Qblade fue utilizado también para graficar las características geométricas de la pala. El armado de las mismas se hace dividiendo a ésta en secciones, cada una definida con un perfil particular. Para cada tramo, se fija la posición (distancia desde la raíz), valor de la cuerda, el alabeo, y el polar según el Reynolds. También se especifica la cantidad de palas que componen el rotor. Generalmente se divide la pala entre 10 a 20 secciones.

2.2.1.6. Velocidad rotacional de diseño - análisis de cavitación

La definición del cpr y del número de cavitación permite calcular la velocidad crítica de las aspas (Da Silva *et al.*, 2015), siendo la presión local considerada igual a la presión de vapor, donde cpr es mínimo (cpr_{min}):

$$V_{crit} = \text{raiz}\left(\frac{2(Pv-P)}{cpr_{min}\rho}\right) \quad (2.15)$$

El criterio para evitar la cavitación fue satisfacer la condición que la velocidad del flujo sea menor al límite impuesto por la velocidad crítica. Con este concepto presente, se pueden estimar las velocidades rotacionales críticas o de diseño (Ωd) para los perfiles elegidos, correspondientes al ángulo de ataque óptimo. A partir del Ωd pueden calcularse las revoluciones por minuto (RPM) y el TSR.

2.2.1.7. Potencia de un rotor de THC-Teoría BEM

La potencia que podrá producir el rotor se determinó siguiendo los planteamientos de la teoría BEM (*Blade Element Momentum Theory*). (Nachtane *et al.*, 2020, Batten *et al.*, 2006, Batten *et al.*, 2008, Jing *et al.*, 2017, Da Silva *et al.*, 2015, Vitale and Rossi 2008, Mukherji, 2010, Bakırcı and Sezayı, 2018). A continuación, se describen los principios físicos de la misma.

Teoría del disco actuador (ADT) - cantidad de movimiento axial

La teoría del disco actuador se centra en recurrir a un modelo simplificado de rotor para explicar cómo y por qué se produce un intercambio de energía cuando el fluido lo atraviesa. Se considera un rotor ideal, con un número infinito de palas y representado por un disco de espesor nulo y área igual a la barrida por las palas al girar. Este disco de espesor nulo será el disco actuador. No se produce rotación en la estela ni se ocasionan pérdidas por fricción con el flujo. Se tiene una línea de corriente de un fluido incompresible entre los puntos a y b, donde se aplica la ecuación de Bernoulli:

$$pa + 0.5\rho V_a^2 + \rho gh_a = pb + 0.5\rho V_b^2 + \rho gh_b = pt \quad (2.16)$$

Donde p es la presión, v la velocidad, h es la altura y ρ la densidad. La presión total, pt , es constante a lo largo de la línea de corriente (**Figura 2.25**).

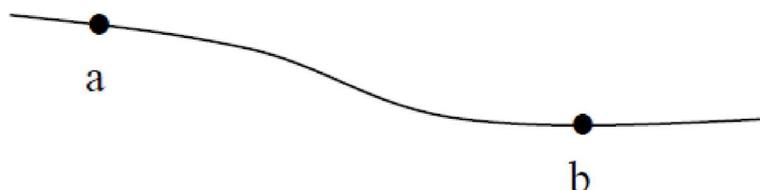


Figura 2.25. Línea de corriente entre puntos a y b.

Se considera un volumen de control limitado por los extremos (1) y (4) y por la superficie externa del flujo de las líneas de corriente que pasan por las áreas A_1 y A_4 (Figura 2.26). Las presiones en los extremos son prácticamente iguales a las del flujo no perturbado, y por lo tanto se toma $p_1 = p_4$. Se considera, además que están a la misma altura.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones (1) y (2) se obtiene:

$$p_1 + 0.5\rho V_1^2 = p_2 + 0.5\rho V^2 \quad (2.17)$$

Y entre (3) y (4)

$$p_3 + 0.5\rho V^2 = p_4 + 0.5\rho V_4^2 \quad (2.18)$$

De donde

$$p_2 - p_3 = 0.5\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad (2.19)$$

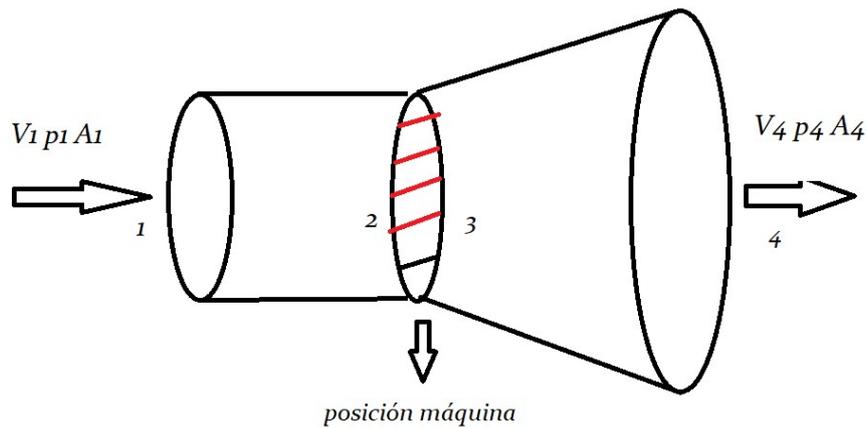


Figura 2.26. Volumen de control de trabajo.

Por la ecuación de la cantidad de movimiento axial para flujo estacionario

$$F = \int_A V \rho (V \cdot dA), \quad (2.20)$$

donde F es la fuerza exterior (neta) que actúa sobre el fluido (elemento de fluido) y A es la superficie que envuelve al volumen de control. Integrando,

$$F = V_4 \rho V_4 A_4 - V_1 \rho V_1 A_1 = \rho A_d V (V_4 - V_1) \quad (2.21)$$

De la continuidad del caudal, se tiene que:

$$\rho V_4 A_4 = \rho V_1 A_1 = \rho V A_d \quad (2.22)$$

Donde A_d es el área del disco de la hélice. Entonces la fuerza (que el flujo ejerce) sobre la hélice es:

$$Fsd = \rho A_d V (V_1 - V_4) \quad (2.23)$$

Y también es igual a:

$$Fsd = (p_2 - p_3) A_d \quad (2.24)$$

Entre las ecuaciones (2.19), (2.23) y (2.24) se deduce que la velocidad V que cruza la hélice es

$$V = (V_1 + V_4)/2 \quad (2.25.a)$$

Esta velocidad axial V que atraviesa el disco de la hélice, es menor que la velocidad del flujo libre y se puede representar introduciendo un *factor de interferencia* a , de modo que:

$$V = V_1(1 - a); V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (2.25.b)$$

El factor de inducción “ a ” representa el decrecimiento fraccional de la velocidad del fluido una vez que llega al rotor y depende de la cantidad de energía que captura la turbina.

A su vez, la potencia captada por la hélice es el producto de la fuerza que el flujo ejerce sobre la misma (ecuación 2.23), multiplicada por la velocidad del fluido a través del disco de la hélice:

$$Pc = FsdV = \rho A_d V (V_1 - V_4) V = 2\rho A_d V_1^3 a(1 - a)^2 \quad (2.26)$$

Esta potencia pasa por un máximo cuando $a = 1/3$. En este caso $V = 2/3V_1$ y $V_4 = 1/3V_1$.

También se ha visto que:

$$Pc = 0.5\rho C_p A_d V_1^3 \quad (2.27)$$

de donde resulta

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.28)$$

Cuando $a = 1/3$, C_p alcanza el valor máximo:

$$C_{p_{m\acute{a}x}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.29)$$

Este valor es llamado coeficiente de Betz (Betz, 1927) y expresa que no toda la potencia del fluido puede transformarse en su totalidad en energía mecánica y sólo se utiliza una fracción de la misma, para cumplir el principio de continuidad del fluido; sólo puede extraerse un máximo de 59 % de la energía cinética en condiciones ideales. Este límite teórico de eficiencia es aplicable tanto a turbinas eólicas como hidrocinéticas (Syed *et al.*, 2013). Si a es nulo, el agua pasa a través de la turbina sin obstáculos y no existe captación de energía. Si a es 0,5, implica que

la velocidad del flujo a la salida de rotor es nula, lo cual no puede darse por continuidad del fluido. Por lo tanto, el límite de Betz solo es aplicable si pertenece al intervalo (0;0,5) (Lynn, 2017). A partir de las ecuaciones (2.19) y (2.23), que suponen fricción nula entre el fluido y la pala de la hélice, se obtiene:

$$p_2 - p_3 = \rho V(V_1 - V_4) = \rho V_1^2(1 - a)2a \quad (2.30)$$

Esta relación, permite deducir el empuje producido sobre un anillo de área elemental $dA = 2 \pi r dr$. El empuje será:

$$dT = (p_2 - p_3)dA = 4\pi\rho V_1^2(1 - a)ardr \quad (2.31)$$

Al cruzar el disco de la hélice, el fluido se enrosca en el sentido contrario a la rotación de la hélice (**Figura 2.27**).

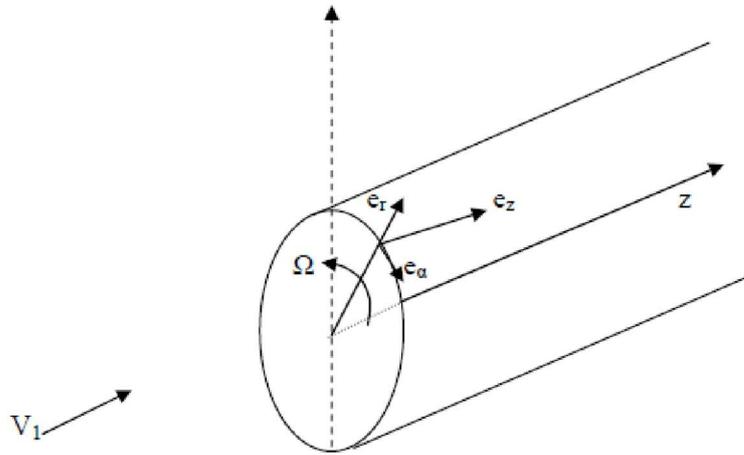


Figura 2.27. Sentido de rotación detrás de la hélice (Bastianon, 2008). V_1 es velocidad incidente, Ω es la velocidad angular y e_r , e_z y e_α son los versores en dirección radial, vertical y angular respectivamente.

La rotación de la hélice ha sido elegida en el sentido contrario a e_α , y por lo tanto tiene un valor negativo. Por su parte, la velocidad de rotación del fluido varía desde un valor nulo frente al disco, a un valor ωr detrás del mismo. Tomando el valor medio de rotación del fluido como $\omega r/2$, se tiene que la velocidad de rotación del fluido relativa a la pala es $(\omega/2 - \Omega)r$. Si se introduce un factor de velocidad angular definido como: $a' = \omega/2\Omega$, la velocidad de rotación del fluido relativo es $V_{tr} = \Omega r (a' - 1)$. Esta velocidad se suma con la velocidad axial $V = V_1 (1 - a)$, dando la velocidad relativa resultante V_r (**Figura 2.28**).

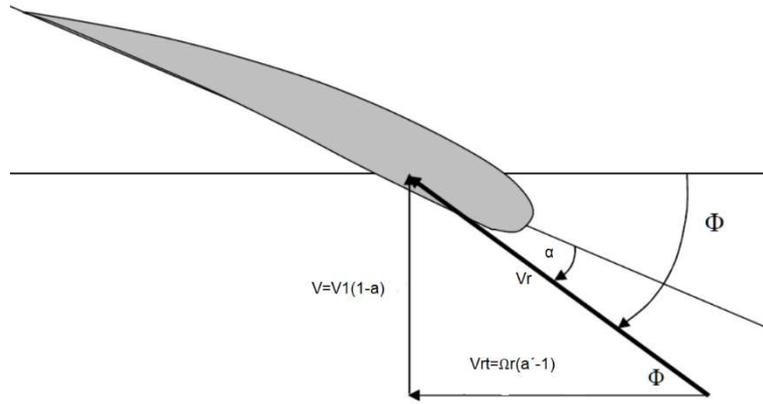


Figura 2.28. Velocidad relativa del flujo (adaptado de Bastianon, 2008). Φ es el ángulo de flujo, V_r la velocidad relativa, V la velocidad del flujo incidente, V_{tr} es la velocidad tangencial y α es el ángulo de ataque.

De acuerdo con la ecuación del momento de la cantidad de movimiento para un flujo estacionario, el momento exterior que actúa sobre el fluido está dado por:

$$C = \int_A r V_{abs} \rho V_{rel} dA \quad (2.32)$$

La integral se extiende sobre la superficie que envuelve al volumen de control, V_{abs} es la velocidad absoluta y V_{rel} es la velocidad del flujo relativa a la pala de la hélice. Al resolver la integral y sumando las contribuciones, se obtiene el momento elemental ejercido sobre la hélice:

$$dC = -4\pi\rho V_1 a' (1 - a) \Omega r^3 d_{rez} \quad (2.33)$$

El límite de Betz impone una restricción teórica sobre la energía que podría extraerse de un curso de agua. Como toda máquina, en una turbina hidrocínética real se distinguen pérdidas de carácter mecánico (rozamiento entre las partes), eléctrico (generador, cables, baterías) y pérdidas dinámicas (fuerza opuesta al sentido de giro) (Voneschen, 1989, Vitorino *et al.*, 2016, Vitorino *et al.*, 2017, Labriola y Alvarez, 2016). Cada parte del proceso de conversión de energía cinética a eléctrica tiene asociada una eficiencia característica, que hace que la potencia extraída sea inferior al valor máximo de diseño. La eficiencia global de todo el sistema se define como el producto de las eficiencias de cada parte. Si denominamos con la letra η a las eficiencias parciales, se tiene que:

$$\eta_{sistema} = \eta_{rotor} * \eta_{caja\ de\ cambio} * \eta_{generador} * \eta_{eléctricas} \quad (2.34)$$

La ecuación (2.8) se convierte en:

$$P = 0.5\rho S_t \eta_{sistema} V^3 \quad (2.35)$$

Teoría del elemento de pala

Las teorías anteriores permiten expresar la potencia producida por el rotor en función de los parámetros a y a' , sin considerar la forma de la hélice ni el tipo de perfil de las palas que lo constituyen. En la teoría del elemento de pala se incluyen los efectos de resistencia o arrastre y de sustentación sobre las palas. Una porción elemental de pala de hélice, de espesor dr , puede ser considerada como un perfil bidimensional aislado, con sus características dinámicas propias. Omitiendo la interferencia de las secciones adyacentes y también la producida por las otras palas, se puede considerar que los coeficientes de los esfuerzos, tangencial (C_t) y normal (C_n) al plano de giro, están dados por:

$$C_t = C_l \sin\phi - C_d \cos\phi \quad (2.36.a)$$

$$C_n = C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \quad (2.36.b)$$

De acuerdo con la **Figura 2.29**, se desprende que el empuje y el momento que actúa sobre el elemento es:

$$dT = 0.5\rho V r^2 N c g C_n dr \text{ (Empuje)} \quad (2.37)$$

$$dC = 0.5\rho V r^2 N c g C_t r dr \text{ (Momento o Torque)} \quad (2.38)$$

N es el número de palas del rotor y cg es la cuerda geométrica.

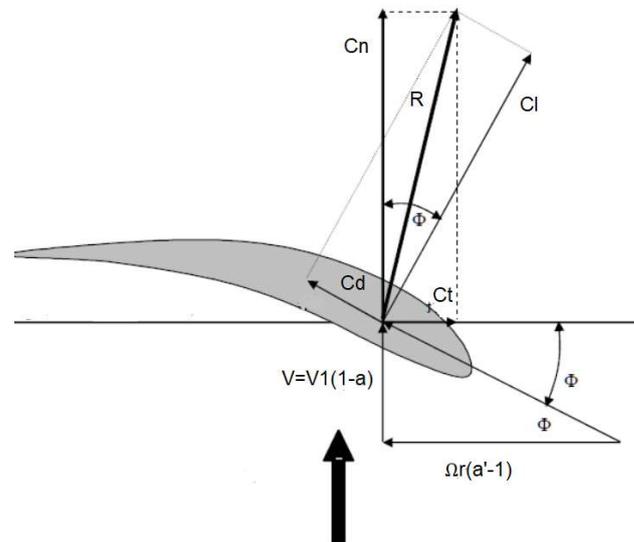


Figura 2.29. Empuje y momento sobre un elemento de pala (adaptado de Bastianon, 2008). ϕ es el ángulo de flujo, V la velocidad del flujo incidente, Ωr es la velocidad tangencial, R es la fuerza resultante, C_t es el esfuerzo tangencial, C_n es el esfuerzo normal, C_l es el coeficiente de sustentación y C_d es el coeficiente de arrastre.

Teoría del momento del elemento de aspa- BEM Theory

El cálculo del desempeño de un rotor se obtiene combinando las teorías de

Elemento de Aspa y de Conservación de Momentos, aplicada a una sección anular del rotor de radio r y longitud dr . Luego, las características del rotor completo se obtienen integrando las contribuciones de todos los elementos del aspa. En ambas teorías se han desarrollado expresiones aproximadas del empuje y del momento, si bien en la teoría basada en la variación de la cantidad de movimiento, no se consideró los efectos de la fricción en el fluido. De este modo, ambas teorías serían válidas sólo si se considera que el perfil no ofrece resistencia, o sea, el coeficiente C_d es nulo.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Características del rotor de estudio

En función del objetivo final de diseñar rotores hidrodinámicos para explorar su comportamiento en las zonas costeras dentro de la provincia de Chubut, se plantearon condiciones de contorno de manera de ser de relativo bajo costo, simple de construir, pero tenga una potencia razonable para realizar mediciones de parámetros extrapolables a equipos de mayor tamaño. Con estas consideraciones presentes, se optó por un rotor sumergido de eje horizontal de tres palas conectadas a un cono central. La forma de operación planteada fue simple y autónoma, con un sistema de arranque particular. El rotor podrá pivotar libremente y alinearse con la corriente en todo momento, acorde con las velocidades variables de las mareas. Este sistema de giro permitió utilizar hélices de ~~paso fijo~~ con perfiles asimétricos. El ángulo de paso o *pitch* de la pala fue considerado 0° en todos los casos, trabajando luego con palas de paso fijo.

Se eligió una estructura de soporte que permita tener este sistema boyante conectado vía un cable a un peso muerto fondeado en el lecho marino (sistema *Tethered*). El cable le da libertad en el plano horizontal para que el dispositivo se oriente permanentemente a la corriente, similar a una embarcación fondeada, pero a media agua. Este modelo tiene un bajo costo de construcción y mantenimiento y al estar sumergido no disturba el paisaje ni está sujeto a la acción de las olas y viento. Además, puede usarse en sitios profundos. Este modelo presenta, sin embargo, efectos adversos como posible interacción de los cables con la fauna marina, requiere un buen sistema de amarre para impedir que el dispositivo se desenganche y se necesita balizamiento en superficie para marcar su posición. Se decidió que para los momentos en que la velocidad de la corriente fuera baja, el rotor pierda eficiencia, no generando potencia útil sobre el eje. De todas maneras, según McMaster and Henderson, (1980), la eficiencia en el desempeño de perfiles con Re por debajo de 100.000 se deteriora con rapidez.

2.3.2. Potencia, dimensionamiento del rotor y perfil de trabajo

En particular se definió una potencia de 2200 W (este valor es tres veces más que una máquina cortadora de césped hogareña de 750W o un HP). Al tratarse de un sistema piloto se plantearon condiciones de contorno de manera de ser de relativo bajo costo, sea simple de construir, pero tenga una potencia razonable para

realizar mediciones de parámetros extrapolables a equipos de mayor tamaño (y potencia), con dimensiones que, sin ser muy grandes para facilitar su manipuleo y operación, los efectos del entorno sean proporcionales a casos de mayor tamaño. El valor de potencia de diseño permitió acotar el tamaño del sistema, teniendo presente que en algunos lugares se podría obtener más potencia y en otros menos, pero dentro de una tolerancia de aproximadamente un 25 %. Los resultados obtenidos podrían extrapolarse a dispositivos de mayor tamaño mediante relaciones de semejanzas (Labriola y Peralta, 2014). Esta potencia de diseño es única para todos los sitios. Se consideró una velocidad nominal de operación de 2 m/s, y densidad estándar de 1025.5 kg/m^3 . Estos valores de parámetros permitieron definir una potencia teórica disponible igual a 4102 W/m^2 . La condición de velocidad de diseño elegida se debe a que en la evaluación de las zonas donde se consideró instalar el equipo de estudio, la corriente de marea promedio oscilaba alrededor de 2 m/s. Para el diseño de la THC considerada en el presente estudio, se adoptó un valor de C_p de 0,45 sobre la base de experimentos realizados por Coiro *et al.*, (2018), en un túnel de prueba de agua. El prototipo diseñado por estos autores presentó un rotor pequeño de tres aspas, de eje horizontal, con dimensiones similares al rotor propuesto, (cuerda de 0.136 m en la raíz, 0.05 m en la punta y radio 0.4 m), y con una velocidad nominal igual a la velocidad considerada en este estudio.

Para el dimensionamiento del rotor se utilizó la ecuación de potencia, resultando un área barrida por las palas de 1.195 m^2 (a_2), con un radio (longitud) de $R=0.62 \text{ m}$. El radio de las palas se compone por el cono central de 0.12 m y el aspa propiamente de 0.5 m. El plato que sostiene las palas tiene un radio de 0.054m, luego, el radio total del rotor fue 0.674m. Otros tamaños de rotores de eje horizontal de tres palas pueden ser el de Batten *et al.*, (2006), quienes obtuvieron un rotor de 7,5 m, Batten *et al.*, (2008), con un rotor de 10 m y Da Silva *et al.*, 2015, estudiaron un rotor de 5 m. Dimensiones más parecidas al rotor propuesto en este trabajo son las obtenidas por Mancilla-Cardona *et al.*, (2017), quienes estimaron un rotor de 0,75 m y Coiro *et al.*, (2018) que trabajaron con un rotor de longitud 0,4 m.

Para la elección del perfil hidrodinámico se realizó una búsqueda de perfiles disponibles en el mercado. Existen perfiles evolucionados que tienen muy buenas características y comportamiento frente a Reynolds bajos, y presentan mayores eficiencias y calidad hidrodinámica, como los perfiles FX. Esta alta eficiencia se mantiene siempre y cuando el estado superficial del perfil sea óptimo, entendiéndose como óptimo, que respete con mucha precisión los valores geométricos de diseño y presente una superficie pulida y limpia de incrustaciones (*fouling*) en todo momento. De no cumplirse esta condición el desempeño decae muy significativamente. Como la turbina operará en un ambiente marino, estas condiciones son utópicas dado que el mismo tiene un alto contenido de material orgánico e inorgánico que hace muy difícil mantener la pala libre de residuos adheridos por mucho tiempo. El uso de estos perfiles en estado de buena calidad es poco probable y no es conveniente invertir en un perfil tan complejo, ya que en estas condiciones su comportamiento es deficiente. Por lo tanto, se decidió trabajar con perfiles convencionales más simples, económicos y de menor calidad, pero más

tolerantes a alteraciones de su geometría, como los NACA, en particular se eligieron de cuatro dígitos. Se evaluaron perfiles de la serie 24xx, asimétricos, (Tabla 2.2 y Figura 2.30), que aportan un C_l máximo mayor que un perfil simétrico, permitiendo trabajar en un mayor rango de ángulos de ataque antes de la pérdida de sustentación. En particular se usaron el 2406, 2409 y 2412.

Tabla 2.2. Denominación y características de perfiles.

Nombre	Máximo camber	Posición del máx. camber	Espesor máximo
2409	0.02c (2%)	0.4c (40%)	0.09c (0.9%)
2406	0.02c (2%)	0.4c (40%)	0.06c (0.6%)
2412	0.02c (2%)	0.4c (40%)	0.12c (12%)

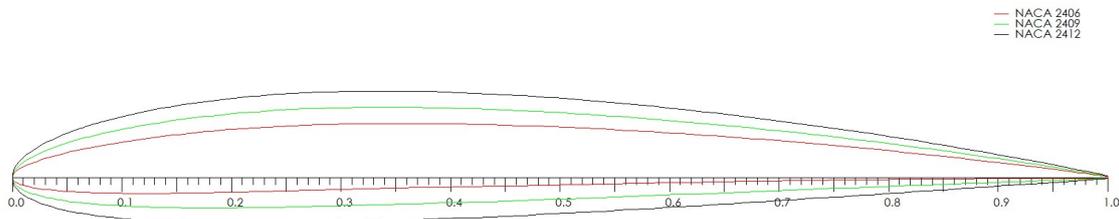


Figura 2.30. Esquema de los perfiles NACA 24xx (realizados con el software Qblade).

Para evitar efectos de pérdida de sustentación se verificó que el ángulo óptimo se sitúe fuera de esta zona y se trabajó en rangos de ángulos de ataque donde C_l fuera lineal. Bastianon (2008) sugiere aquellos perfiles en los cuales el coeficiente C_l alcanza su valor máximo en forma suave, evitando los que tienen picos agudos, donde la abrupta caída de la sustentación puede producir fuertes vibraciones que podrían dañar sustancialmente la estructura del rotor. Los perfiles NACA utilizados en este trabajo cumplen este requisito. Se examina el desempeño de perfiles alares determinados (serie NACA de 4 dígitos) mediante curvas de desempeño para diferentes Re , que en el caso de perfiles alares, como largo característico se consideró la cuerda geométrica. Luego de varios cálculos de potencia con estos perfiles, se determinó trabajar con un único perfil, en particular el NACA 2412, porque produce una potencia mayor a los otros dos perfiles considerados, este punto se desarrolla en la sección 2.3.7.1.

2.3.3. Profundidad

En cuanto a la profundidad, el dispositivo podrá colocarse en la zona de mayor velocidad dentro de la columna de agua, lejos de los límites de contorno superficial y de fondo, para evitar la pérdida de eficiencia y el efecto de las olas y viento. La profundidad de instalación del dispositivo puede ser determinada con datos *in situ* de perfiles de velocidad en el tiempo, información suministrada por ejemplo con un ADCP o un arreglo de correntómetros. El dispositivo contará con un sistema de posicionamiento (por ej. veleta) para orientarse a la dirección de la corriente en el lugar.

2.3.4. Implementación de una tobera

Se determinó la utilización de una tobera para canalizar el fluido y aumentar la intensidad del flujo incidente a la velocidad nominal de diseño de 2 m/s en los sitios donde las velocidades promedio fueron de baja magnitud (del orden de 0,5 m/s), como en el Golfo Nuevo y Río Chubut. A su vez, entubar la hélice permitió despreciar los efectos de punta tridimensionales que se manifiestan cuando se considera hélices con una longitud finita. En el GSJ y CL, las velocidades medias estimadas se consideraron lo suficientemente altas y la tobera solamente se usó con este último propósito. Otro beneficio de utilizar la tobera fue que la misma se puede diseñar de manera que aporte la flotabilidad positiva necesaria para mantener al sistema a media agua. Las velocidades estimadas en cada sitio (**Tabla 1.3** y mediciones en el RCH) y el área resultante del dimensionamiento del rotor (a_2) fueron utilizadas para confeccionar la **Tabla 2.3**, donde se muestran la superficie de la sección de entrada del conducto (a_1) y radio (r_1) en función del aumento de velocidad.

Tabla 2.3. Relación de áreas de entrada/salida de la tobera.

Sitio	Velocidad libre (m/s)	Velocidad con tobera (m/s)	Incremento velocidad(%)	a_1 (m ²)	r_1 (m)	a_1/a_2
Golfo Nuevo	0.57	2	28.5	5.02	1.26	3.51
Golfo San José	2.64	2.64	0	1.43	0.674	1
Río Chubut	0.55	2	27.5	5.2	1.3	3.69
Canal Leones	2.57	2.57	0	1.43	0.674	1

2.3.5. Coeficientes hidrodinámicos - software Qblade

Validación de las curvas hidrocinéticas

Las salidas de las curvas con el software Qblade se compararon con las curvas experimentales reportadas en Abbott and Von Doenhoff, (1959), construidas a partir de numerosos ensayos en túneles de viento para perfiles estandarizados NACA 0009 y 2412. Las pruebas en dicho estudio se realizaron en un túnel bidireccional de 3 pies de ancho y 7 ½ pies de altura, para números de Reynolds de 3, 6 y 9 millones. El C_l fue medido integrando las distribuciones de presión entre el piso y el techo del túnel. El C_d fue obtenido indirectamente por mediciones en la estela y el C_m fue medido directamente con una balanza. Según los autores, estas mediciones pueden ser obtenidas con un alto grado de certidumbre (**Figura 2.31**). La comparación entre los coeficientes experimentales y calculados con el software Qblade se muestran en la **Figura 2.32**.

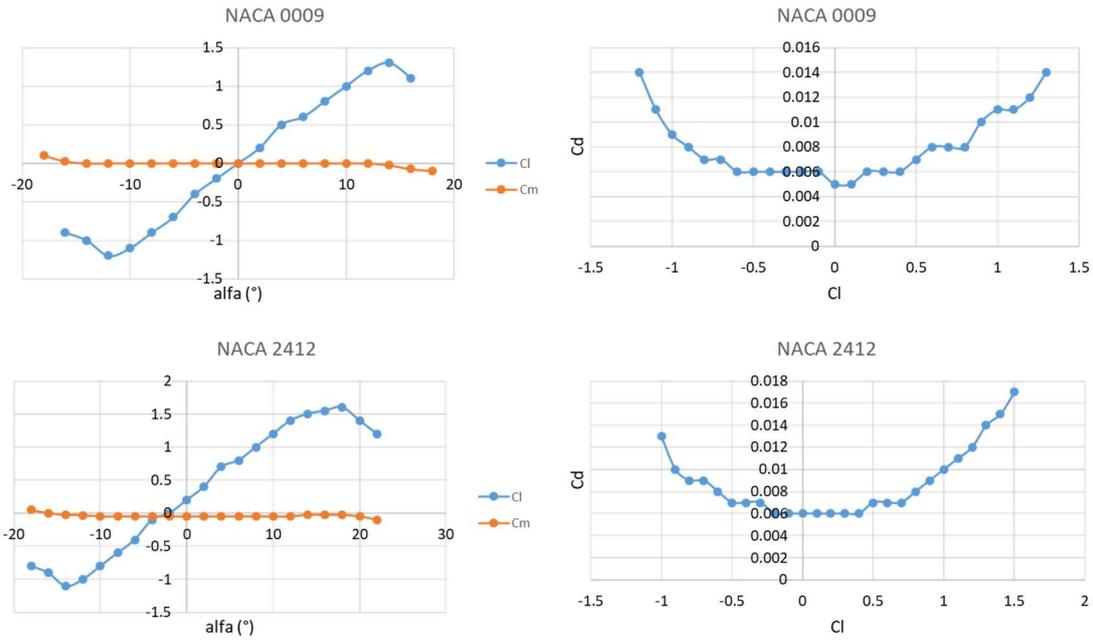


Figura 2.31. Curvas experimentales para perfil NACA 0009 y NACA 2412 (adaptado de Abbott and Von Doenhoff, 1959), α es el ángulo de ataque, C_d es el coeficiente de arrastre, C_l es el coeficiente de sustentación y C_m es el coeficiente de momento.

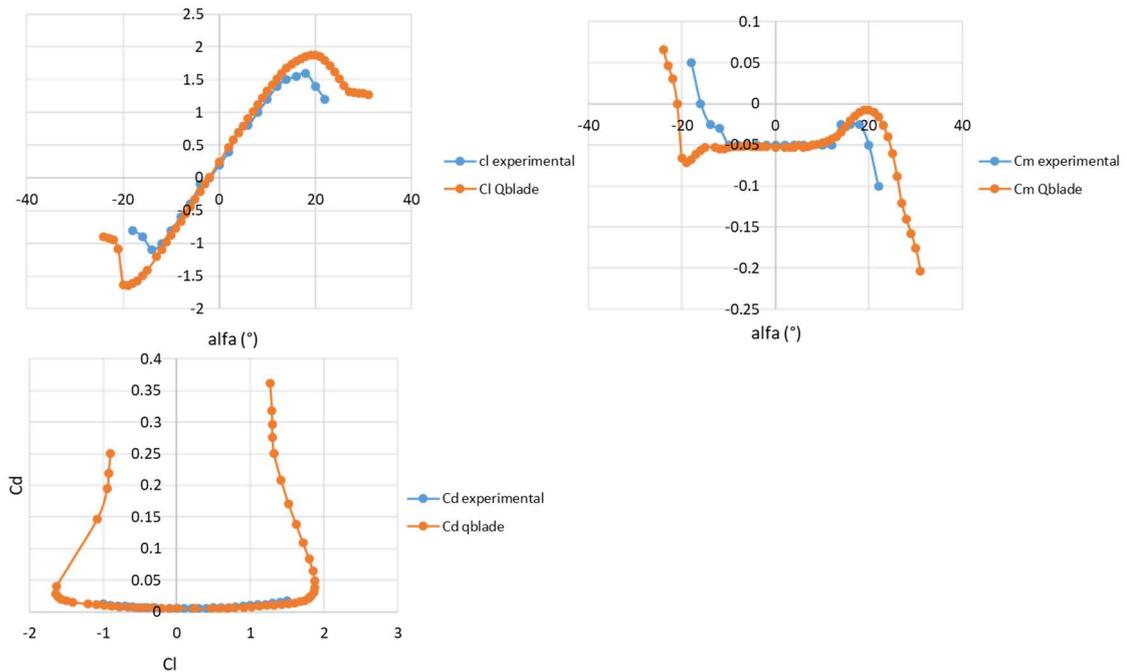


Figura 2.32. Comparación entre los coeficientes experimentales obtenidos por Abbott and Von Doenhoff, (1959) y coeficientes con el software Qblade para perfil NACA 2412, $Re = 6 \times 10^6$. α es el ángulo de ataque, C_d es el coeficiente de arrastre, C_l es el coeficiente de sustentación y C_m es el coeficiente de momento.

Coeficiente de momento: C_m

NACA 0009 (**Figura 2.31**): el ángulo de ataque varía entre $(-18^\circ; 18^\circ)$ para todos los valores de Re. C_m está comprendido en el intervalo $(-0,13; 0,1]$, con valores que oscilan en el 0.0 desde -18° a 14° de alfa.

Perfiles calculados con el software Qblade, **Figura 2.33 (a)**

$Re=3 \times 10^6$: C_m está comprendido entre $(-0,03; 0,03)$, valores menores al C_m experimental. Los valores calculados oscilan alrededor del cero, pero con un comportamiento menos estable hacia los extremos de alfa (de -18° y 18°).

$Re=6 \times 10^6$: C_m está comprendido entre $(-0,03; 0,03)$, dentro del rango de variación del C_m experimental. Los valores se mantienen alrededor del cero para alfa entre $(-10^\circ$ y $10^\circ)$. C_m tiene menor variabilidad, pero hacia los extremos el modelo también se desestabiliza.

$Re=9 \times 10^9$: el valor de C_m pertenece al intervalo $(-0,03; 0,03)$, valores menores al C_m experimental. Los valores se mantienen alrededor del cero para alfa entre -10° y 10° , y hacia los extremos el modelo se desestabiliza.

El software subestima levemente los valores de C_m experimentales para los Re analizados, pero reproduce el comportamiento general: valores centrados en el 0,0 para alfas entre -10° y 10° .

NACA 2412 (**Figura 2.31**): los valores de Re para este perfil son de 3,1, 5,7 y 8,9 millones (10^6). La información se presenta para alfas entre $(-18^\circ; 20^\circ)$; para todos los valores de Re. C_m está comprendido en el intervalo $(-0,13; 0,05]$, y oscila alrededor de $-0,05$ para alfas entre -10° y 10° . El coeficiente de momento para alfa entre -18° y -16° es positivo y negativo para alfas mayores a -16° .

Perfiles calculados con el software Qblade, **Figura 2.33 (b)**

$Re=3.1 \times 10^6$: C_m está comprendido entre $(-0,1; 0,0)$, para el intervalo de alfa analizado, magnitudes del orden del C_m experimental. Los valores calculados oscilan alrededor del $-0,05$ para alfa entre -10 y 10 grados.

$Re=5.7 \times 10^6$ y 8.9×10^9 : C_m es negativo para el intervalo de alfa de -18° - 20° . Para alfa entre -10° y 10° , el C_m calculado oscila alrededor del $-0,05$, y está comprendido entre $(-0,1; 0,0)$. Hacia los extremos, el modelo se desestabiliza.

El software reproduce el comportamiento de los valores observados para todos los Re analizados: dentro del rango de alfa operacional, los C_m son negativos y oscilan alrededor del $-0,05$ para alfa -10° y 10° . La estimación de C_m para el perfil 2412 es más estable que para el perfil 0009 y reproduce mejor las magnitudes. Se considera que el software puede reproducir los valores de C_m experimental.

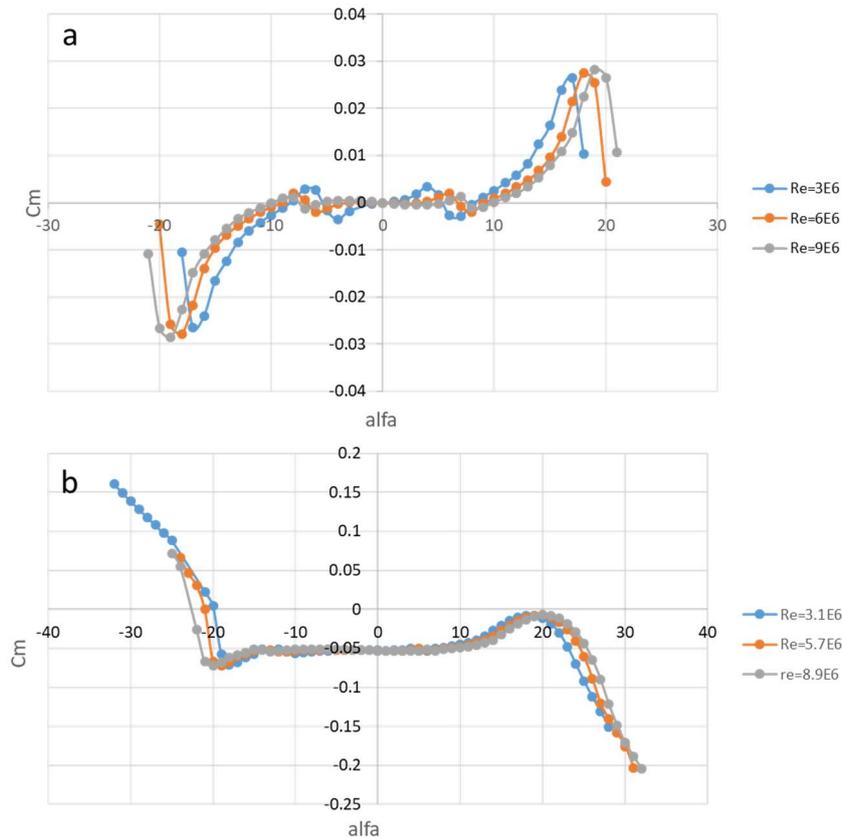


Figura 2.33. Curva de C_m sobre ángulo de ataque (α), (a) NACA 0009, (b) NACA 2412, para diferentes valores de Reynolds.

Coefficiente de sustentación: C_l

NACA 0009 (**Figura 2.31**): el rango de alfa donde se tiene información es $(-16^\circ; 18^\circ)$. El gráfico de C_l vs alfa es simétrico y el valor de alfa para $C_l=0.0$ es nulo, correspondiente con un perfil simétrico. C_l experimental varía dentro de $(-1.3; 1.3)$, siendo el C_l máximo 1,3 para un alfa 14° . Para ángulos mayores, los perfiles entran en pérdida.

Valores calculados con el software Qblade, **Figura 2.34 (a)**

$Re= 3 \times 10^6$: la curva de C_l vs alfa muestra valores levemente superiores a los experimentales, siendo el rango del mismo $(-1.5; 1.5)$. El valor de C_l máximo se da en 1.5 con un ángulo de pérdida de 16° . El perfil es simétrico y el ángulo para sustentación nula es 0° .

$Re=6 \times 10^6$: los valores calculados están comprendidos en el intervalo $(-1.7; 1.7)$, rango de variación mayor al C_l experimental. El C_l máximo es 1.7 para un alfa de 18° . Para ángulos mayores el perfil entra en pérdida. La curva de C_l es simétrica con un valor de 0° para C_l nulo.

$Re=9 \times 10^6$: el rango de variación del coeficiente es mayor que el rango de variación del coeficiente experimental. La pérdida de sustentación está en un ángulo de 19° para un C_l máximo de 1.8. El perfil es simétrico y la sustentación nula se alcanza para un alfa de 0° .

De la comparación entre curvas experimentales y calculadas, se puede establecer que para NACA 0009 los C_l calculados sobrestiman levemente los valores extremos. Las curvas son simétricas con un alfa de cero para sustentación nula. El ángulo de pérdida de sustentación para los tres valores de Re es mayor a los experimentales.

NACA 2412 (figura 2.31): El rango de alfa se encuentra dentro de $(-18^\circ; 20^\circ)$. C_l toma valores entre $(-1.1; 1.7)$, siendo 1.7 el máximo valor para un alfa de 16° . Los perfiles son asimétricos y alfa para la sustentación nula es -2° .

Valores calculados con el software Qblade, **Figura 2.34 (b)**

$Re=3.1 \times 10^6$: los valores de C_l están en el intervalo $(-1,6; 1,8)$, y la pérdida de sustentación ocurre en un alfa de 19° . La curva es asimétrica y en un alfa de -2° se encuentra el C_l nulo.

$Re=5.7 \times 10^6$: C_l está comprendido entre $(-1,6; 1,9)$ y tiene un comportamiento asimétrico con un valor de alfa de -2° para C_l cero. La pérdida de sustentación se produce en un ángulo de ataque de 20° .

$Re=8.9 \times 10^6$: los valores de C_l se encuentran en el $(-1,7; 1,9)$. la pérdida de sustentación ocurre para ángulos mayores a 20° . El perfil es asimétrico y C_l es nulo para un alfa de -2° .

En las curvas de C_l del perfil NACA 2412, los valores extremos son mayores a los medidos. La sustentación nula se presenta en -2° , acorde con las mediciones, pero los ángulos de pérdida de sustentación están sobrestimados (**Figura 2.34**).

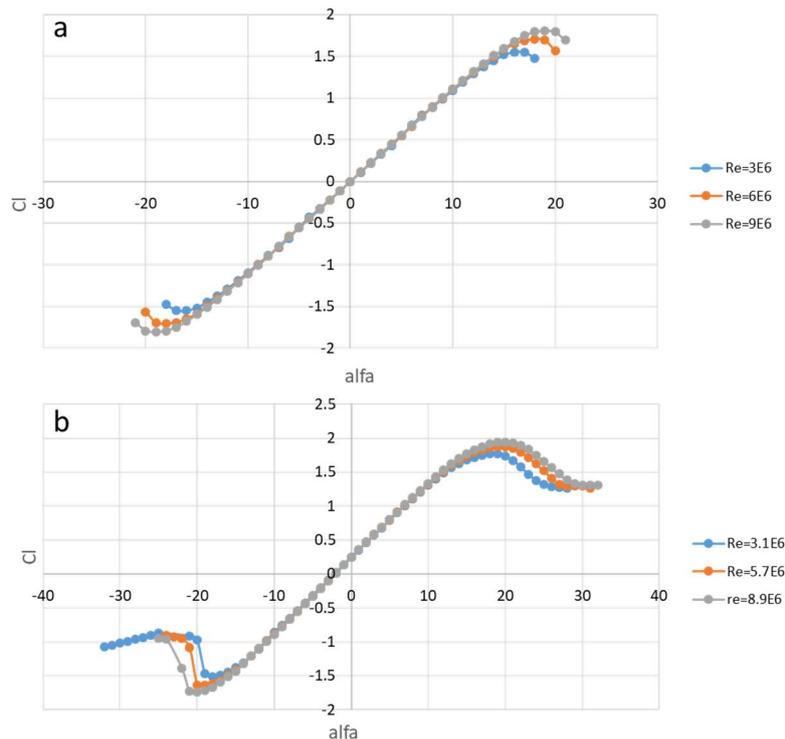


Figura 2.34. Curva de C_l sobre ángulo de ataque, (a) NACA 0009, (b) NACA 2412, para diferentes valores de Reynolds.

Coefficiente de arrastre: C_d

Las curvas experimentales para este coeficiente se presentan en función del coeficiente de sustentación.

NACA 0009 (**Figura 2.31**) el rango de C_d donde se presenta la información es (-1.1; 1.3) y el mínimo de C_d es de 0.005 en $C_l=0.0$ para todos los valores de Re. En general, es posible distinguir valores extremos diferentes según el valor de Re: C_d máximo de 0.16 para Re de 3×10^6 y 0.12 para el resto de Re.

Valores calculados con el software Qblade, **Figura 2.35 (a)**

$Re=3 \times 10^6$: el rango de C_d operacional es (-1.5; 1.2) aproximadamente. El mínimo de C_d es de 0.004 para $C_l=0.0$. el máximo valor de C_d es 0.0064 para $C_l=-1.4$ y 1.4.

$Re=6 \times 10^6$: el intervalo de C_d es (-1.7; 1.7) aproximadamente. El mínimo de C_d es de 0.004 para $C_l=0.0$; el máximo valor de C_d es 0.007 para $C_l=-1.5$ y 1.5.

$Re=9 \times 10^6$: el C_l está contenido dentro del rango (-1,8; 1,8). El mínimo de C_d es de 0.004 para $C_l=0.0$. el máximo valor de C_d es 0.007 para $C_l=-1.6$ y 1.6.

NACA 2412 (**Figura 2.31**): las curvas experimentales según Abbott Ira and Von Doenhoff Albert (1959) muestran que el rango de C_d operacional es (-1.0; 1.6) aproximadamente y son asimétricas, con un mínimo C_d común de 0.005 para $C_l=0.4$. Es posible distinguir valores de C_d máximos entre las curvas, a diferencia del valor mínimo: para $Re=3.1 \times 10^6$, el máximo de C_d es 0.23 para $C_l=1.5$ y para los otros dos valores de Re el máximo de C_d es 0.19 para $C_l=1.6$.

Valores calculados con el software Qblade, Figura 2.35 (b)

$Re=3.1 \times 10^6$: los valores de C_d extremos son -1.5 y 1.7. el valor mínimo es de 0.005 para $C_l=0.0$. y el máximo se alcanza en $C_d = 0.38$ para $C_l=-1.0$.

$Re=5.7 \times 10^6$: el intervalo de C_d operacional es (-1.6; 1.8) El valor máximo es de 0.36 para $C_l=1.2$ y el mínimo de C_d es de 0.005 para $C_l=0.0$.

$Re=8.9 \times 10^6$: los valores de C_l extremos son -1.7 y 1.9. el valor mínimo es de 0.005 para $C_l=0.0$, y el máximo se alcanza en 0.35 para C_l de 1.3.

En el perfil NACA 0009, las curvas de C_d vs. C_l calculadas reproducen el comportamiento de las curvas experimentales, con un mínimo de C_d de 0.005 en C_l cero. Para el caso del perfil NACA 2412, los valores calculados mínimos coinciden con las observaciones, con la diferencia que para los primeros el mínimo se presenta en un C_l nulo y en las observaciones, el mínimo se sitúa en C_l de 0.4 para todos los Re. **Figura 2.35.**

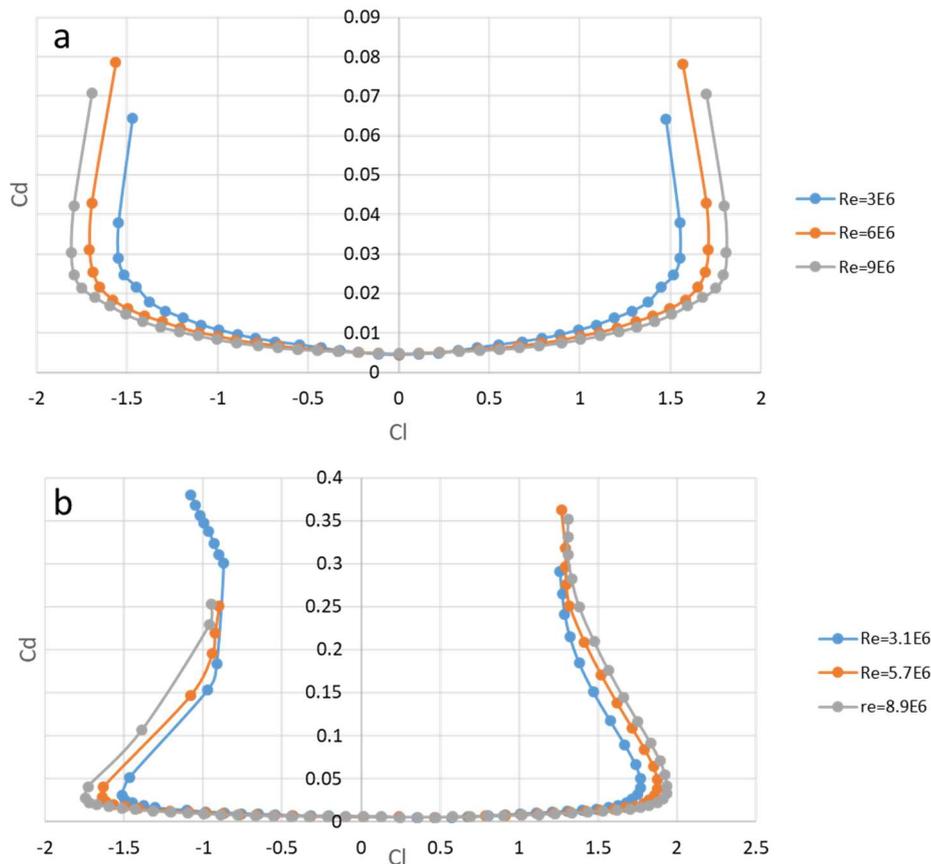


Figura 2.35. Curva de C_d sobre C_l , (a) NACA 0009, (b) NACA 2412, para diferentes valores de Reynolds.

Los coeficientes calculados con el software Qblade representan bien las variaciones y el comportamiento de las curvas experimentales presentadas en el libro de Abbott and Von Doenhoff (1959). Las diferencias entre los ángulos de pérdida de sustentación medidos y calculados son mínimas. Por lo expuesto en esta sección, los valores de los coeficientes hidrodinámicos calculados con el software son considerados apropiado (**Figura 2.32**).

El software Qblade permitió calcular los coeficientes hidrodinámicos (C_l , C_d , y c_{pr}) de los perfiles de trabajo considerados según cada sitio. Los valores de Re del flujo se muestran en la **Tabla 2.4**, para una cuerda geométrica de 0.12 m y para una viscosidad del agua de mar a 15°C.

Tabla 2.4. Número de Reynolds (Re) según la velocidad media de cada sitio.

Lugar	Velocidad media (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Re
Golfo Nuevo	2	3.4	1.27504x10 ⁻⁰⁶	1.88x10 ⁺⁰⁵
Golfo San José	2.64	4	1.27548x10 ⁻⁰⁶	2.48x10 ⁺⁰⁵
Río Chubut Canal	2	3.27	1.27770x10 ⁻⁰⁶	1.88x10 ⁺⁰⁵
Leones	2.57	2.57	1.27548x10 ⁻⁰⁶	2.42x10 ⁺⁰⁵

El coeficiente de momento (C_m) representa el momento de torsión en la pala. Las turbinas mareomotrices presentan una relación de aspecto considerablemente menor que las turbinas eólicas, en las cuales el largo de la pala puede llegar a ser mayor a 30 m, dependiendo del diseño y tipo de máquina. Para la dimensión del rotor planteado y las fuerzas en juego, se desprecia la deformación que podría soportar la pala, (efecto del coeficiente de momento en la rigidez estructural), por lo cual el C_m no juega un papel crucial en el proceso de diseño (Grasso, 2012). Las **Figuras 2.36-2.39** y la **Tabla 2.5**, muestran los coeficientes hidrodinámicos según los sitios elegidos.

Tabla 2.5. Coeficientes característicos, y ángulos de ataque de trabajo y de pérdida de sustentación.

Sitio	Perfil	Cl/Cd máx.	α opt. (°)	Cd	α pérdida sustentación (°)	Cl máx.
Golfo Nuevo	2406	66.05	3	0.0087	9	0.98
	2409	66.93	5	0.01167	10	1.17
	2412	65.68	6	0.014	14	1.32
Golfo San José	2406	71.1	3	0.008	9	0.97
	2409	71.07	5	0.011	11	1.21
	2412	70.3	6	0.013	14	1.33
Rio Chubut	2406	65.90	3	0.00872	9	0.98
	2409	66.81	5	0.01169	10	1.17
	2412	65.56	6	0.0136	14	1.32
Canal Leones	2406	73.01	3	0.0078	8	0.97
	2409	72.71	5	0.01073	11	1.20
	2412	72.20	6	0.01235	15	1.33

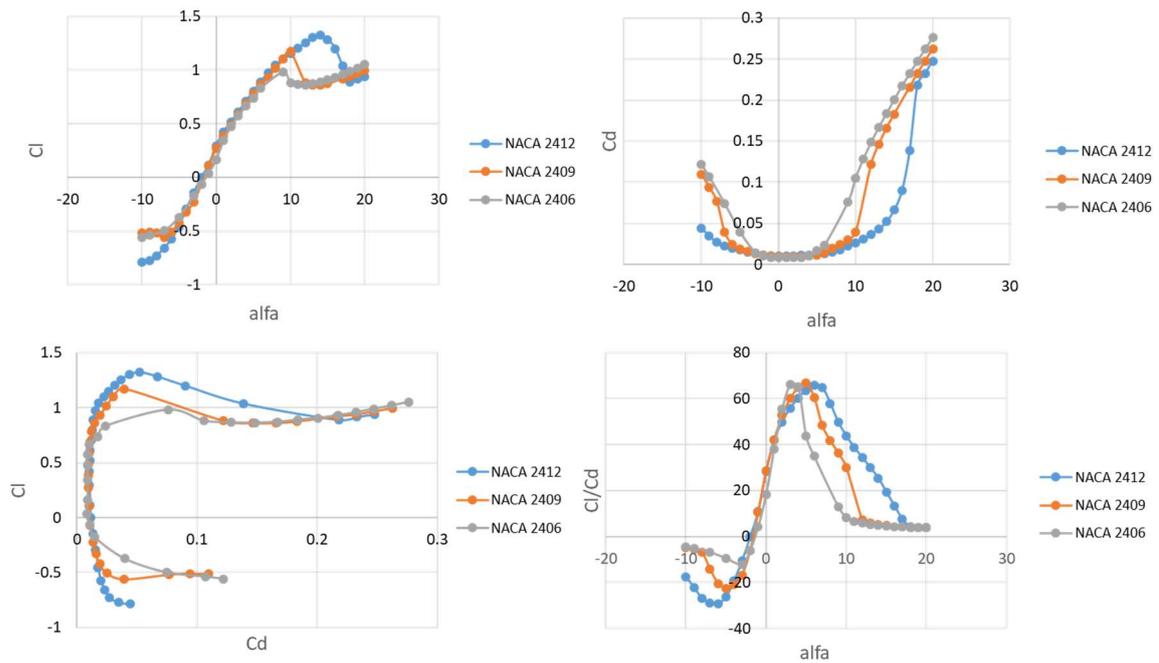


Figura 2.36. Curvas características para el Golfo Nuevo, para diferentes perfiles.

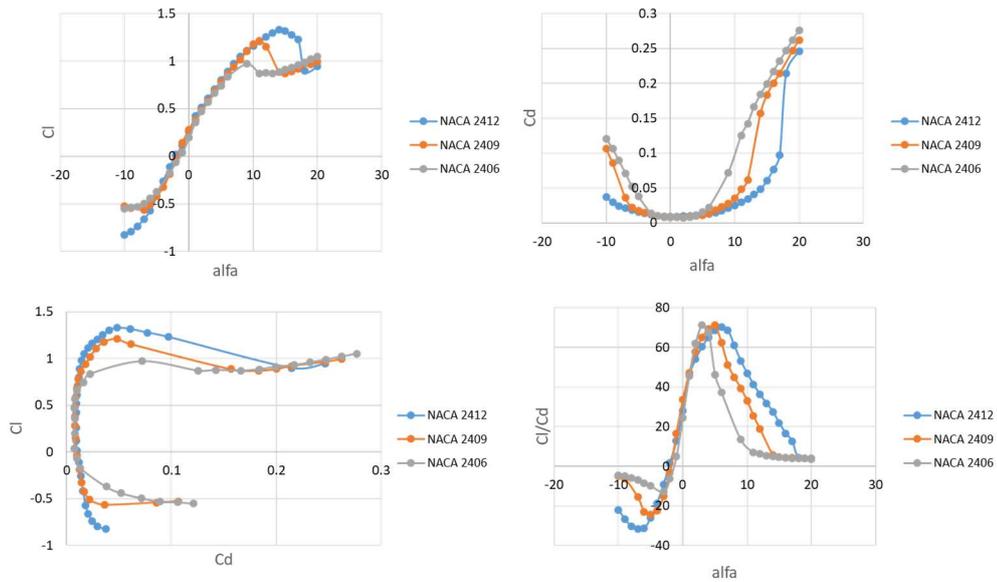


Figura 2.37. Curvas características para el Golfo San José, para diferentes perfiles.

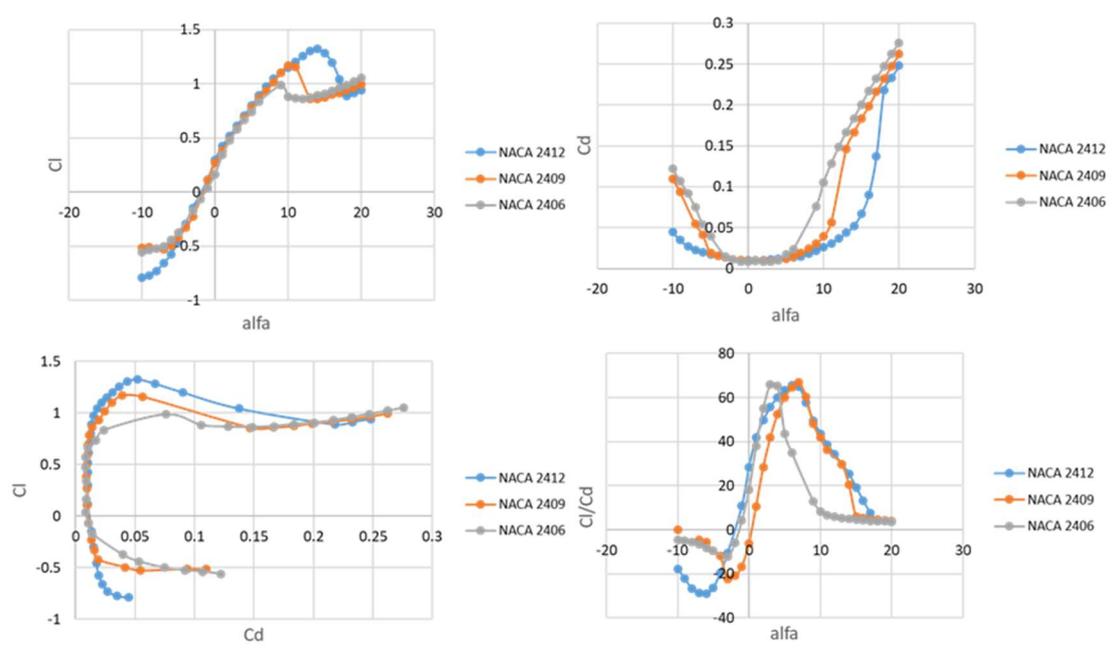


Figura 2.38. Curvas características para la desembocadura del Río Chubut, para diferentes perfiles.

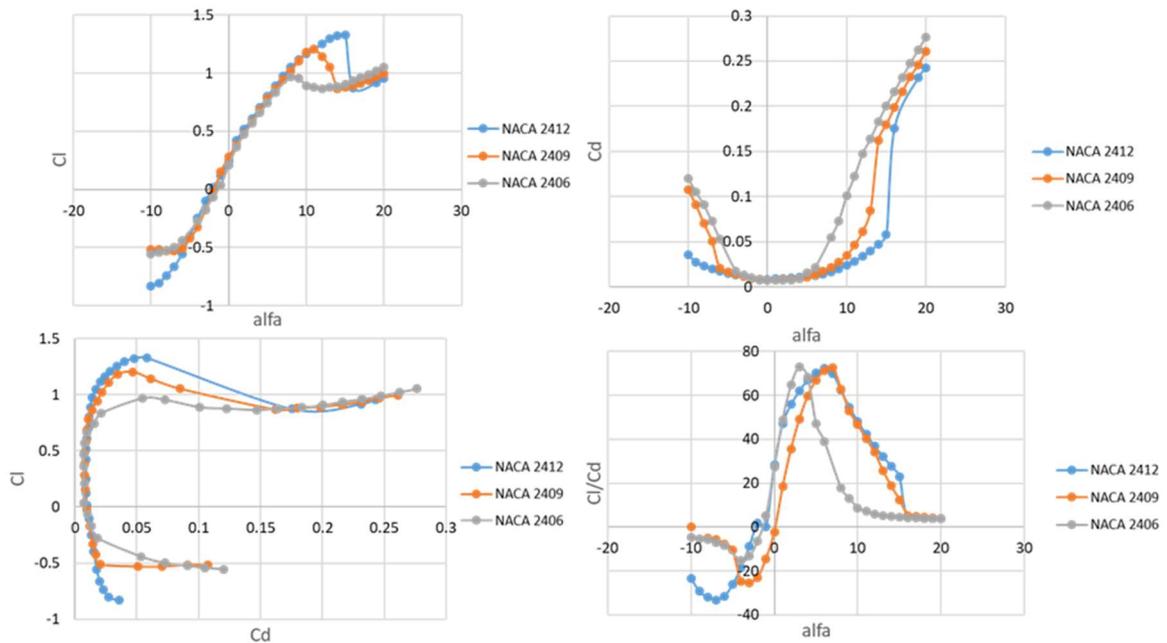


Figura 2.39. Curvas características para Canal Leones, para diferentes perfiles.

En cada sitio seleccionado y para todos los perfiles analizados, el ángulo de trabajo (óptimo) se encuentra en la zona lineal de la curva de C_l en función del ángulo de ataque, lejos de la zona donde el perfil pierde sustentación, condición que asegura la estabilidad hidrodinámica del mismo. Los valores de Re fueron similares, según la velocidad de diseño en cada sitio. Dado que la hélice se encuentra confinada en un tubo con solo el margen necesario para que estas giren libremente sin rozamiento, el efecto de punta de pala es eliminado, pueden adoptarse los valores bidimensionales que calcula el software Qblade, como válidos a los fines de diseño.

2.3.6. Velocidad crítica de rotación- análisis de cavitación

El fenómeno de cavitación en las puntas de aspa impuso un límite sobre la velocidad rotacional de las aspas. Los cálculos de las velocidades críticas de rotación se efectuaron con los coeficientes de presión calculados por el software Qblade, la definición de velocidad crítica de cavitación (2.16), velocidad promedio y velocidad máxima que alcanzan las corrientes mareales en cada lugar. De esta manera se asegura que el perfil no entre en cavitación en ningún momento de funcionamiento. Los cálculos se efectuaron considerando la punta de la pala a 1 m de profundidad, en posición vertical. Si el prototipo de rotor es puesto a una mayor profundidad, la presión local es mayor, y luego, los límites por cavitación son mayores: la velocidad crítica y rotacional de diseño aumentan con la profundidad, teniendo de esta manera una estimación conservativa con más margen de operación, y no se compromete la estructura por daños de cavitación si se desea instalar el dispositivo a mayores profundidades. Se presentan en la **Tabla 2.6** las

velocidades rotacionales de diseño, TSR y revoluciones por minuto (n) para cada sitio, considerando el perfil NACA 2412, (elegido como el perfil de trabajo dado que es el que produce mayor potencia, sección 2.3.7.1).

Tabla 2.6. Velocidad rotacional de diseño y TSR para cada sitio, (perfil 2412).

Sitio	Ω_d (1/s)	Velocidad (m/s)	TSR	n (RPM)
Golfo Nuevo	14.02	2	4.72	134
Golfo San José	13.64	2.64	3.48	130
Rio Chubut	14.11	2	4.76	135
Canal Leones	14.36	2.57	3.77	137

Es importante notar que, en el caso del CL, la velocidad rotacional de diseño fue calculada con el único valor de velocidad disponible en la carta náutica correspondiente del SHN. Esto podría representar un problema que debe tenerse en cuenta cuando se construya el rotor para este sitio, debido a que la velocidad rotacional de diseño planteada de este modo podría ser muy distinta a la velocidad que realmente podría girar la hélice para evitar este efecto.

Varios autores han tenido en cuenta este efecto abordado de diferentes maneras. Por ejemplo, Batten *et al.*, (2006, 2008) realizaron curvas de variación del coeficiente de sustentación en función de sigma implementando la teoría BEM y definieron una región o envolvente libre de cavitación, limitando de esta manera el C_l de operación. Con esta información, determinaron la forma de la sección, la cuerda y la torsión local, minimizando o evitando la cavitación, con un TRS de 4,3 y 6 respectivamente. Da Silva *et al.*, (2015) aplicaron el concepto de velocidad crítica de cavitación como en este trabajo, pero su análisis fue diferente: los autores reemplazaron en las ecuaciones de la teoría BEM, la velocidad relativa del flujo por esta expresión de velocidad crítica en el proceso de construcción de la pala, obteniendo un TSR de 7,3. Coiro *et al.*, (2006) resolvieron el problema de cavitación diseñando una nueva hidropala (GT1) con bajo número de cavitación y TSR de 3,5. El proceso de construcción de la pala no fue tenido en cuenta en este trabajo, por lo tanto, se debió aplicar una forma alternativa de cálculo para minimizar o evitar la cavitación, y se optó por limitar la velocidad rotacional de las palas. Este límite puede ser controlado con el generador del sistema. Los TSR obtenidos en este trabajo (**Tabla 2.6**), son comparables con los de los otros autores, existiendo diferencias mínimas, acordes con el desempeño presentado para los molinos de tres palas (**Figura 2.19**) y contenidos dentro del intervalo de los valores presentados por Voneschen, (1989).

2.3.7. Geometría de la pala

La forma y tamaño de la pala tiene una alta influencia sobre la potencia que puede extraerse de un rotor. El análisis de los parámetros geométricos fue un proceso dinámico iterativo (diseño por análisis), donde se probaron diferentes configuraciones y combinaciones para determinar la forma, tamaño y perfil.

La teoría del elemento de pala establece un proceso para componer la pala óptima según la velocidad del fluido, siendo la forma óptima aquella capaz de captar la máxima energía del flujo. Según estos pasos, se determinan las cuerdas de cada perfil en función del radio, TSR, perfil elegido, cantidad de palas, del ángulo de paso de cada perfil y la velocidad incidente, que se supone constante. En este trabajo se optó por no optimizar la forma de la pala dado que el fluido de trabajo es altamente variable; la dinámica de las mareas en proximidad de las costas es compleja, con velocidades del fluido no uniformes en intensidad y dirección, por lo tanto, las condiciones de contornos del problema cambian constantemente según la marea. Además, en el proceso de optimización, las cuerdas de los perfiles no siguen una forma lineal. En su lugar, se planteó una pala con distribución de cuerda lineal de valor 0.15 m para el perfil raíz y que disminuye a 0.1 m para el perfil punta de pala, con una cuerda geométrica de 0.12 m (**Figura 2.40**). La simplificación de suponer una pala trapezoidal con variación lineal de cuerda es más fácil de construir, con un costo menor frente a la pala con variación no lineal de cuerda propuesta por la teoría. Batten *et al.*, (2006) también hicieron la misma suposición y asumieron una cuerda con distribución lineal. Por su parte, Coiro *et al.*, (2006), también asumieron una cuerda con distribución lineal y mediante estudios numéricos de desempeño de turbinas concluyeron que la diferencia entre la cuerda óptima y la lineal era insignificante. Ismail *et al.*, (2023) mediante el método BEM estudiaron diferentes perfiles y los resultados mostraron que el alabeo con distribución lineal tenía más alto desempeño frente a otras configuraciones.

2.3.7.1. Elección del perfil hidrodinámico

Se estimaron las potencias que se podrían extraer de diferentes palas trapezoidales formadas por los tres tipos de perfiles convencionales: NACA 2412, 2409 y 2406, para un flujo de velocidad nominal 2 m/s y velocidad máxima 3.4 m/s, (**Tabla 2.7**). El perfil 2412 fue elegido como el perfil de trabajo dado que es el que produce mayor potencia.

Tabla 2.7. Potencia según el perfil alar.

Perfil	alfa óptimo (°)	Ωd (1/s)	Potencia (w)
2412	6	14.02	1673.4
2409	5	13.91	1446.4
2406	3	16.9	1521.1

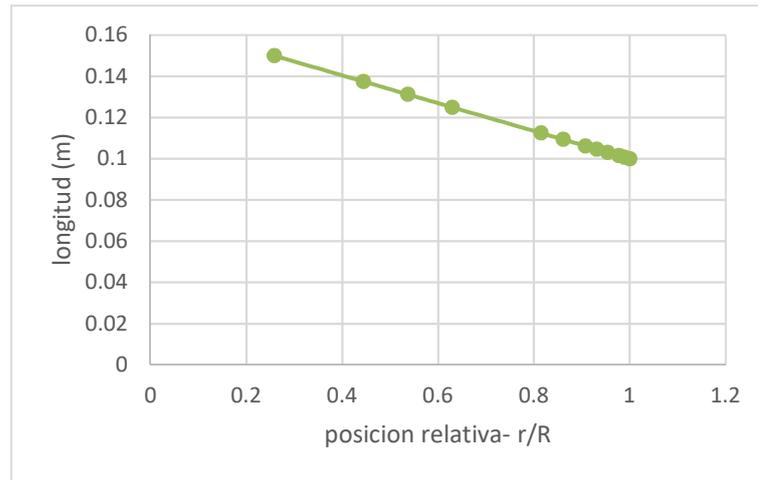


Figura 2.40. Distribución de cuerda a lo largo de la pala (posición relativa, r/R). Se asume una variación lineal entre perfil raíz y punta de pala.

2.3.7.2. Evaluación de la cantidad de segmentos en que se divide la pala

Según el método propuesto (BEM), la pala del rotor es dividida en segmentos, y en cada uno de ellos, las fuerzas hidrodinámicas son aplicadas de igual modo. De esta manera, se estudia cómo cambia la potencia del rotor según la cantidad de segmentos en que es dividida la pala. Los segmentos evaluados no tuvieron una distribución uniforme sobre la pala, sino que se aplica una configuración de mayor detalle hacia la punta del ala (**Figura 2.40**). Se muestran los resultados para una velocidad de diseño de 2 m/s y el perfil NACA 2412.

Tabla 2.8. Potencia de la pala según cantidad de segmentos.

Cantidad de segmentos	Potencia (W)
7	1673.0
9	1673.1
12	1673.4
14	1673.4
16	1673.4

La potencia estimada no varía significativamente con la cantidad de segmentos en que se divide la pala (**Tabla 2.8**). La misma se mantiene constante al aumentar el número de segmentos. Para la modelización realizada con un número de segmentos igual o mayor a 7, los valores convergen sin que se observen variaciones. Se decide trabajar con un modelo de pala dividida en 12 puntos.

2.3.7.3. Análisis de la forma de la pala

La forma de la pala tiene incidencia sobre la potencia por ser proporcional al área de la misma según la teoría. Se plantearon tres formas diferentes de pala y se evaluaron las potencias en cada caso. Las tres formas alternativas fueron:

Caso 1) Pala plana de cuerda constante igual a 0.15 m.

Caso 2) El borde de fuga de la pala varía de forma lineal entre los valores de cuerda 0.15 m para el perfil raíz y 0.1 m de longitud de cuerda para el perfil punta de pala.

Caso 3) El borde de ataque y el borde de fuga varían de forma lineal, constituyendo una pala de forma trapezoidal. En este caso también se consideró la posición del centro de presión del perfil, que, para los tipos NACA de cuatro dígitos, está ubicado a 25 % de la cuerda. El centro de presiones (CP) se refiere al punto sobre la pala donde se considera aplicadas las fuerzas y este debe estar alineado en el mismo plano para evitar que se produzcan torsiones que podrían alterar los ángulos de diseño por falta de rigidez torsional. Los valores de las cuerdas son los mismos que en el caso 2. El 25 % de la cuerda raíz es (25 % 0.15m) =0.0375 y 25 % cuerda punta (25 % 0.1m) =0.025.

Tabla 2.9. Potencia de la pala según su forma.

Forma de la pala	Potencia (w)	Superficie alar (m ²)	Densidad de Potencia (W/m ²)
1	2077.5	0.075	27700
2	1713.6	0.063	27200
3	1673.4	0.062	26990.3

Como no se consideraron los efectos de puntera de pala (3D), la pala plana tiene mayor potencia al tener una mayor superficie alar (**Tabla 2.9**). Una pala de este tipo presenta mayor resistencia estructural (mayor rigidez), importante en la raíz de la pala que es la zona que soporta las mayores cargas, pero tiene un mayor peso, y menor rendimiento. Desde el punto de vista hidrodinámico, una pala más fina (perfiles con menor cuerda) hacia la punta tiene mayor eficiencia. Por lo tanto, la pala del caso 2 sería más apropiada. Se adopta como mejor solución la pala trapezoidal con la línea al 25 % de la cuerda perpendicular al eje de rotación dado que, si bien reduce en algo la superficie respecto a la pala recta o es más compleja su construcción respecto a la propuesta 2, la forma de construcción reduce los efectos del momento hidrodinámico de cabeceo, no provocando torsión en la pala y dando por resultado un mejor comportamiento y distribución de cargas, (**Figura 2.41**). Esta configuración minimiza los vórtices remanentes de puntera de pala, los cuales no fueron tenidos en cuenta en el diseño por utilizar la hélice entubada (para evitar la fricción de roce, debe existir una luz, y a través de esta, algún vórtice podría filtrarse). Esta elección será importante para la construcción del dispositivo.

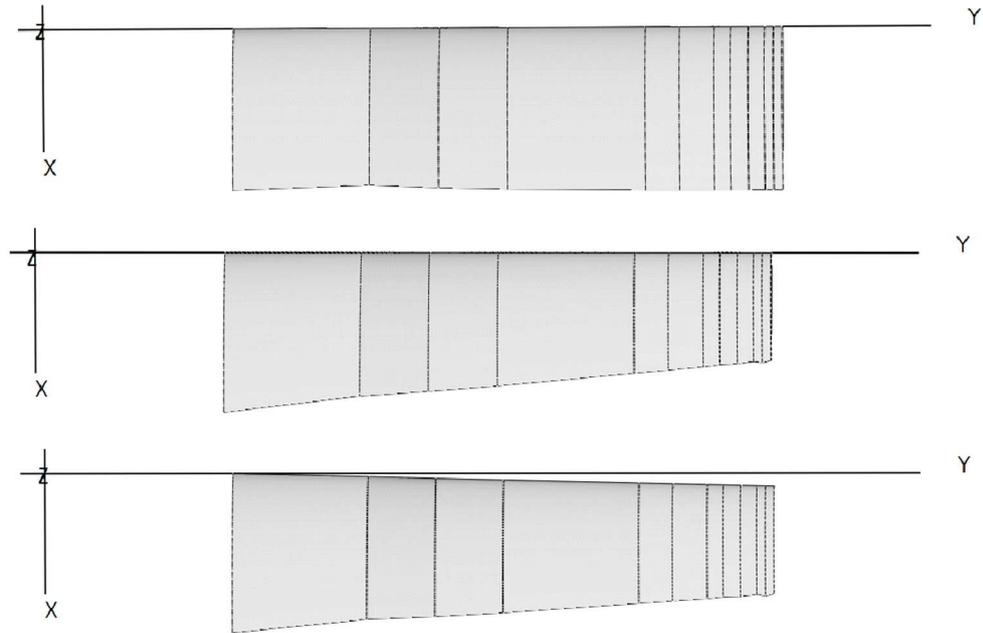


Figura 2.41. Tipos de pala: 1) plana de cuerda constante 0.15m 2) lineal 3) lineal considerando posición del centro de presión.

2.3.8 Condición de arranque y torsión de la pala

Por sencillez se planteó que el mecanismo de arranque de la turbina no esté controlado y se efectúe sin carga sobre el eje (eje libre) y que la misma vaya aumentando en la medida que el eje comience a rotar a la velocidad de diseño. Para satisfacer dicho requerimiento se adoptó como solución que la zona de la raíz de pala hasta un 10 % de su envergadura, tenga los ángulos necesarios para generar la cupla de arranque al momento que incide la corriente. Como la pala es de 0,5 m de longitud, el arranque sólo es función del perfil raíz, que será el que aporte el torque necesario para comenzar el giro. En el arranque, la velocidad angular es nula, imponiendo la condición de que el ángulo del flujo sea $\Phi=90^\circ$. Para que la fuerza sea la necesaria para comenzar a rotar, debe ser la mayor posible, por lo tanto, el ángulo de ataque debe ser el que aporte la sustentación máxima. Para asegurarse que el perfil no se encuentre en el punto de pérdida de sustentación, que constituye una zona inestable, donde un leve aumento del ángulo de ataque resultaría en una pérdida brusca del C_l , se toma un 10 % del ángulo de pérdida de sustentación. El alabeo del resto de la pala se obtiene calculando los ángulos phi del triángulo de velocidades (**Figura 2.8**) para la velocidad del flujo (V), posición en la pala (r) y la velocidad angular (Ωd).

$$\Phi = \arctg\left(\frac{v}{\Omega d r}\right) \quad (2.39)$$

$$\Phi = \alpha_{p\acute{e}rdida} + \mu p = 90^\circ \quad (2.40.a)$$

$$\Phi = \alpha_{opt} + \mu \quad (2.40.b)$$

$$\mu = \Phi - \alpha_{opt} \quad (2.40.c)$$

donde μ_p es la torsión del perfil raíz y μ es la torsión para el resto del álabe, calculado una vez alcanzada la velocidad rotacional de diseño. Existen otros métodos para el arranque de la rotación de las palas tales como: que el generador actúe como motor para llevar a la hélice a su velocidad de rotación óptima, (esta forma de arranque se debe analizar cuando se determine el tipo de generador a utilizar), punta de pala con ángulo de ataque variable (alergones o *flaps*), o la hélice con paso variable o *blade pitch*, (que en el agua tendría problemas de sellado), todos estos aumentan los costos y la complejidad de diseño.

2.3.8.1. Relación entre mecanismo de arranque y potencia

Para que la pala comience a girar, se optó por un mecanismo de arranque simple dado por una torsión particular del perfil raíz de la pala antes descrito. En condiciones de funcionamiento (velocidad angular no nula) este perfil no aportará cupla que se suma a la potencia generada debido a su ángulo de torsión particular, que no se corresponde con el ángulo de ataque óptimo. De todas maneras, según Voneschen, (1989) la potencia que suministra esta sección de pala no es significativa (anexo IV). De acuerdo con el autor, la zona exterior de las palas aporta la mayor parte de la potencia del rotor, mientras que la mitad interior de las mismas sólo aporta un 25 %. Es importante entonces que la mitad exterior de las palas sea diseñada del modo más óptimo posible, mientras que la pérdida del suministro de potencia del perfil raíz fue considerado despreciable.

2.3.8.2. Distribución del ángulo de torsión o alabeo

La distribución del alabeo de las aspas se realizó acorde la relación de velocidades y ángulos de trabajo planteadas según ecuación 2.5. Se consideró el perfil de trabajo NACA 2412. Las tablas y figuras a continuación muestran los ángulos de trabajo y torsión para cada lugar.

Tabla 2.10. Ángulos de trabajo y torsión para Golfo Nuevo.

Segmento	Posición relativa (cm)	Posición absoluta (m)	$v/\Omega_d r$	$\Phi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\mu(^{\circ})$
1	0	0.17	0.82	90.00	12.60	77.4
2	12.5	0.30	0.48	25.51	6.00	19.51
3	18.75	0.36	0.39	21.53	6.00	15.53
4	25	0.42	0.33	18.60	6.00	12.60
5	37.5	0.55	0.26	14.57	6.00	8.57
6	40.62	0.58	0.24	13.81	6.00	7.81
7	43.75	0.61	0.23	13.13	6.00	7.13
8	45.3	0.63	0.22	12.82	6.00	6.82
9	46.87	0.64	0.22	12.51	6.00	6.51
10	48.44	0.66	0.21	12.23	6.00	6.23
11	49.22	0.67	0.21	12.09	6.00	6.09
12	50	0.68	0.212	11.95	6.00	5.95

Tabla 2.11. Ángulos de trabajo y torsión para Golfo San José.

Segmento	Posición relativa (cm)	Posición absoluta(m)	$v/\Omega_d r$	$\Phi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\mu(^{\circ})$
1	0	0.17	1.112	90.00	12.60	77.4
2	12.5	0.30	0.64	32.92	6.00	26.92
3	18.75	0.36	0.53	28.16	6.00	22.16
4	25	0.42	0.45	24.54	6.00	18.54
5	37.5	0.55	0.35	19.42	6.00	13.42
6	40.62	0.58	0.33	18.45	6.00	12.45
7	43.75	0.61	0.32	17.56	6.00	11.56
8	45.31	0.63	0.31	17.15	6.00	11.15
9	46.87	0.64	0.30	16.76	6.00	10.76
10	48.44	0.66	0.29	16.38	6.00	10.38
11	49.22	0.67	0.29	16.20	6.00	10.20
12	50	0.68	0.28	16.02	6.00	10.02

Tabla 2.12. Ángulos de trabajo y torsión para Río Chubut.

Segmento	Posición relativa (cm)	Posición absoluta (m)	$v/\Omega_d r$	Φ (°)	α (°)	μ (°)
1	0	0.17	0.81	90	12.6	77.4
2	12.5	0.30	0.47	25.36	6	19.36
3	18.75	0.36	0.39	21.41	6	15.41
4	25	0.42	0.33	18.48	6	12.48
5	37.5	0.55	0.26	14.48	6	8.48
6	40.62	0.58	0.24	13.73	6	7.73
7	43.75	0.61	0.23	13.05	6	7.05
8	45.31	0.63	0.23	12.74	6	6.74
9	46.87	0.64	0.22	12.44	6	6.44
10	48.44	0.66	0.21	12.15	6	6.15
11	49.22	0.67	0.21	12.01	6	6.01
12	50	0.68	0.21	11.88	6	5.88

Tabla 2.13. Ángulos de trabajo y torsión para Canal Leones.

Segmento	Posición relativa (cm)	Posición absoluta (m)	$v/\Omega_d r$	Φ (°)	α (°)	μ (°)
1	0	0.17	0.8	90	13.5	76.5
2	12.5	0.30	0.46	24.98	6	18.98
3	18.75	0.36	0.38	21.07	6	15.07
4	25	0.42	0.33	18.18	6	12.18
5	37.5	0.55	0.25	14.24	6	8.24
6	40.62	0.58	0.24	13.5	6	7.5
7	43.75	0.61	0.23	12.83	6	6.83
8	45.31	0.63	0.22	12.52	6	6.52
9	46.87	0.64	0.21	12.23	6	6.23
10	48.44	0.66	0.21	11.94	6	5.94
11	49.22	0.67	0.21	11.81	6	5.81
12	50	0.68	0.21	11.68	6	5.68

El alabeo (μ) de la pala, en cada sitio, fue calculado según la velocidad rotacional de diseño y ángulos de ataque óptimos para cada segmento a lo largo de la pala, excepto en la raíz. La forma final de la pala quedó establecida como una combinación entre los ángulos de diseño (*twist*, μ) para los segmentos comprendidos entre el segundo y punta de pala y la torsión del perfil raíz fue diseñada de forma tal que aporte la cupla necesaria para que el rotor comience a girar libremente (sin carga). Con esta condición, la pala fue diseñada de manera que el 90 % aporte potencia y el 10 %, el perfil raíz, sólo sea útil en el arranque del giro. Sin embargo, se mostró que la primera parte de la pala aporta poco a la potencia y que la misma está dada principalmente por los perfiles de la punta, (Voneschen, 1989). Luego, no se producirían cambios significativos en la potencia por el mecanismo de arranque utilizado. Como resultado, la elección del método de arranque impuso una fuerte variación en la torsión de la pala. Las mismas se graficaron con el software Qblade (**Figuras 2.42-2.45**). El alabeo geométrico de la

pala es para asegurar que todos los perfiles reciban el flujo con el mismo ángulo de ataque de diseño, que en este trabajo se escogió el ángulo con la mejor relación C_l/C_d (fineza máxima) o ángulo óptimo; de no aplicarse el *twist* habría un desequilibrio de las cargas comprometiendo la integridad de la pala.

Esquemas geométricos de las palas

Se presentan los esquemas finales de la pala y el rotor para cada sitio, realizados con el software Qblade, en los cuales el perfil raíz fue pintado de rojo. Según estas tablas y los esquemas, las diferencias entre los rotores en los sitios planteados en muy sutil, debido a la similitud entre las velocidades nominales consideradas para los sitios de interés (entre 2-2,6 m/s) y entonces los valores de Re , parámetro necesario para calcular los coeficientes con el software, fueron muy similares, dando como resultados ángulos de ataque óptimos semejantes (**Tabla 2.5**). A su vez, las velocidades rotacionales de diseño, calculadas con los coeficientes de presión (c_{pr}) fueron similares también por el hecho de utilizar los valores de Re descritos (del orden de 10×10^5) (**Tabla 2.4**). Durante la construcción los cambios abruptos de geometría se deberán empalmar mediante curvas suaves que eviten la concentración de tensiones y faciliten el moldeo.

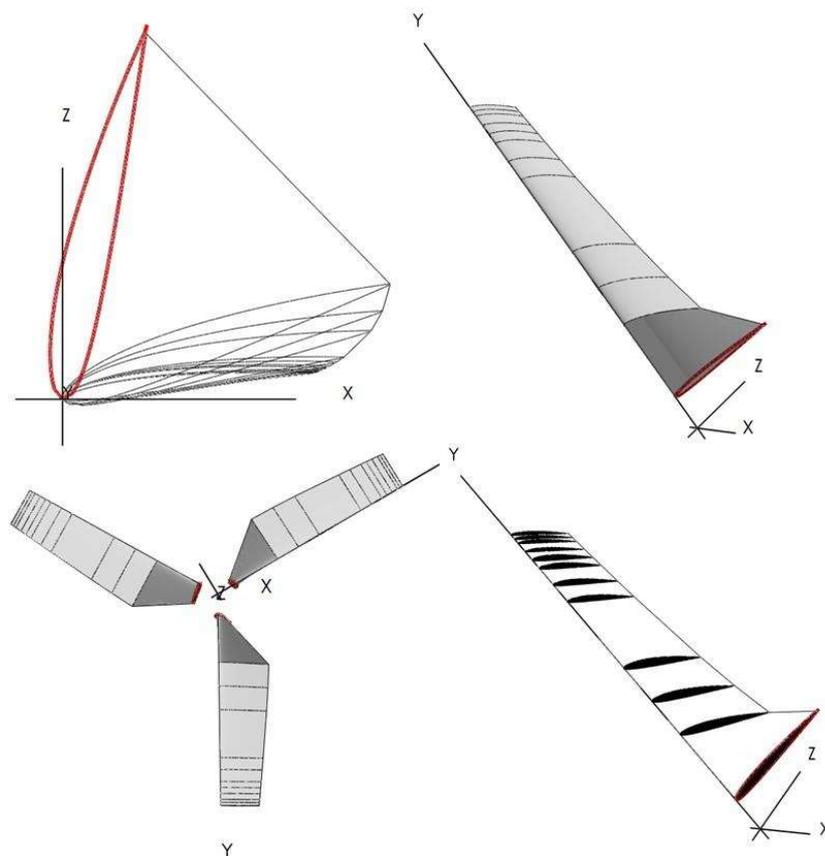


Figura 2.42. Esquema geométrico del rotor para el Golfo Nuevo.

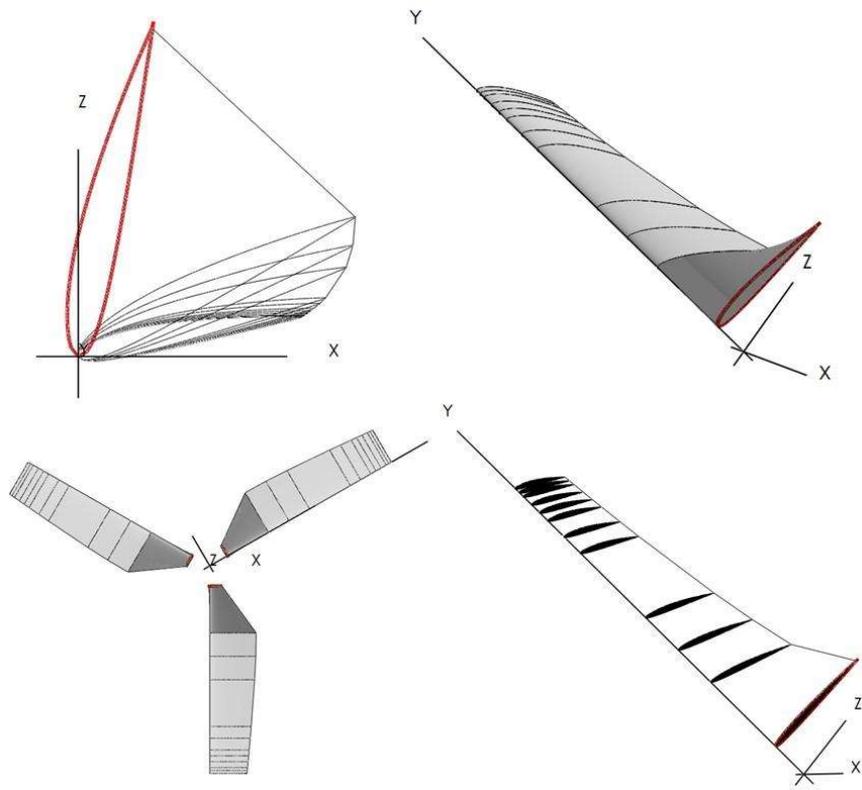


Figura 2.43. Esquema geométrico del rotor para el Golfo San José.

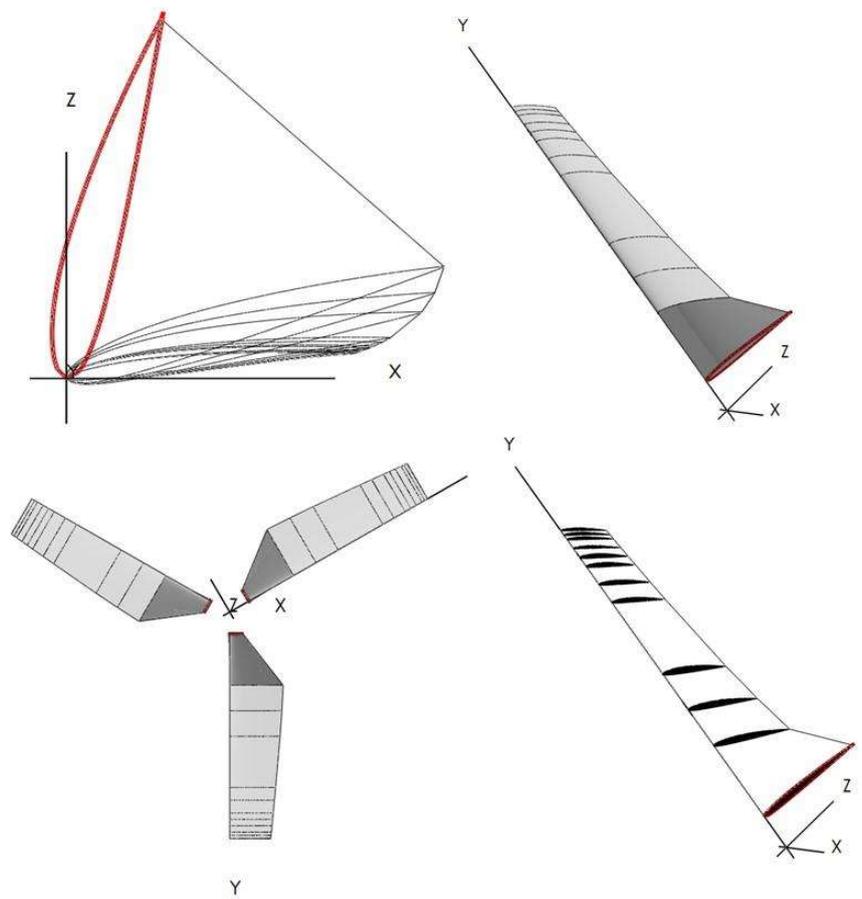


Figura 2.44. Esquema geométrico del rotor para la desembocadura del Río Chubut.

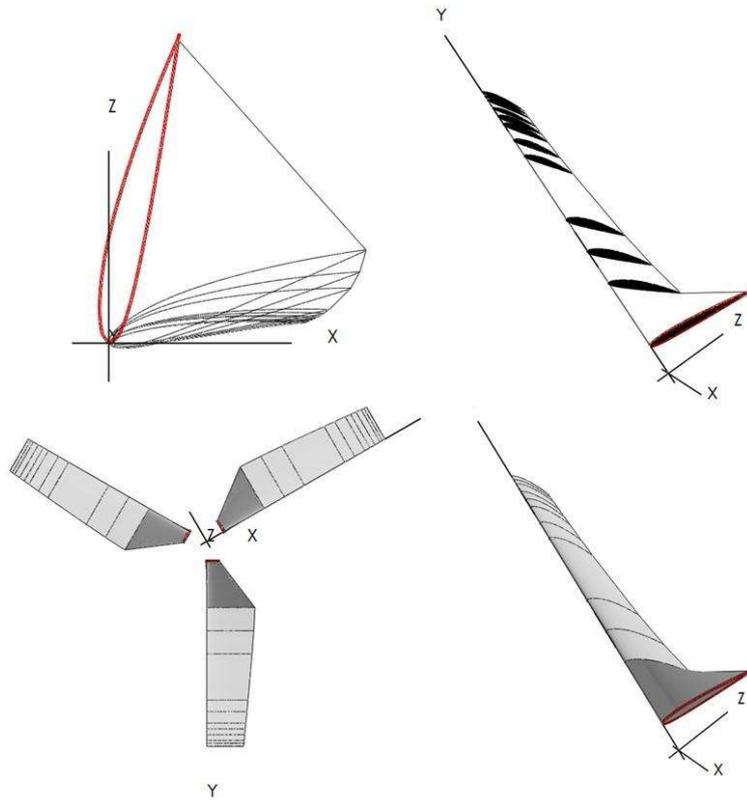


Figura 2.45. Esquema geométrico del rotor para el Canal Leones.

2.3.9 Potencia

2.3.9.1. Estimaciones de potencia

Se realizaron las estimaciones de potencia para palas formadas por diferentes perfiles siguiendo los lineamientos propuestos por la teoría BEM. El cálculo de la potencia se realizó con el software Octave (software libre de simulación compatible con el software Matlab). La tabla reafirma la elección del perfil 2412, que genera la mayor potencia (**Tabla 2.14**).

Tabla 2.14. Estimaciones de potencia según el sitio.

Sitio	Perfil	α opt (°)	Ωd (1/s)	α_s (°)	Potencia (w)
Golfo San José	2412	6	13.6442	14	2229
	2409	5	13.5216	11	1921.3
	2406	3	16.6167	9	2032.4
Golfo Nuevo	2412	6	14.02	14	1673.4
	2409	5	13.91	10	1446.4
	2406	3	16.9	9	1521.1
Rio Chubut	2412	6	14.1068	14	1688.7
	2409	5	13.9902	10	1458.5
	2406	3	16.9698	9	1529.6
Canal Leones	2412	6	14.3591	15	3255
	2409	5	14.2448	11	2817.6
	2406	3	17.2221	8	2695.7

En el GN y RCH se estimaron potencias menores a la de diseño (2200W), siendo el porcentaje de 76 % y 79 % respectivamente. Por el contrario, para GSJ y CL las potencias obtenidas superaron la potencia de diseño, dando un incremento de 1.4% y 48% respectivamente. El motivo de esta potencia extra se podría explicar por el hecho de haber establecido un único largo de pala para una velocidad nominal (2 m/s) menor a la que realmente se presenta en estos lugares. Este resultado es consistente con el hecho que, en el dimensionamiento del rotor, el área de la sección transversal que contiene el rotor se consideró el mismo valor para todos los sitios. Estas velocidades mayores permitirían la construcción de un rotor de menor dimensión para estos sitios. El diseño por análisis empleado en este trabajo impone una serie de planteos iniciales llamados condiciones de contorno e iniciales. Generalmente los primeros resultados no se ajusten a lo esperado, pero permiten acotar o corregir las consideraciones iniciales. Por este motivo, los resultados del modelo de cálculo adoptado para GN y RCH fueron menores a lo esperado. Si el objetivo del diseño es asegurar la potencia planteada, se debiera hacer otro análisis con nuevas condiciones, por ejemplo, aumentando el diámetro del rotor. Las estimaciones de potencia calculadas se consideraron suficientes para el propósito de estudio de plantear un dispositivo de bajo costo preliminar para estudiar el rendimiento y la factibilidad del aprovechamiento de las corrientes de mareas costeras para la generación de energía.

En el sitio de la desembocadura del río, se realizó el cálculo de potencia sin considerar una tobera convergente que acelere el flujo, solo el área necesaria para desprejar efectos de punta. La potencia resultó ser 290 W aproximadamente, con una velocidad de rotación de 12.6 1/s, según el análisis de cavitación, para una velocidad promedio medida de 0.55 m/s, y densidad medida *in situ* de 1023.7 kg/m³. El resultado de implementar la tobera para aumentar la velocidad incidente mostró una mejora notable en la potencia obtenida de 84 %. Gaden and Bibeau, (2010)

utilizando CFD obtuvieron una mejora en la potencia de 58 %, Cardona-Mancilla *et al.*, (2017), también mediante simulación CFD obtuvieron un incremento en la potencia de salida de 4 %, que los autores consideraron insignificante. Estos resultados demuestran la importancia de incluir una tobera para aumentar la velocidad del flujo y luego la potencia. Se debe tener en cuenta que el rendimiento puede ser diferente una vez construido el dispositivo, pues depende del generador que se instale o el efecto de agentes naturales que deformen los perfiles como el *fouling*.

2.3.9.2. Teoría BEM y eficiencia

El método BEM presenta ventajas frente a otras herramientas de análisis como la dinámica de fluidos computacional (CFD, utilizado por ejemplo en el software ANSYS *Fluent*) y/o ensayos experimentales. Entre las mismas se pueden citar, simpleza, rapidez, resultados adecuados, necesidad de recursos computacionales simples y bajo costo de implementación. No obstante, esta teoría sobreestima la eficiencia y potencia de la turbina y carece de información sobre desprendimientos y la circulación dentro de la misma. Además, ignora gran cantidad de efectos relacionados principalmente con la viscosidad y con las características del flujo alrededor de las palas, que es tridimensional y no estacionario; el torque y la potencia estimada en este trabajo fueron para régimen estacionario, no se han considerado los transitorios que puede atravesar la turbina, como por ejemplo en el momento de arranque o la variación intrínseca de las corrientes mareales. Otra limitación del método es que no puede ser utilizado para resolver la influencia del rotor sobre el flujo que lo rodea, o la dinámica de la estela (*wake dynamic*) (Nachtane *et al.*, 2020). Papparazzoa *et al.*, (2018), condujeron experimentos computacionales de modelado del comportamiento del flujo alrededor de las palas bajo la hipótesis de flujo estacionario para una solución preliminar de los campos de velocidad y presión, para luego utilizarlos como punto de partida en el análisis en régimen transitorio. Los resultados obtenidos por estos autores durante las simulaciones no estacionarias reflejaron gran concordancia con los resultados obtenidos en modo estacionario, con una variación de todas las magnitudes calculadas menor al 3 %, (potencia, cargas, eficiencia, etc.). Se consideró que el cálculo de los parámetros hidrodinámicos en este trabajo con el método BEM una aproximación apropiada teniendo en cuenta la gran diferencia en tiempos de cálculo, costos computacionales y la mayor complejidad de estas técnicas, no contempladas en este trabajo. La modelización del desempeño de la turbina con este método fue considerada exitosa por varios autores, (como Batten *et al.*, 2006 Batten *et al.*, 2008, Da Silva *et al.*, 2015, Nachtane *et al.*, 2019, Mukherji, 2010, Bakırcı and Sezayi, 2018). Con lo que respecta a la eficiencia de la máquina, en este trabajo sólo se consideró la eficiencia del rotor, dada por el coeficiente de potencia, ($C_p = \eta_{rotor}$), y se obviaron las otras eficiencias correspondientes al mecanismo de transmisión en el eje, del generador y demás pérdidas, no contempladas en este trabajo.

2.3.9.3. Curvas de potencia

Si bien el TSR quedó determinado por el valor de la velocidad rotacional de diseño, se elaboraron las curvas de desempeño de un rotor genérico (de 0.674 m de radio, tres palas) para describir la variación de potencia según el TSR, para diferentes velocidades de flujo incidente, (**Figura 2.46**). Esta figura permitió verificar como varía la potencia estimada por una hélice según la teoría aplicada. El perfil de trabajo fue el NACA 2412, y la cuerda geométrica de 0.12 m. Se destacan los máximos de potencia cuando el TSR está entre 3 y 5, en concordancia con las curvas de potencia experimentales elaboradas por Coiro *et al.*, (2018) en un túnel de prueba. El rango de TSR de mayor potencia es típico de un rotor horizontal de tres palas comparados con las curvas semi-empíricas de Bastianon, (2008) (**Figura 2.19**). La potencia es proporcional al cubo de la velocidad del flujo incidente y a medida que esta velocidad aumenta, también aumenta la velocidad rotacional del rotor y, en consecuencia, el ángulo de ataque decrece (ecuación 2.5), haciendo perder cupla al rotor porque disminuye la fuerza de sustentación sobre las palas.

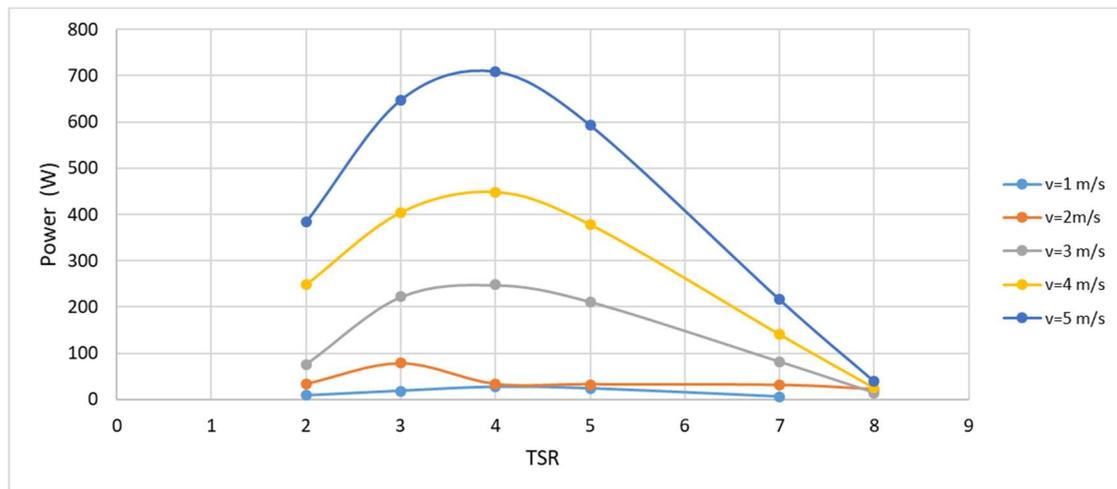


Figura 2.46. Curvas de potencia según la teoría BEM para un rotor de tres palas horizontal a diferentes velocidades del flujo. Perfil NACA 2412, cuerda geométrica 0.12 m.

2.3.9.4. Influencia del tamaño de la tobera sobre la potencia

Si bien como condición de diseño se estableció canalizar el flujo para minimizar al máximo los efectos de puntera, también se considera utilizar una tobera con el objetivo de aumentar la intensidad de flujo incidente sobre el rotor. Se analizó el efecto que tendría el área de la tobera sobre la estimación de potencia. Para ello se plantearon los siguientes escenarios de diseño: la tobera está compuesta por un área donde se encuentra la turbina constante para todos los casos (área=1,43m², radio= 0,674m) y la superficie de entrada es aumentada progresivamente. La velocidad incidente del flujo es 0,57 m/s y el máximo de intensidad es 0,97 m/s (se tomó el caso del Golfo Nuevo). Se calcularon las velocidades que resultan de imponer una tobera en cada caso y se estimó la potencia (**Tabla 2.15**).

Tabla 2.15. Potencia de la pala según velocidad de diseño.

Velocidad nominal (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Área (m ²)	Radio (m)	Ωd (1/s)	Potencia (W)
3	5.1	7.53	1.55	12.76	2337.5
3.5	5.96	8.78	1.67	11.89	2556.6
4	6.81	10.03	1.78	10.82	2665
4.5	7.66	11.29	1.89	9.46	2620
5	8.51	12.54	1.99	7.67	2349.8
6.44	10.96	16.16	2.27	3.41	1345.3

Según los cálculos realizados mostrados en esta tabla, aumentar el área de la tobera, y por lo tanto aumentar la velocidad del flujo, no necesariamente significa poder extraer mayor potencia, pues el sistema está limitado por el valor de la velocidad rotacional de cavitación. Esta condición ilustra que no es conveniente aumentar el área de la tobera, sin antes realizar los cálculos de velocidad rotacional y potencia. Además, aumentar el área de entrada de flujo también tienes otras consecuencias no deseadas; por ejemplo, Gaden and Bibeau, (2010), mostraron que el aumento del área de entrada del dispositivo también está limitado por el C_d , la fuerza de arrastre aumenta con el aumento del área, condición que afecta el desempeño del rotor.

2.3.9.5. Tiempo de generación útil

La variabilidad temporal intrínseca de las corrientes de mareas impone una condición sobre el tiempo útil de generación del rotor. Solo se podrá obtener potencia cuando haya movimiento real de las masas de agua debido a la fuerza de marea. El análisis en el tiempo fue posible para el GN y GSJ, donde se contó con estimaciones de velocidades de corrientes en el tiempo. Como el intervalo muestral fue de 6 h, se interpolaron las series para obtener una marcha temporal horaria de velocidades. Se calcularon los tiempos de generación útil utilizando las potencias descritas en la **Tabla 1.3** en cada sitio. En las marchas de velocidades, se contaron los intervalos de tiempo (en horas) donde las velocidades fueran mayores a un valor mínimo, o menores en el caso de velocidades negativas, a un límite. Este umbral fue impuesto con la condición de obtenerse el 25 % de la potencia dada en **Tabla 1.3**. Se registraron a lo largo del registro completo los intervalos ($t_i + 1 - t_i$), donde la velocidad umbral es alcanzada, y luego se sumaron todas las contribuciones (**Figura 2.47**). En el GN, (teniendo en cuenta el efecto de la tobera), el módulo de la velocidad límite resultó ser 0.23 m/s, y la potencia considerada (419 W) se genera en un 53 % del tiempo, o sea, 4613 horas que corresponden a 192 días aproximadamente en un año o el 68 % promedio en un día. Este valor disminuye al 29 % si se desea conocer el tiempo de generación del 100 % de la potencia obtenida en este sitio (1673.4 W), con un valor umbral de velocidad de 0.4 m/s.

En el caso del GSJ, la velocidad mínima para obtener el 25 % de la potencia fue de 0.91 m/s y el tiempo de generación fue de 63 % al año o 61 % promedio en el

día. El porcentaje desciende a 45 % aproximadamente si se considera toda la potencia que se puede generar en este sitio. El porcentaje promedio diario de tiempo puede considerarse, en principio bajo y podría parecer insuficiente, pero se debe tener presente que estas potencias se obtendrían todos los días, independientemente de las condiciones meteorológicas. El análisis temporal de las series de velocidades estaba limitado por el paso temporal de las mismas, no siendo recomendable aplicar otro tipo de análisis temporal, por ejemplo, análisis de Fourier como en Tonini, (2010).

Tabla 2.16. Porcentaje de generación diario según la potencia requerida.

Sitio	Potencia (W)	velocidad umbral (m/s)	% día
Golfo Nuevo	419	0.23	68
	1673.4	0.4	29
Golfo San José	560	0.91	61
	2229	1.4	45

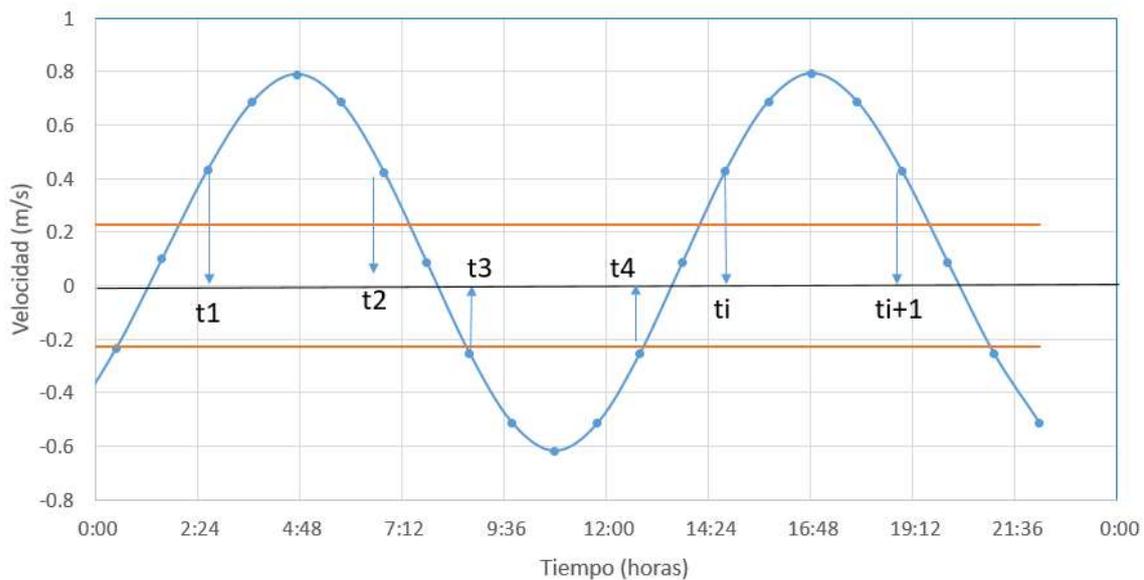


Figura 2.47. Serie interpolada de velocidad para el GN (primer día). Las líneas horizontales naranjas marcan el límite de velocidad para un 25 % de potencia considerada.

2.4 Conclusiones

El trabajo realizado consistió en el diseño de un rotor para una turbina mareomotriz, de eje horizontal con tres palas de 0,674 m de longitud, velocidad nominal de flujo de 2 m/s y potencia de diseño de 2200 W. El tamaño del rotor resultó similar a tamaños calculados por otros autores (Mancilla-Cardona *et al.*, 2017, Coiro *et al.*, 2018). Se realizó un diseño para una turbina boyante a media agua, anclada al fondo mediante un peso muerto y con un sistema de orientación para poder pivotar acorde con las velocidades variables de las mareas.

Consideraciones de *biofouling* determinaron la elección de perfiles con alto desempeño a pesar de las deformaciones en su geometría, como los NACA de 4 dígitos: 2412, 2409 y 2406, en particular se optó por el primero dado que produjo mayor potencia.

Para aumentar la velocidad del flujo incidente a la velocidad de diseño, se implementó una tobera. La misma mejoró en forma notable la potencia del rotor en un 84 %. También se la utilizó para entubar la hélice y de esta manera despreñar efectos de punta tridimensionales, como elemento de flotabilidad positiva y protección del sistema.

Los coeficientes y curvas hidrodinámicas obtenidos con el software Qblade fueron validados con resultados experimentales presentados en Abbott and Von Doenhoff, (1959). La diferencia entre los valores fue mínima y los coeficientes se consideraron apropiados para fines de diseño. El efecto del coeficiente de momento fue despreñado debido a que las turbinas mareomotrices suelen presentar baja relación de aspecto.

En este trabajo para minimizar o evitar fenómenos de cavitación, se definió una velocidad crítica de rotación de las palas, controlada por el generador del sistema. Se diseñó una pala trapezoidal con distribución de cuerda lineal, más fácil de construir, con un costo menor y para un estudio exploratorio

Se planteó un sistema de arranque simple, autónomo y sencillo sin carga en el eje, en el cual el perfil de la raíz de la pala solo sea útil en el arranque, con el ángulo de ataque de máxima sustentación para aportar cupla al rotor. Otros métodos de arranque de las palas, como alerones, control de *pitch* o usando el generador como motor, aumentan los costos y la complejidad de diseño.

La potencia producida por el rotor se evaluó siguiendo los lineamientos de la teoría BEM. El cálculo presentado de los parámetros hidrodinámicos con este método consistió en una aproximación apropiada que cumple con el propósito del estudio. De esta manera, el resultado permitió plantear las bases de diseño de un prototipo de rotor y definir los problemas a afrontar en el ambiente marino, para establecer la factibilidad del aprovechamiento de las corrientes de mareas en la costa chubutense para la generación de energía.

En este capítulo se detalló el desarrollo de rotores hidrocínético, en el próximo capítulo se presenta el estudio de resistencia a la corrosión de los materiales que puedan servir para la construcción del dispositivo.

Capítulo III. Resistencia a la corrosión de materiales en ambiente marino

3. 1. Introducción y Objetivo

Los dispositivos energéticos instalados en el océano están sujetos a un ambiente hostil, y requieren mantenimiento preventivo continuo para prolongar la vida útil. Por este motivo, uno de los principales problemas que debe afrontar la extracción de energía de los movimientos del agua es la durabilidad de los materiales de construcción de plataformas, estructuras conexas, sistemas complementarios de sujeción y soporte y partes de equipos hidrocínicos (rotor, carcasa). Los materiales constituyen un cuello de botella para el desarrollo, ya que deberán estar en contacto directo con uno de los ambientes naturales más agresivos donde corrosión, cavitación, corrosión-erosión y fenómenos de ensuciamiento biológico constituyen problemas corrientes.

El deterioro de los materiales por procesos de corrosión en estructuras marinas constituye un problema tecnológico de notable impacto económico. Como cualquier otra tecnología *offshore*, los costos de mantenimiento son altos. Se estima que los costos anuales de operación y mantenimiento de los dispositivos energéticos marinos son tan altos como 3,4-5,8 % de los gastos del capital comparado con el 2,3- 3,7 % de los gastos de la eólica *offshore* (Lacal-Arategui *et al.*, 2014).

El material de construcción de una estructura metálica que opera en el mar debe poseer alta resistencia a la corrosión o debe ser preventivamente protegido con algún tipo de tratamiento superficial, realizado mediante pinturas anticorrosivas y anti vegetativas o utilizando revestimientos plásticos, metálicos resistentes o cerámicos. Frecuentemente se recurre también a la protección eléctrica, que necesita mantenimiento y gestión (Lazzari y Pedferri, 2000). La búsqueda de soluciones más confiables y sobre todo más económicas, es aún un problema abierto. El deterioro de los materiales por corrosión en ambiente marino reviste además un grado sumamente complejo ocasionado por la heterogeneidad ambiental. La parte de las estructuras en contacto con la atmósfera está sujeta a salpicaduras, a la acción del viento, de la lluvia y la irradiación solar. La zona de salpicaduras es rica en oxígeno. En esta área, además, existen efectos abrasivos como consecuencia del movimiento de las olas, partículas u otros objetos flotantes, y es el lugar donde se presentan altas velocidades de corrosión. Las estructuras fijas que se encuentren en la zona intermareal estarán en contacto con agua en constante movimiento determinado por olas y corrientes. En la mayor parte de las estructuras se observa un incremento brusco de la velocidad de corrosión debido a la formación de celdas de aireación diferencial. En la zona que permanece sumergida la corrosión dependerá fundamentalmente del nivel de oxígeno presente, el cual disminuye con la profundidad. Esta diferencia unida a un ambiente altamente conductor, con diversas situaciones de turbulencia y

variaciones térmicas, determinan que este sea uno de los ambientes naturales más corrosivos (Galvele y Duffó, 2006). La **Figura 3.1** muestra esquemáticamente la distribución de la pérdida de espesor según la profundidad, para aleaciones ferrosas. La heterogeneidad del fenómeno es originada principalmente por el contenido de O₂, tal como muestra la **Figura 3.1**, construida con información extraída del libro de Fontana (1987).

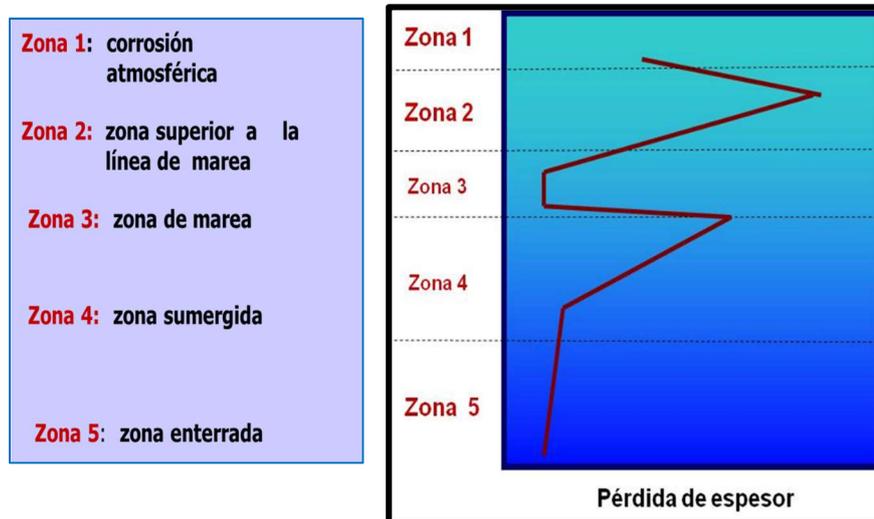


Figura 3.1. Pérdida de espesor según la profundidad (adaptado de Fontana 1987).

La resistencia a la corrosión de la mayoría de los materiales depende de la película constituida fundamentalmente por óxidos e hidróxidos y que estos desarrollan en contacto con el aire, inmediatamente después del proceso de fabricación industrial (De Cristóforo and Menegali, 2000), fenómeno denominado pasivación. Por ejemplo, en el caso de los aceros inoxidables estas películas están constituidas por óxidos e hidróxidos de hierro y cromo con diferentes grados de hidratación (De Cristóforo *et al.*, 1999). Las características protectoras de estas películas dependen de la composición química del material y especialmente de su contenido en cromo (De Cristóforo *et al.*, 1997). Otros elementos de aleación como el molibdeno y el níquel contribuyen a este fenómeno (Baulange-Peterman, *et al.*, 2002). Sin embargo, bajo determinadas circunstancias, por acción química y/o mecánica, esta película pasiva puede perder localmente sus características protectoras y originar procesos de corrosión localizada, (Baulange-Peterman *et al.*, 2002, Szklarska – Smialoska, 1976, Sedriks, 1979).

Es frecuente asignar a los aceros inoxidables convencionales inmunidad a la corrosión en ambiente marino, situación que bajo ciertas condiciones no logran cumplir. Por otro lado, también se suele asignar al aluminio la misma característica de inmunidad, cuando este presenta corrosión localizada por picado en la mayoría de los ambientes marinos en donde fue empleado.

Teniendo en cuenta las motivaciones precedentemente expuestas, el objetivo de esta parte del trabajo fue establecer algunas consideraciones relativas a alcances y límites del empleo de los mencionados materiales. A tal fin, el comportamiento a la corrosión en ambiente marino de dichos materiales se estudió mediante el

empleo de técnicas electroquímicas y exposiciones *in situ*, completadas con estudios de análisis superficial.

3.1.1 Conceptos básicos del fenómeno de corrosión

Según la ISO (International Standard Organization, 1985) la corrosión es un proceso irreversible que ocurre en la interface del material (metal, cerámicos, polímero) y en ambiente, que produce como resultado el consumo del material o la disolución en el material de un componente del ambiente. Procesos físicos y mecánicos como fusión y evaporación, la abrasión o la fractura mecánica, sin intervención del ambiente, no están incluidos en el concepto de corrosión. El proceso de corrosión tiene lugar cuando se combinan ciertos factores:

- ambiente agresivo: en general todos los ambientes son corrosivos, pero la velocidad de corrosión de un determinado material en un medio, con respecto a otro material en ese mismo medio, puede ser significativamente diferente. Determinadas condiciones operativas: presión, temperatura, velocidad de flujo o condiciones estancas, también condicionan el proceso corrosivo.
- características del material: tipo de aleación, estructura, presencia de segundas fases, estado superficial.

3.1.1.1 Tipos de corrosión

La corrosión de materiales metálicos puede ser principalmente de dos tipos:

- seca;
- húmeda

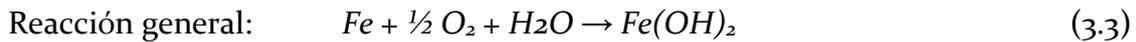
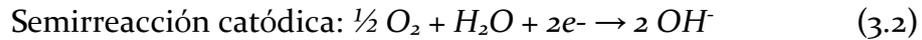
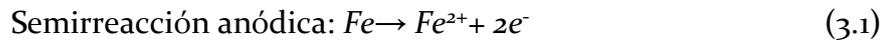
La corrosión seca se produce debido a la interacción directa entre el metal y una atmósfera gaseosa a alta temperatura; mientras que, en la corrosión húmeda, el material metálico está en contacto con un ambiente que contiene agua, incluso si aparece como simple humedad atmosférica.

El mecanismo por el cual se producen los dos tipos de corrosión es diferente. En el caso de la corrosión seca el fenómeno es de naturaleza química, en el sentido que los procesos de corrosión están sujetos a las leyes de la termodinámica y cinética química característica de reacciones heterogéneas, mientras que para la corrosión húmeda el fenómeno es de naturaleza electroquímica, correspondiente al funcionamiento de los sistemas galvánicos, y sigue las leyes de la termodinámica y la cinética electroquímica. La corrosión húmeda es cuantitativamente la más extendida y es a la que se dedica atención.

3.1.1.2 Corrosión húmeda: Mecanismo electroquímico

El proceso de corrosión es el resultado de dos fenómenos complementarios: un proceso anódico, que conduce a la oxidación de los constituyentes del material metálico, y un proceso catódico en el que se reducen las especies presentes en el

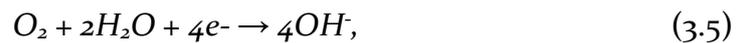
ambiente agresivo. Por ejemplo, la corrosión del hierro y aceros sumergidos en agua sigue el siguiente mecanismo electroquímico:



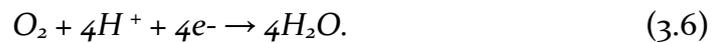
Para un metal genérico M que se corroe, la semirreacción anódica es del tipo:



Las semirreacciones catódicas de interés práctico para la corrosión son limitadas en número; la más importante es la reducción de oxígeno vista anteriormente:



o, en un ambiente ácido:



Otra semirreacción catódica es la de reducción de iones H^+ , que es importante en un ambiente ácido:



3.1.1.3 Formas de corrosión

La corrosión puede ocurrir tanto en forma generalizada como localizada o selectiva. Cabe señalar que las formas más peligrosas de corrosión son en general las localizadas que, al poner en solución pequeñas cantidades de material, pueden dejar completamente fuera de uso una planta, una máquina, un sistema energético, etc.

Corrosión generalizada

La corrosión generalizada puede ser uniforme o no uniforme, dependiendo del aspecto del ataque, pero en cualquier caso se manifiesta en forma de agresión progresiva y con una velocidad bastante constante en el tiempo, lo que provoca un adelgazamiento de la pieza metálica en contacto con el electrolito. De todos los tipos de corrosión, la corrosión generalizada es la menos peligrosa ya que la identificación y el seguimiento del fenómeno corrosivo generalizado generalmente se realiza con facilidad. Además, eligiendo adecuadamente el material a utilizar, se

puede calcular con suficiente aproximación la pérdida de masa resultante de la reducción del espesor del material y por tanto su duración (Bianchi *et al.*, 2004, Fontana, 1987).

La **Figura 3.2** muestra el aspecto superficial de una zona de la pared interna de un tubo de agua para calefacción de acero al carbono presentando corrosión generalizada.



Figura 3.2. Aspecto superficial de la pared interna de un tubo de agua para calefacción con corrosión generalizada (fotografía de Ana Julia Lifschitz).

Corrosión localizada

La corrosión localizada es la principal causa de fallas en materiales metálicos utilizados en una amplia variedad de aplicaciones. Más grave aún es que, en la mayoría de los casos, el daño causado por este tipo de corrosión no es previsible ni visible en las primeras etapas. A continuación, se describen las principales formas de corrosión localizada en ambiente marino.

a) Corrosión galvánica: se produce cuando dos metales de diferente nobleza se ponen en contacto en presencia de un electrolito (una solución, humedad atmosférica). Se crea una diferencia de potencial entre los dos elementos y el que se corroe más rápidamente es el que se caracteriza por un potencial menor, en comparación con un electrodo de referencia, asumiendo la función de ánodo en el acoplamiento. Al mismo tiempo, hay una disminución en la velocidad de ataque del material más noble o de mayor potencial que actúa como cátodo.

b) Corrosión por picado: esta forma de corrosión se presenta en forma de ataques extremadamente localizados, que desde la superficie penetran a través del espesor del metal. Las dimensiones de las picaduras varían desde unas pocas decenas de micrones hasta unos pocos milímetros. Estos se nuclean y propagan en puntos singulares, mientras que la mayor parte de la superficie metálica expuesta al medio ambiente permanece inalterada. El peligro del ataque por picado se debe principalmente a que, a pesar de que la pérdida de material metálico representa un

porcentaje ínfimo del peso total del propio material, la profundidad de las cavidades puede afectar a todo el espesor en poco tiempo (Pedferri, 2007).

Como ilustra la **Figura 3.3**, la morfología de los ataques corrosivos por picado puede variar, dependiendo de las propiedades de la superficie del material y las características del medio ambiente circundante. El ataque por picaduras es consecuencia de la formación de dos zonas diferenciadas en la superficie del material metálico, sobre las que tienen lugar los procesos anódico y catódico: la primera concentrada en una pequeña área, mientras que la segunda se distribuye en una amplia zona circundante.

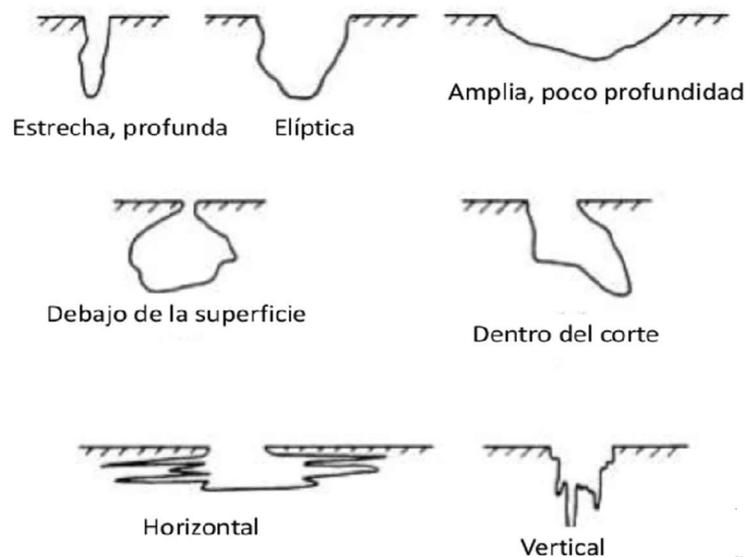


Figura 3.3. Morfología de los ataques de corrosión por picaduras (adaptado de ASTM, Practica G46-76).

Algunas características de la corrosión por picadura (Sato 1995):

- afecta a los metales en condiciones pasivas, donde la superficie del metal está protegida por una película de óxido (por eso los aceros inoxidable, el cobre y sus aleaciones y el aluminio, son potencialmente susceptibles a la corrosión por picaduras);
- deben estar presentes en el medio ambiente iones agresivos específicos, en particular iones cloruro;
- el potencial juega un papel importante: más precisamente, el potencial del metal debe estar por encima (i.e., en valores más nobles) de un potencial umbral llamado potencial crítico de picadura o ruptura;
- el ambiente debe poseer características oxidantes; es decir, debe haber especies químicas capaces de soportar un proceso de reducción catódica. En entornos naturales este papel lo desempeña el oxígeno disuelto en el agua.

El mecanismo del proceso de corrosión por picaduras se desarrolla en dos etapas: la iniciación y el crecimiento de las picaduras. En la fase de iniciación, se produce la penetración y ruptura local de la película de pasividad por especies químicas específicas presentes en el ambiente. Los iones cloruros, Cl^- , son las

especies más agresivas para muchos metales (con la excepción del cobre y sus aleaciones). Para los aceros inoxidable, por ejemplo, no se produce la iniciación de picado por debajo de una cierta concentración de cloruros, llamada concentración umbral. La **Figura 3.4** ilustra, en forma esquemática, el efecto de los iones cloruro sobre la curva de polarización característica de un acero inoxidable genérico en un ambiente acuoso conteniendo los mencionados iones. El principal efecto consiste en una reducción del campo de pasividad, tanto más significativo cuanto mayor es la concentración de cloruros (Pagitsas *et al.*, 2008). En la curva se identifica un potencial, llamado potencial de picado, E_p , por encima del cual se inicia la nucleación de picaduras. Este valor de potencial, que puede medirse experimentalmente, se utiliza a menudo para determinar la resistencia relativa a la corrosión por picado de materiales metálico.

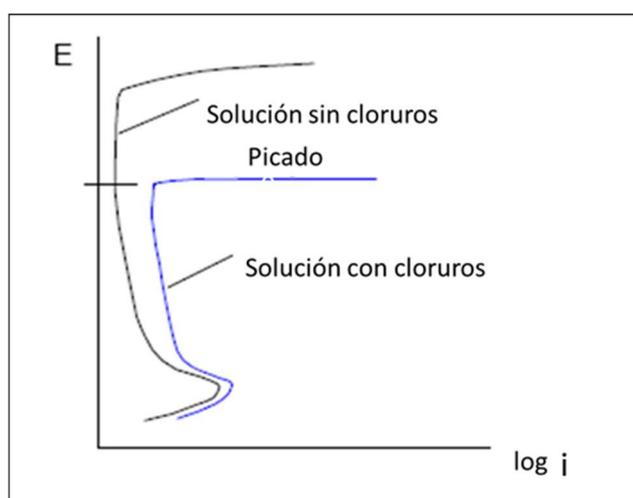


Figura 3.4. Representación esquemática de una curva de polarización potencial (E) en función del logaritmo de la corriente ($\log i$) que ejemplifica el efecto de la presencia de iones cloruro sobre el potencial de picado.

Otros factores que inciden en el fenómeno de iniciación del proceso de picado son la agitación de la solución y la temperatura: las condiciones de estancamiento reducen el tiempo de inicio y en general constituyen un agravante de la corrosión por picado; la temperatura siempre favorece la iniciación y también aumenta la velocidad de propagación. La iniciación del proceso de picado tiene lugar en los sitios de la superficie donde la película pasiva se presenta defectuosa: por ejemplo, en correspondencia con inclusiones que interrumpen la película, o en presencia de un daño mecánico de la misma. Los iones cloruro se adsorben en la superficie del metal donde tiene lugar la formación de complejos y un consiguiente adelgazamiento de la película pasiva.

Las **Figuras 3.5 y 3.6** muestran el inicio y propagación de una picadura respectivamente. Varios factores intervienen en la etapa desencadenante. Además de los citados, se mencionan los siguientes: la composición química del ambiente, el potencial de corrosión, la presencia de segundas fases como inclusiones no metálicas y la dureza. En la fase de propagación también hay una serie de efectos agravantes que determinan una progresiva intensificación de la agresividad de la

solución en el interior de la picadura; el primero de ellos es la disminución del pH. Esta acidificación de la solución se debe a las reacciones de hidrólisis de los iones metálicos presentes en las cavidades:



Como se ilustra en la **Figura 3.6**, extraída de Fontana (1987), en la zona atacada la difusión del oxígeno se ve obstaculizada por la geometría del intersticio. Por lo tanto, el oxígeno se reduce solo en las superficies circundantes al intersticio, esto produce una alcalinización local y el mantenimiento, en estas áreas, de condiciones pasivas. De esta forma se estimula el ataque de las regiones anódicas y la protección de las catódicas. Esto también explica la morfología típica de la corrosión por picaduras que no se extiende superficialmente sino sólo en profundidad. Entre las áreas anódica y catódica, se establece una migración de iones, en particular los cloruros se mueven desde el exterior hacia el interior.

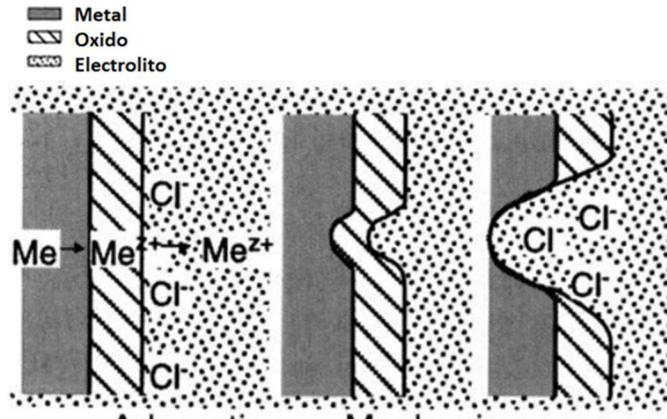


Figura 3.5. Mecanismo de iniciación del proceso de picado (Heusler and Fisher, 1976).

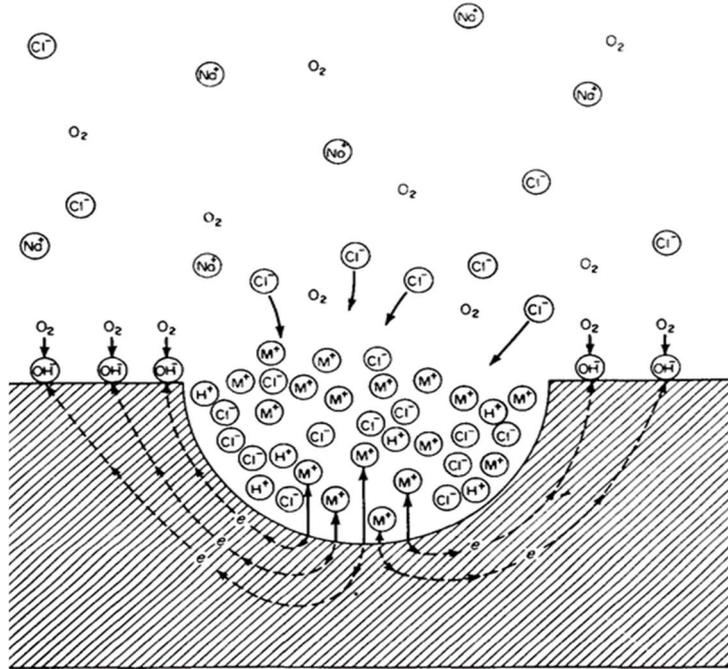


Figura 3.6. Mecanismo de propagación de una picadura (Fontana, 1987).

c) Corrosión intersticial, por aireación diferencial o en rendijas: es un tipo de corrosión localizada relacionada con la componente geométrica del material metálico. Puede ocurrir en correspondencia de intersticios, presencia de depósitos superficiales y grietas en la superficie del material, tras el establecimiento de diferentes condiciones de aireación entre el fondo de la grieta o intersticio y la superficie externa. La superficie dentro del intersticio constituye el área anódica, mientras que la parte expuesta libremente al ambiente agresivo constituye el área catódica. Este tipo de corrosión sigue el mismo mecanismo de propagación que el proceso de la corrosión por picado. La **Figura 3.7** muestra la etapa inicial de este tipo de corrosión.

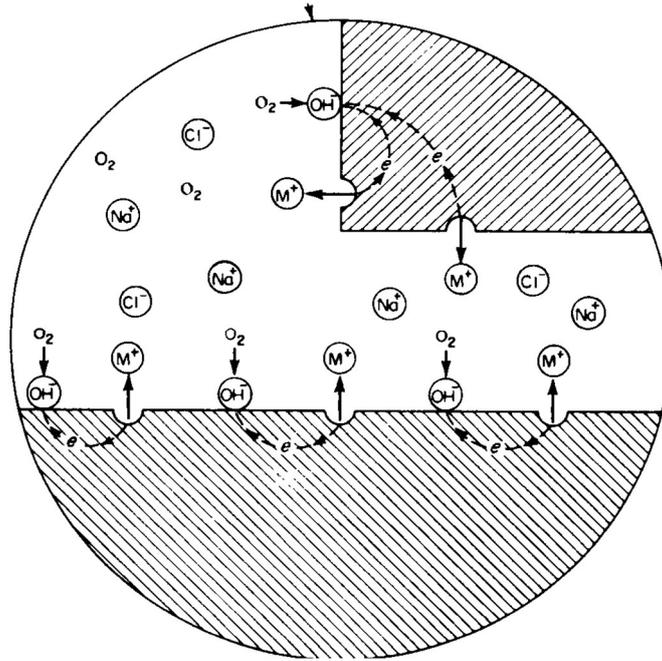


Figura 3.7. Corrosión intersticial, etapa inicial (Fontana, 1987).

d) Corrosión bajo depósitos (biológicos u orgánicos): es un caso particular de corrosión intersticial que se manifiesta mediante el mismo mecanismo, las condiciones creadas debajo del depósito constituyen un intersticio que se convertirá en la zona anódica como fue previamente descrito. En la **Figura 3.8** se muestra un ejemplo típico que pone en evidencia el problema ocasionado por depósitos orgánicos en una hélice de turbina de marea.



Figura 3.8. Depósitos orgánicos en una hélice de turbina de marea (Song *et al.*, 2019).

La composición química del material determina la estabilidad de la película pasiva, produciendo como consecuencia una mayor o menor resistencia al ataque localizado por picaduras e intersticial, junto con el acabado superficial y la

geometría de la pieza, aunque esta última juegue un papel de primordial importancia sobre todo en la corrosión intersticial (Oldfield, 1987).

En la presente sección se han presentado solamente las formas de corrosión más frecuentes, encontradas para los materiales seleccionados en sistemas acuosos conteniendo cloruros.

3.2 Materiales y métodos

Para la experimentación se emplearon los aceros inoxidable AISI 430 (EN 1.4016) y AISI 304 (EN 1.4301), aluminio 1370 y aluminio anodizado. Las **Tablas 3.1** y **3.2** muestran la composición química de estos materiales, seleccionados para el estudio, expresada en porcentaje en peso. El aluminio anodizado fue del tipo poroso realizado industrialmente por vía electrolítica en un baño de ácido sulfúrico con concentración 16 % (v/v) a una temperatura entre 96 a 104 ° C (Aluminium Anodizers Council, 2022). El proceso de anodizado permite el desarrollo de una pátina de Al_2O_3 sobre la superficie del aluminio que se caracteriza por poseer espesores de varios micrones y propiedades de resistencia a la abrasión y a la corrosión. Para realizar las mediciones del espesor de la pátina del aluminio anodizado utilizado, las probetas se prepararon, montaron y pulieron de acuerdo con la Norma UNI EN ISO 1463 (2021). El espesor cubierto de dicha pátina presentó un valor promedio de 9,36 μm y desvió estándar 0,27 μm (**Figura 3.9**, gentileza de la empresa ALUAR SAIC). En la región intermareal y con el objetivo de observar el comportamiento del aluminio con otro sistema de protección pasiva diferente al proceso de anodizado, se agregaron dos probetas de aluminio con revestimiento orgánico con base de titanio. La aplicación de pinturas requiere de pretratamientos superficiales indispensables, como la limpieza superficial y la generación de capas superficiales de compuestos químicos que actúen promoviendo la adhesión de la pintura y la protección del aluminio contra la corrosión. Para completar el proceso de pintado es necesario "curar" la pintura, colocando en horno los productos bajo condiciones específicas y controladas de temperatura y tiempo, para que la pintura adquiera su resistencia final. La pintura aplicada fue en polvo de base poliéster. El proceso de pintado sigue los siguientes ensayos según normas internacionales e internas:

ISO 1519: plegado a 180° sobre una muestra testigo pintada llamada panel de prueba (es una chapa de Al 1100 de espesor 1 mm y medidas 15x8 cm).

ISO 2409 adherencia en seco sobre perfil pintado y también sobre el mismo panel de prueba.

ISO 6272/2 impacto sobre el mismo panel de prueba y alternativamente sobre el perfil pintado.

ISO9227 corrosión acelerada (cámara de niebla salina-acética).

ASTM D3359 adherencia en húmedo (autoclave) sobre perfil pintado.

Espesor de capa, brillo y color sobre perfil pintado bajo norma interna (documento en SoftExpert) y mediante equipamiento a fin.

Tabla 3.1. Composición química de los aceros seleccionados expresada en porcentaje en peso.

Designación del acero	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	C (%)	S (%)	Mn (%)	Pb (%)	N (%)
AISI 430 (EN1.4016)	16.22	0.013	0.175	0.045	0.001	0.287	0.022	0.009
AISI 304 (EN1.4301)	18.29	0.296	8.14	0.05	0.005	1.628	0.03	0.013

Tabla 3.2. Composición química del aluminio expresada en porcentaje en peso.

Elemento	(%)
Si	0.0728
Fe	0.3167
Cu	0.0281
Mn	0.0025
Mg	0.0047
Zn	0.0035
Ti	0.0291
Cr	0.0014
Ni	0.0028
Pb	0.0010
Sn	0.0004
Na	0.0011

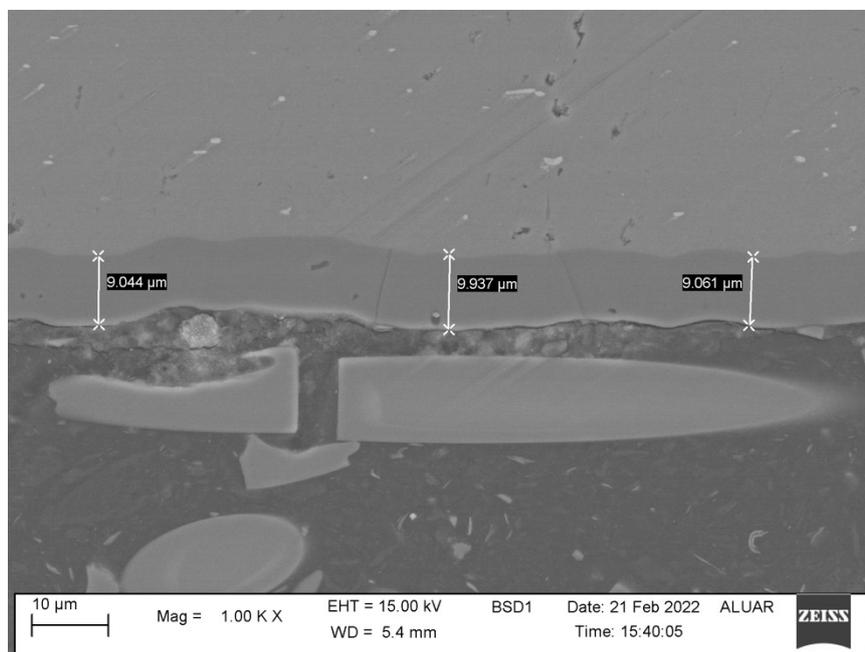


Figura 3.9. Muestra ejemplo de espesores en probetas de aluminio anodizado.

3.2.1. Pruebas de laboratorio

El comportamiento a la corrosión de los materiales seleccionados fue estudiado en laboratorio y en campo. Los estudios en laboratorio se realizaron en las instalaciones de la Universidad Tecnológica Nacional Regional Chubut (UTN FRCH). Las pruebas in situ se llevaron a cabo en el muelle Piedra Buena de la ciudad de Puerto Madryn. Las pruebas de laboratorio fueron efectuadas para determinar la resistencia a la corrosión localizada por picado de los materiales seleccionados, en agua de mar tomada del Golfo Nuevo y de la desembocadura del Río Chubut, en condiciones aireadas y desaireadas, a 23 °C y 7 °C de temperatura.

3.2.1.1. Metodología

La metodología aplicada fue el análisis de la relación entre corriente y potencial (curvas de polarización) en la interface metal / solución de una 'celda electroquímica', formada por el electrodo de trabajo (el metal en sí), el electrodo de referencia, un electrodo auxiliar (contra electrodo) y el ambiente (**Figura 3.10**). Esta técnica consiste en la aplicación de un voltaje para polarizar la celda en sentido anódico o catódico. Esta polarización induce una respuesta en forma de corriente eléctrica. Las curvas de polarización muestran la interdependencia entre el potencial de electrodo (E) y la intensidad de corriente (i) (relaciones i sobre E). Las curvas pueden determinarse aplicando un potencial constante y determinado, analizando la forma en que varía la corriente. Los parámetros que definen el estado de la interface, como temperatura, presión, concentración y área superficial, se mantienen constantes y la información se obtiene midiendo la corriente en función del potencial aplicado. La corriente representa la velocidad con la que las semirreacciones (anódicas y catódicas) intervienen en el electrodo de trabajo. La corriente se expresa en términos de corriente por unidad de área o densidad de corriente.

Las pruebas se llevaron a cabo mediante el uso de un Potenciostato/Galvanostato TEQ_4_500mA. (<http://www.nanoteq.com.ar>), conectado a la celda electroquímica compuesta por tres electrodos: el electrodo de trabajo, un contra electrodo de platino (Pt), y un electrodo de referencia de Ag/AgCl, con solución de KCl (3 mol/L) e interconectado a una Notebook que, a través de un específico software, permitió el registro y tratamiento de los datos obtenidos (**Figura 3.10**). El potencial de corrosión libre o potencial de circuito abierto (OCP) se midió con respecto al electrodo de referencia, por 90 s antes de la realización de cada curva de polarización. Las muestras se sometieron a polarización anódica potenciodinámica, a una única velocidad de exploración igual a 1 mV/s. Se realizaron al menos 10 mediciones para cada material en diferentes condiciones de trabajo.



Figura 3.10. Laboratorio UTN FRCH: Potenciostato y celda electroquímica integrada por un electrodo de referencia de Ag/AgCl, y un contraelectrodo de Pt, utilizados en las medidas de resistencia a la corrosión de los materiales de estudio (electrodo de trabajo).

3.2.1.2. Electrolitos

Se utilizaron como electrolitos agua del Golfo Nuevo filtrada y tratada con luz ultravioleta, (con el objetivo de eliminar toda presencia de contaminación microbiológica) y agua tomada de la desembocadura del Río Chubut, zona del puerto de Rawson. La muestra de agua del golfo presentó una salinidad de 35 ‰, si bien la salinidad del agua de mar del Golfo Nuevo es de alrededor de 33,8 ‰ (Rivas, 1985). Por otro lado, el agua del río presentó una salinidad de 30 ‰. Las mediciones de salinidad fueron efectuadas con una multi-sonda YSI 556 MPS, calibrada con solución Y SI 3169 (50 mS/cm).

Para contemplar las diversas condiciones ambientales a que son sometidos los materiales, los estudios se realizaron a temperatura ambiente y a una temperatura representativa del agua de mar durante los meses de otoño-invierno (7 °C). Además, se estudió el comportamiento de los materiales en presencia y en ausencia de oxígeno, simulando la situación de materiales expuestos a profundidades en el cuerpo de agua, donde el contenido de oxígeno es bajo, para lo cual, se adquirió e instaló un sistema de suministro de gas nitrógeno. Todos los ensayos en laboratorio se realizaron sin agitación del electrolito.

3.2.2. Estudios en campo

Las pruebas en campo se llevaron a cabo en atmósfera marina, las mismas fueron expuestas en el muelle Luis Piedra Buena, en el marco de un acuerdo de cooperación con la Administración Portuaria de Puerto Madryn (APPM). El análisis de campo consistió en la exposición de probetas en el muelle en la zona atmosférica e intermareal (**Figura 3.11**).

3.2.2.1. Metodología

Las pruebas de exposición se realizaron de acuerdo a lo especificado en la normativa ASTM G52 (2011, *Standard Practice for exposing and evaluating metals and alloys in surface seawater*). Teniendo en cuenta dichas especificaciones, no se realizaron mediciones de velocidad de corrosión ya que los materiales examinados no presentan corrosión uniforme en agua de mar, pero si presentan corrosión localizada en ciertas áreas de la superficie metálica. Se utilizaron probetas de 100 x 150 mm siguiendo la recomendación de la norma citada. Antes de la exposición, las probetas fueron desengrasadas con alcohol. Esta operación fue seguida de un lavado con agua destilada. Las Figuras 3.12 y 3.13 muestran los bastidores instalados en el muelle en la zona atmosférica e intermareal, respectivamente. Las probetas fueron montadas al bastidor soportadas por aislantes a fin de evitar contacto eléctrico probeta - bastidor.

El periodo de exposición de las probetas en la zona atmosférica fue de mayo 2018 a junio 2019, y en la zona intermareal de marzo del año 2021 a junio del año 2022. Durante el periodo de exposición las probetas fueron controladas cada mes. Para evitar roturas del sistema de sujeción de las probetas, tornillos y agarraderas fueron sustituidos durante los controles.

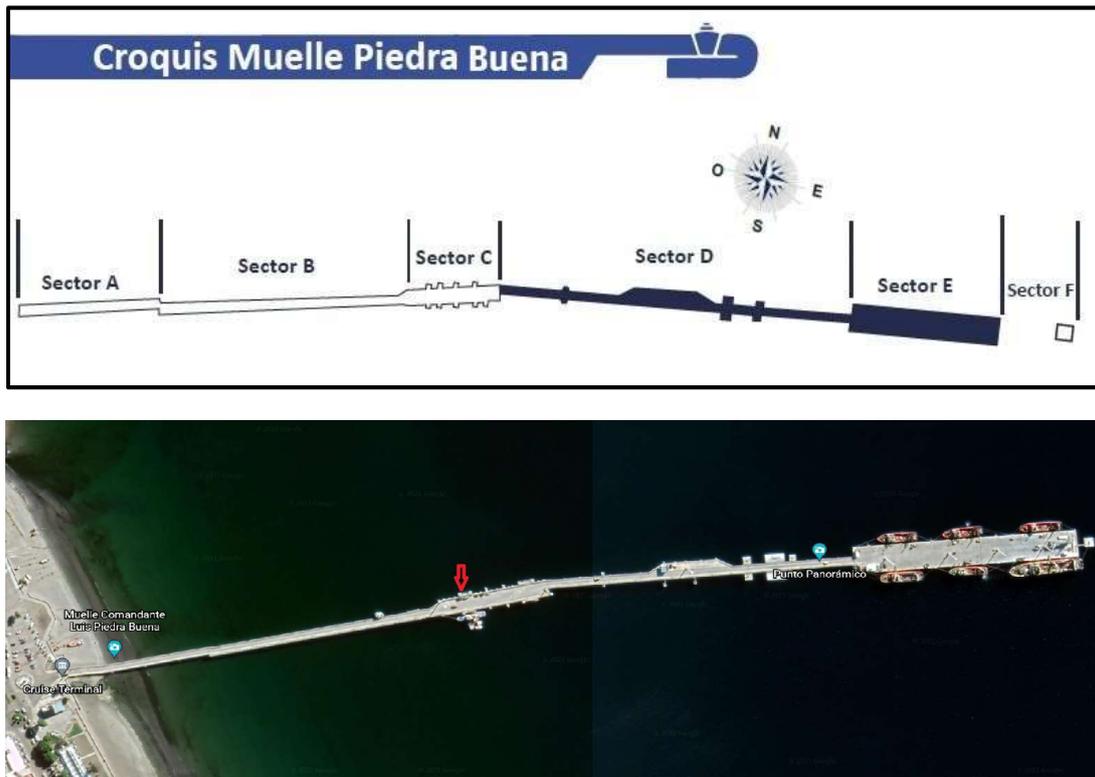


Figura 3.11. Muelle Luis Piedra Buena de la ciudad de Puerto Madryn. La flecha indica el sector (C), donde se colocaron las probetas de estudio.



Figura 3.12. Probetas de corrosión expuestas en el muelle Luis Piedra Buena, zona atmosférica (mayo 2018-junio 2019).

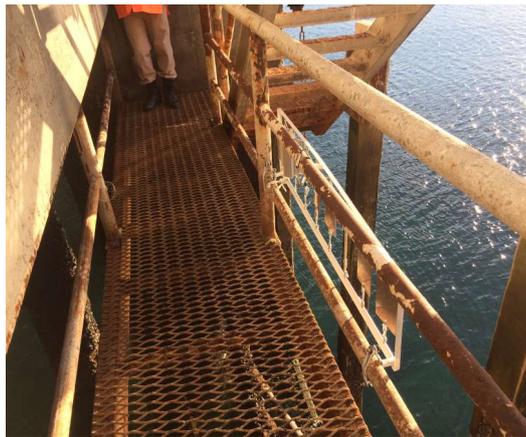


Figura 3.13. Probetas de corrosión expuestas en muelle Luis Piedra Buena, zona intermareal (mayo 2018-junio 2019, marzo 2021-junio 2022).

3.2.3. Observaciones y análisis superficiales de los materiales

Los materiales utilizados en las pruebas de laboratorio y de exposición in situ fueron examinados mediante microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy*, SEM, **Figura 3.14**), para documentar la tipología de la corrosión presente. Además, se realizaron análisis superficiales en las zonas corroídas mediante la microsonda EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*, EDS). Estas observaciones y análisis se llevaron a cabo en el marco de un convenio de cooperación ALUAR-UTN FRCH.



Figura 3.14. Laboratorio de microscopía donde se efectuaron los estudios utilizando microscopía electrónica de barrido, empresa ALUAR.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1. Estudios en laboratorio

Aluminio 1370

El material estudiado mostró corrosión a circuito abierto en los dos ambientes utilizados para la realización de las pruebas de corrosión, agua de mar y agua de la desembocadura del Río Chubut. La corrosión se presentó en forma de ataques extremadamente localizados, del tipo por picado que desde la superficie penetraron a través del espesor del metal. Las picaduras crecieron y se propagaron en puntos singulares, mientras que la mayor parte de la superficie metálica expuesta al medio ambiente permaneció inalterada. Valores de potencial más negativos se observaron para el material, en agua de mar con respecto al material, en agua de la desembocadura del río en todas las condiciones estudiadas, $E_p(\text{mar}) = -0.640 \text{ V}$, $E_p(\text{río}) = -0.545 \text{ V}$. En el caso de las mediciones a baja temperatura (7°), el potencial de corrosión en agua de mar fue levemente más negativo que en agua de río, con valores de -1.098 V y -1.015 V respectivamente. Los resultados muestran claramente que este material no puede ser utilizado en la construcción de estructuras y equipos en los ambientes examinados.

Aluminio anodizado

La **Figura 3.15** presenta las curvas de polarización del material en agua de mar a temperatura ambiente y a 7°C , en ausencia y presencia de oxígeno. Este material no manifestó corrosión por picado en ninguna de las pruebas de laboratorio realizadas. Los resultados de las curvas de polarización muestran que este material presenta un muy buen comportamiento en los ambientes considerados.

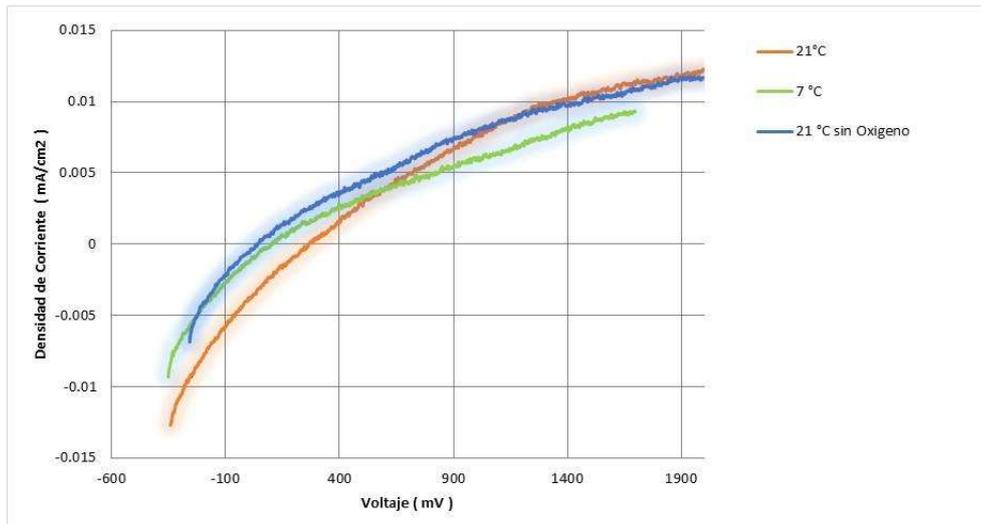


Figura 3.15. Curvas de polarización para aluminio anodizado en diferentes condiciones experimentales en agua de mar. A temperatura 20° C y sin agitación del electrolito. velocidad de barrido 1 mV/s.

Aceros inoxidables

La **Figura 3.16** presenta una típica curva de polarización para el acero inoxidable AISI 304 y 430. La rotura de la pasividad por formación de picaduras se visualiza por una brusca subida de la corriente eléctrica, producto de la disolución del material en la picadura. El valor de potencial caracterizado por el brusco incremento de la corriente es considerado el potencial de picado, E_p .

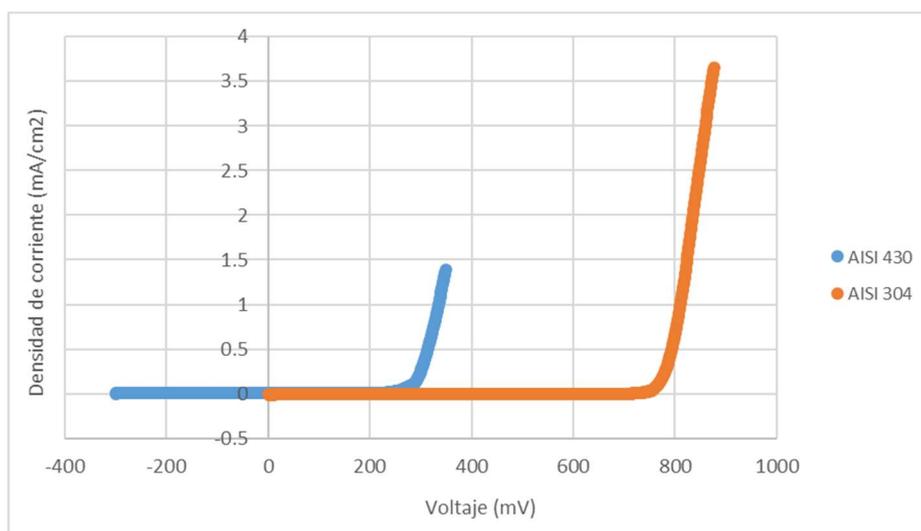


Figura 3.16. Curvas de polarización del acero inoxidable AISI 304 y AISI 430 en agua de mar (35 ‰) a temperatura 20° C y sin agitación del electrolito. Velocidad de barrido de 1 mV/s.

En la **Figura 3.17** se presenta el potencial de picado, extraído de las curvas de polarización, de los aceros inoxidables estudiados en ambos electrolitos y para las temperaturas ambiente y 7° C. Ambos aceros presentaron corrosión por picado en todas las condiciones ambientales examinadas. El potencial de picado para los

dos aceros estudiados en agua de mar (salinidad 35 ‰), fue inferior que en agua tomada en la desembocadura del río (salinidad 30 ‰) debido a una mayor conductividad del primer electrolito. En todas las condiciones de trabajo, el potencial de picado del acero inoxidable AISI 304 fue mayor al potencial del AISI 430 debido a su mayor resistencia a la corrosión por picado, determinada principalmente por un mayor contenido de cromo (2,07 %) con respecto al acero AISI 430 y a la presencia de níquel en la aleación (8.14%). Este comportamiento se presentó también en las mediciones a baja temperatura (7° C). La resistencia a la corrosión, es debida, principalmente, a la presencia de cromo en la película pasiva y es función del contenido de este elemento en el material. En relación con el efecto del níquel, diversos investigadores han observado que mejoraba el comportamiento de los aceros que contenían este elemento, con respecto a aquellos que no (Sedriks, 1979, Szlarska –Smialowska, 2006). El agregado de níquel al acero retardaba la formación de picaduras, debido al incremento en la resistencia de la película pasiva (Boccolari *et al.*, 2007, 2009). Estos resultados evidencian que aceros inoxidables convencionales, como el AISI 304 y AISI 430, que se emplean con frecuencia en ambientes marinos acuosos, pueden sufrir corrosión localizada. El riesgo es significativamente más alto para el caso del acero inoxidable AISI 430. Este comportamiento fue observado precedentemente por otros autores (Verneau *et al.*, 1996; Boulange Petermann, 2001, 2002; Szlarska –Smialowska, 2006).

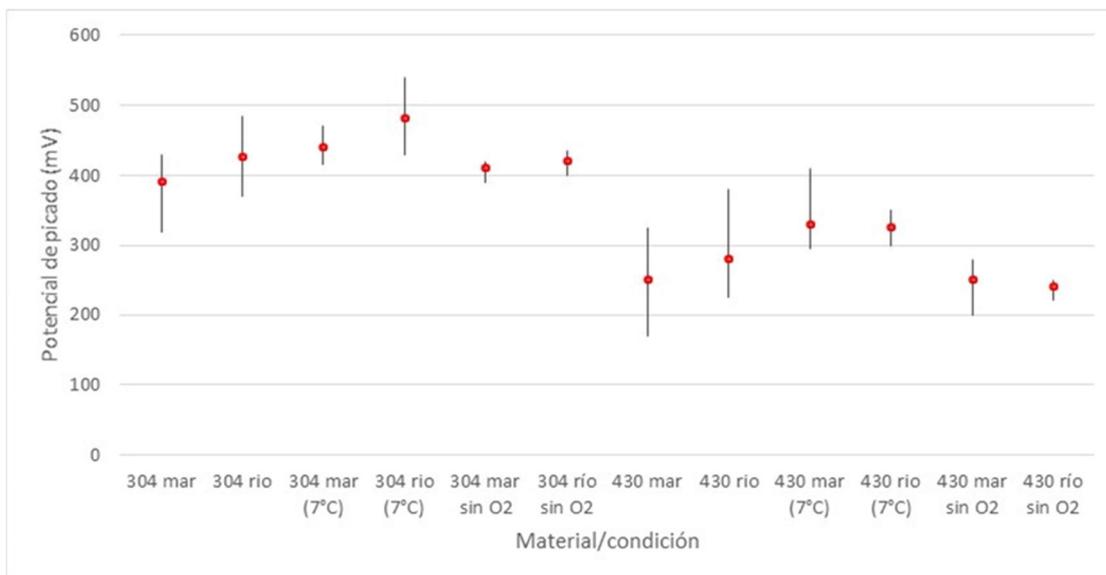


Figura 3.17. Resultados obtenidos de las curvas de polarización potenciodinámica realizadas. Velocidad de barrido 1 mV/s.

La **Figura 3.18** muestra una picadura detectada sobre la superficie del acero inoxidable AISI 304 mediante MEB después de una curva de polarización en agua de mar, 20°C.

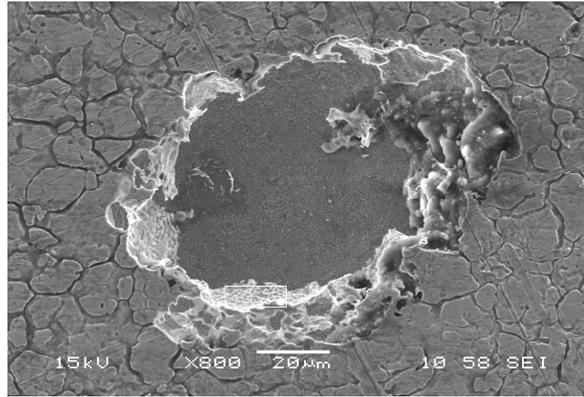


Figura 3.18. Picadura formada sobre la superficie del acero inoxidable AISI 304 detectada con SEM. Electrolito: agua de mar (35 ‰).

La **Tabla 3.3** muestra los valores medios de potencial de picado y los valores máximo y mínimo de cada experimento para el acero 430 y 304 que corresponden a la **Figura 3.17**.

Tabla 3.3. Valores de potencial, medio, máximo y mínimo para los aceros estudiados.

Material/condición	Máximo	Mínimo	Media	Salinidad ‰
304 mar	430	320	390	35
304 río	485	370	420	30
304 mar (7°C)	470	415	445	35
304 río (7°C)	540	430	485	30
304 mar sin O ₂	420	390	405	35
304 río sin O ₂	435	400	420	30
430 mar	325	170	250	35
430 río	380	225	280	30
430 mar (7°C)	410	280	315	35
430 río (7°C)	360	300	330	30
430 mar sin O ₂	280	200	250	35
430 río sin O ₂	250	220	240	30

3.3.2. Estudios en campo

3.3.2.1. Zona atmosférica

Todos los materiales expuestos en esta zona presentaron corrosión localizada por picado a excepción del aluminio anodizado. Las **Figuras. 3.19-3.22** muestran el aspecto superficial de las probetas expuestas en la zona.



Figura 3.19. Probetas de aluminio 1370 expuestas en la zona atmosférica.



Figura 3.20. Probetas de aluminio anodizado expuestas en la zona atmosférica.



Figura 3.21. Probetas de acero inoxidable AISI 304 expuestas en la zona atmosférica.



Figura 3.22. Probetas de acero AISI 430 expuestas en la zona atmosférica.

Observaciones y análisis de superficie mediante SEM

Aluminio 1370

La superficie de las probetas de aluminio presentó corrosión localizada distribuida en toda la superficie. La presencia de corrosión se detectó después de 244 días de exposición. En la **Figura 3.23 a** se muestra el aspecto superficial de una de las probetas de aluminio expuestas en la zona atmosférica observadas mediante SEM. En **Figura 3.23 b** se presenta otra fotografía, con mayor resolución, donde se observa la presencia de picaduras de diferentes tamaños.

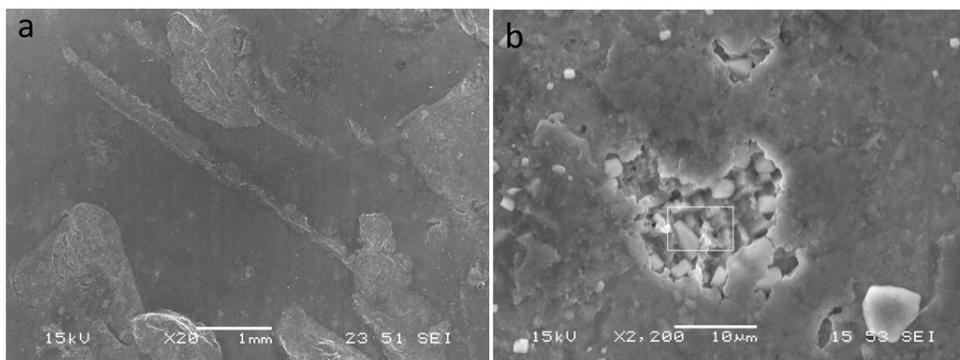


Figura 3.23. Aspecto superficial de la probeta de aluminio expuesta en la zona atmosférica marina en el muelle Luis Piedra Buena, Puerto Madryn, Chubut.

Aluminio anodizado

La superficie del aluminio anodizado expuesto en la zona atmosférica no mostró la presencia de corrosión localizada, a excepción de algunas zonas donde se observó un inicio de un proceso de corrosión (**Figura 3.24 a** y **Figura 3.24 b**), que podría deberse al efecto mecánico de choque de partículas en el aire, probablemente arena, que desprendió la capa de óxido superficial durante días de vientos con ráfagas de 70 -80 km /h. En esta zona la película pasiva se hizo discontinua, perdiendo de esta manera su capacidad de reconstrucción. En las fotografías se evidencia la presencia del óxido formado durante el proceso de anodizado, sin embargo, no se observaron partículas de arena incrustadas sobre la superficie.

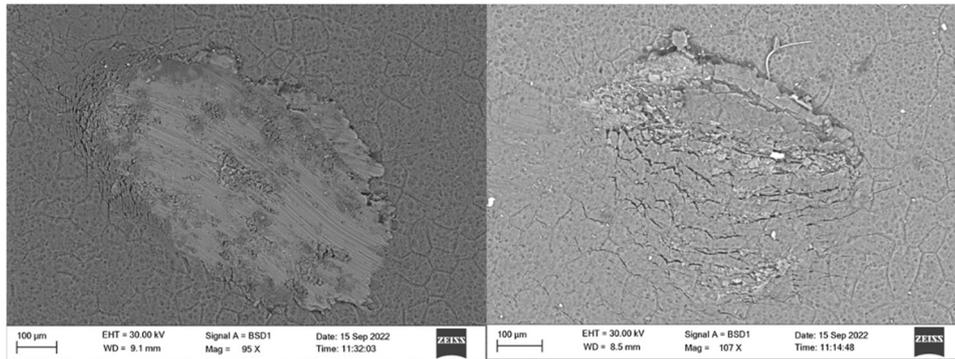


Figura 3.24.a Aspecto superficial del aluminio anodizado expuesto en la zona atmosférica del muelle Piedra Buena.

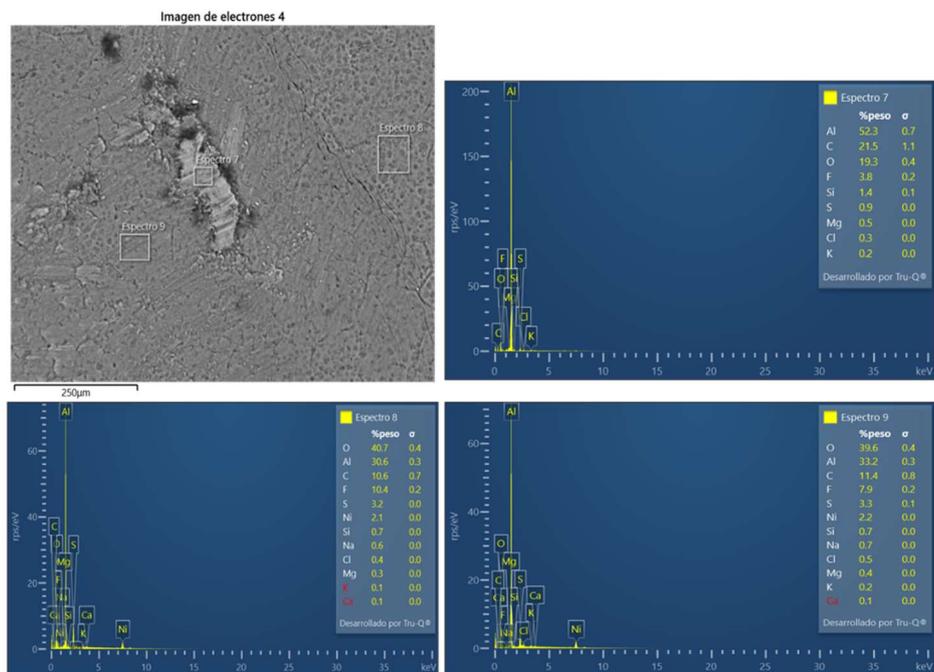


Figura 3.24 b. Aspecto superficial del aluminio anodizado y análisis de componentes de las probetas expuestas en la zona atmosférica del muelle Piedra Buena.

Acero Inoxidable AISI 304

El fenómeno de corrosión se manifestó en las probetas de AISI 304 después de 197 días de exposición (**Figura 3.21** y **figura 3.25**). La corrosión se mostró en forma de picaduras distribuidas en la superficie. La **Figura 3.26** muestra la superficie del material y se evidencian diversas picaduras. En la misma figura se muestra el análisis químico (EDS) efectuado en una zona externa, cercana a las picaduras. Se observa la presencia de los elementos integrantes del acero inoxidable (Fe, Cr y Ni), el oxígeno integrante del óxido superficial y elementos provenientes de la atmósfera marina (Cl, Mg, S, Ca, K, C).

Acero Inoxidable AISI 430.

En las probetas de acero AISI 430, los problemas de corrosión por picado se observaron 60 días antes que en las muestras de AISI 304 (después de 137 días de exposición). La corrosión se manifestó en forma de picaduras distribuidas en forma aleatoria sobre la superficie metálica. La corrosión fue intensa, en particular, en la cara de la muestra expuesta al noreste (orientación del bastidor: noreste al sureste), siendo esta dirección la predominante de los vientos (del oeste hacia este, según estación meteorológica del Aeropuerto Almirante Marcos A. Zar). La **Figura 3.27** muestra la superficie del acero AISI 430, donde se evidencia la presencia de corrosión por picado.

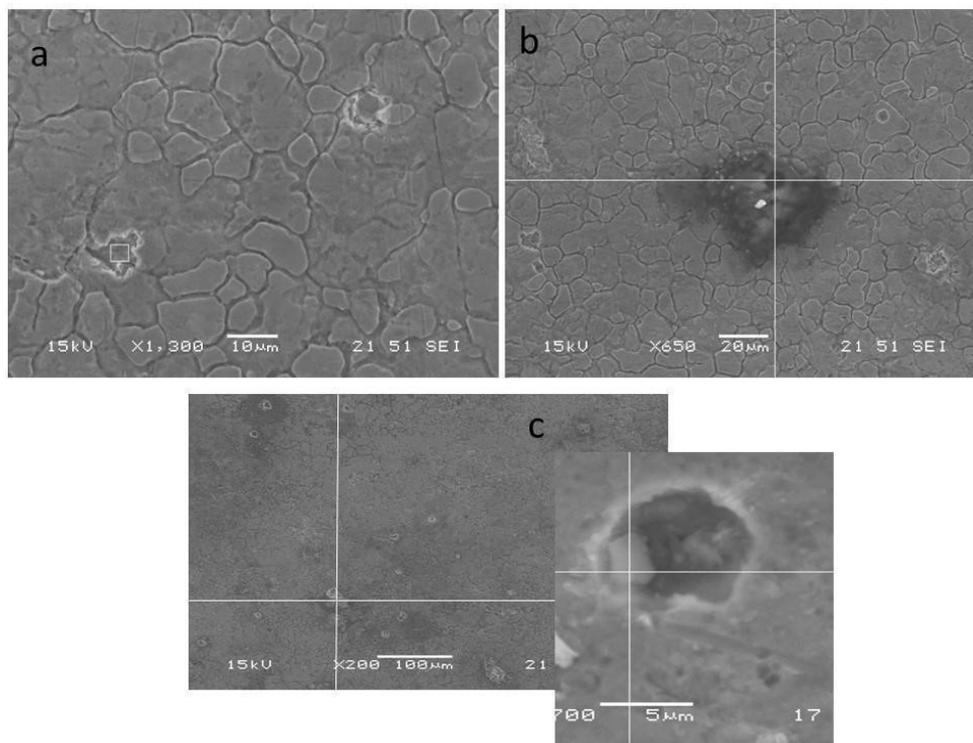


Figura 3.25. Superficie del acero inoxidable AISI 304 vista con microscopía electrónica: a) muestra general con resolución 10 µm y el análisis del detalle, b) resolución 20 µm, c) resolución 100 µm.

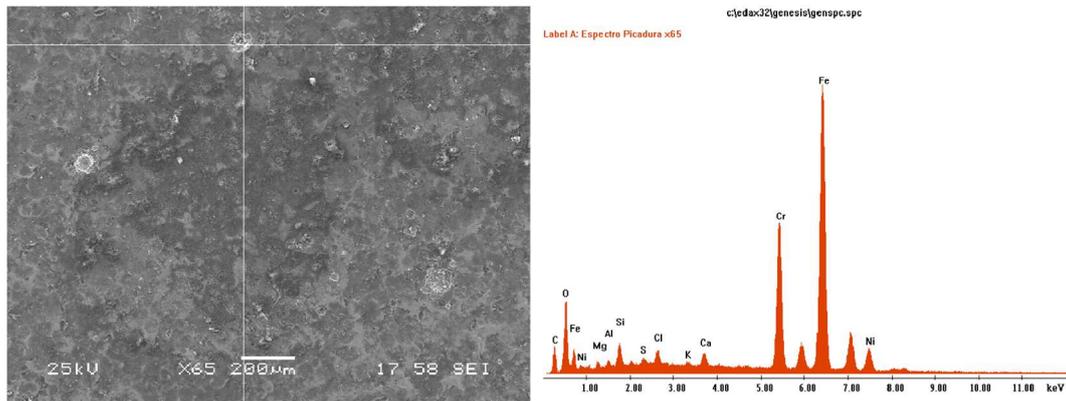


Figura 3.26. Muestra de acero 304 expuesto en la zona atmosférica: análisis de superficie y composición química de la zona señalada.

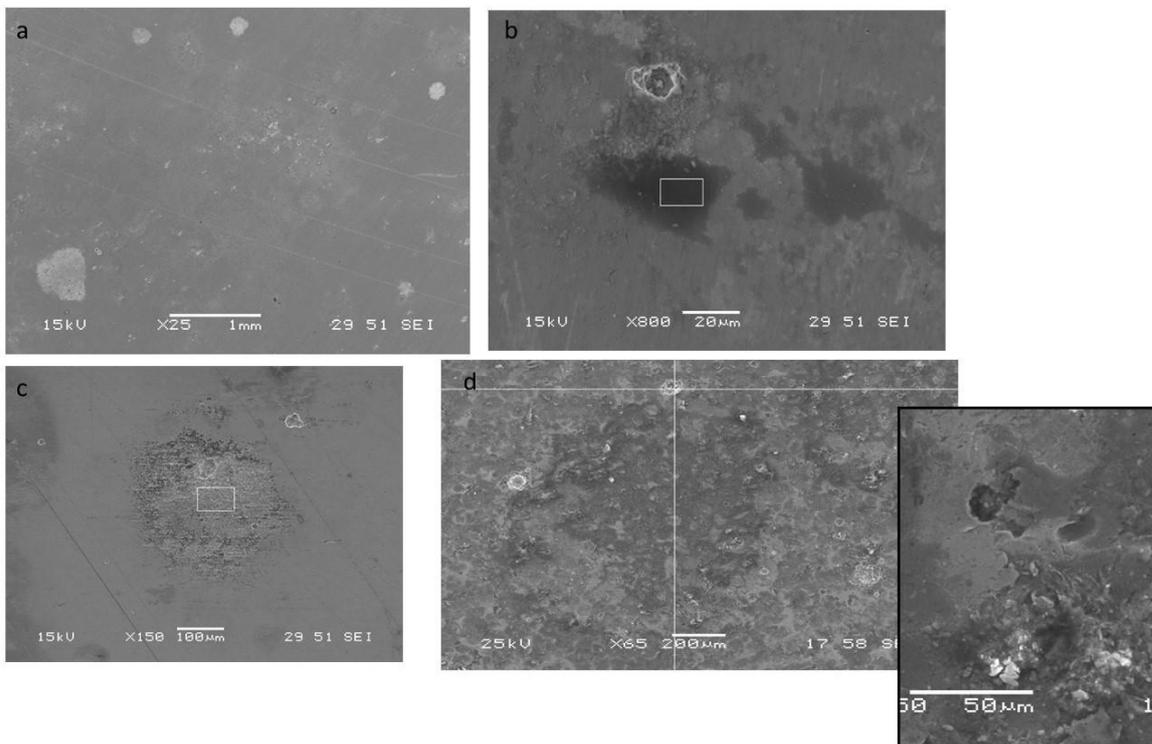


Figura 3.27. AISI 430 zona atmosférica: a) muestra general de baja resolución (1 mm), b) resolución de 20 µm, c) resolución 100 µm, d) vista con mayor resolución (200 µm).

Comparando el aspecto superficial de los materiales expuestos en zona atmosférica, se observó que, en la probeta de aluminio, la profundidad de las picaduras resultó superior respecto a la observada en las probetas del acero AISI 430. En las probetas de acero AISI 304, la corrosión en forma de picadura estuvo distribuida en la superficie con menor intensidad con respecto a la muestra del acero inoxidable AISI 430. Como se mencionó en el caso de los resultados de las pruebas de laboratorio, los valores menores evidencian el comportamiento del acero inoxidable AISI 430 comparado con el del acero AISI 304, atribuido a las características de la película pasiva.

Los resultados muestran que los materiales examinados, a excepción del aluminio anodizado, no han mostrado un comportamiento satisfactorio a la corrosión atmosférica marina de la zona del muelle Piedra Buena en Puerto Madryn.

3.3.2.2. Zona intermareal

Las probetas estuvieron expuestas a la atmósfera marina desde marzo 2021 a junio 2022. Las **Figuras 3.28-3.32** muestran el aspecto superficial de las probetas. En esta región se agregaron dos probetas de aluminio anodizado con revestimiento orgánico (pintura en polvo de poliéster). Debido a que el acero 430 es más susceptible que el acero 304, se colocó adhesivo epoxi en los bordes de estas probetas para evitar que los productos derramen sobre la parte central.



Figura 3.28. Aspecto superficial de las probetas de aluminio 1370 expuesta en la zona intermareal del muelle Luis Piedra Buena.



Figura 3.29. Aspecto superficial de la probeta de aluminio anodizado expuesta en la zona intermareal del muelle Luis Piedra Buena.



Figura 3.30. Aspecto superficial de las probetas de aluminio anodizado con un revestimiento orgánico expuestas en la zona intermareal del muelle Luis Piedra Buena.



Figura 3.31. Aspecto superficial de las probetas de acero inoxidable AISI 304 expuestas en la zona intermareal del muelle Luis Piedra Buena.



Figura 3.32. Aspecto superficial de las probetas de acero inoxidable AISI 430 expuestas en la zona intermareal del muelle Luis Piedra Buena.

Aluminio 1370

El aluminio en esta zona sufrió corrosión por picado. En la **Figura 3.33** se exhibe una zona de la superficie de la muestra, donde se observa la presencia de corrosión localizada por picado distribuida en toda la superficie de la probeta.

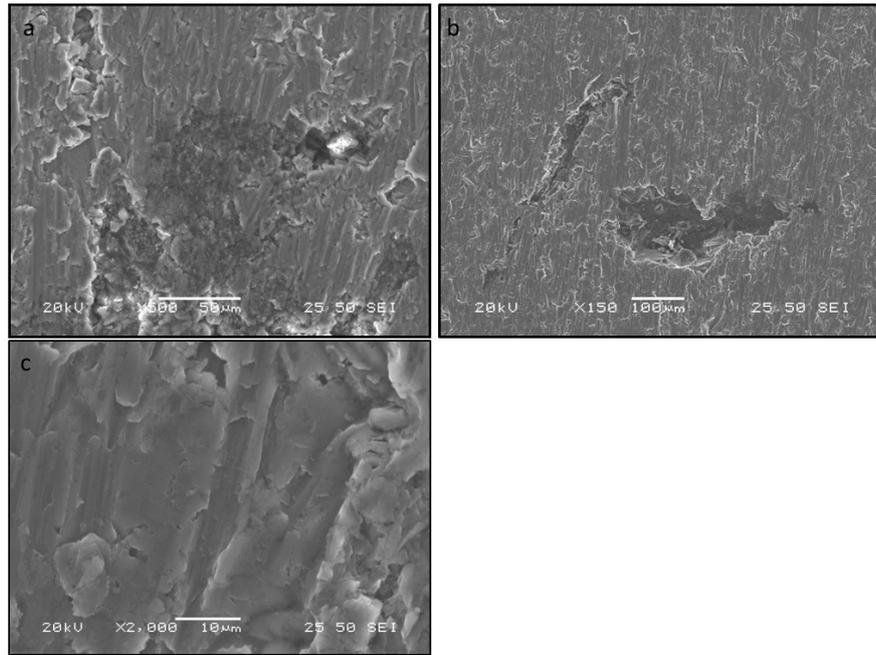


Figura 3.33. Probeta de aluminio expuesta en la zona intermareal, muelle Luis Piedra Buena.

Aluminio anodizado

Las probetas de aluminio anodizado no presentaron corrosión por picado (**Figura 3.34**). Por otra parte, se observaron zonas con depósitos de origen orgánico (ensuciamiento biológico), evidenciados en el análisis de superficie por una significativa señal de carbono. Estos depósitos fueron removidos con papel de lija de 1000 grados y posterior lavado con detergente. Las observaciones realizadas con el microscopio electrónico de barrido, después del proceso de remoción de los depósitos, revelaron corrosión localizada bajo los depósitos de origen biológico (**Figura 3.35**). En las zonas libres de depósitos no se observó corrosión. Por lo tanto, se infiere que el mecanismo de corrosión fue de tipo 'bajo depósito'. En presencia de depósitos se produce la reacción de reducción del oxígeno sobre toda la superficie metálica debajo del mismo, y al consumirse y no poder ser reemplazado debido a la lentitud de los procesos difusivos, disminuye la reacción catódica hasta desaparecer. En consecuencia, el proceso catódico se localiza exclusivamente afuera del depósito mientras que la disolución del metal se localiza bajo el mismo. Se origina en esta forma una celda de aireación diferencial en la cual, la superficie debajo del depósito se convierte en ánodo y aquella externa en cátodo. Contemporáneamente, se produce una transferencia electroforética de aniones cloruros, del lado externo hacia el lado interno, para balancear las cargas positivas provenientes de la disolución metálica.

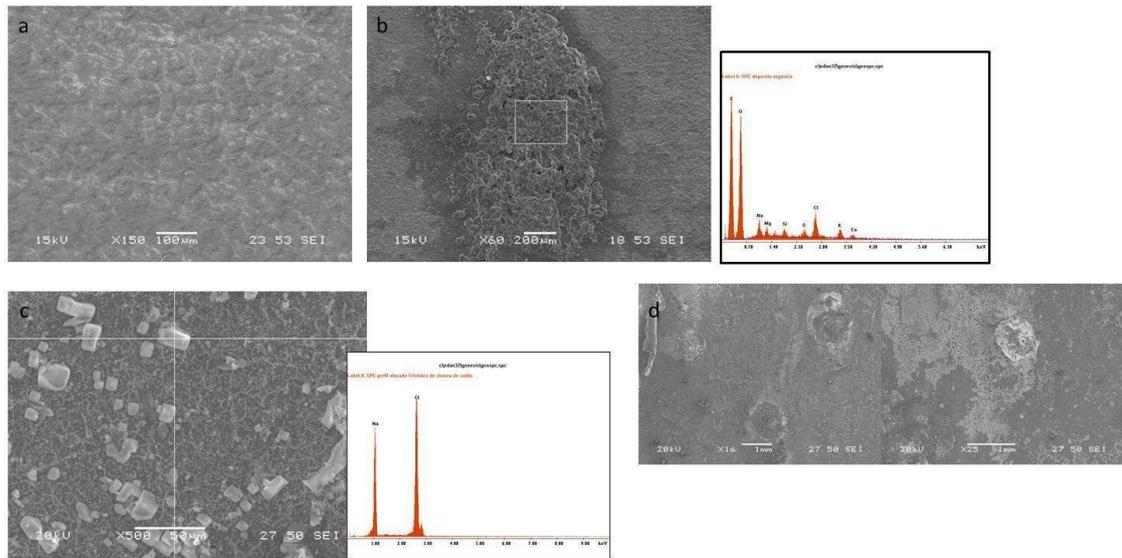


Figura 3.34. Aluminio anodizado expuesto en la zona intermareal, antes de la limpieza de la zona cubierta con ensuciamiento. a) zona sin depósitos superficiales: no se observó corrosión; b) zonas con depósitos superficiales de origen orgánico/biológicos (análisis EDS) d) depósitos superficiales (fotografía de resolución 1 µm).

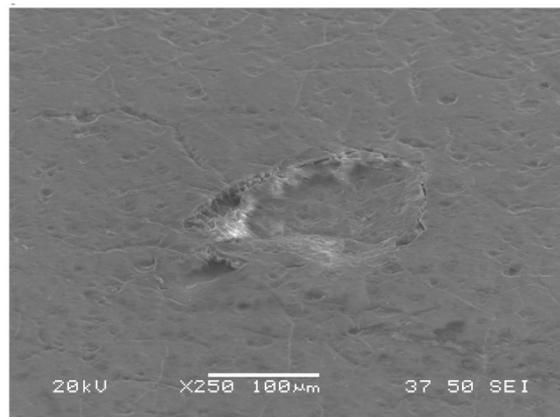


Figura 3.35. Aluminio anodizado luego de la limpieza. Se observa corrosión intersticial en el lugar donde se presentaron los depósitos orgánicos.

Sobre las muestras de aluminio revestido (con pintura en polvo de poliéster) tampoco se observaron picaduras; si un ligero cambio de color (tinte marrón) debido probablemente a ensuciamiento orgánico/inorgánico (**Figura 3.36**). Esta figura muestra la superficie del material examinada con microscopía y el análisis de elementos en el sector marcado. Se observa la presencia de óxido de Ti correspondiente a la pintura.

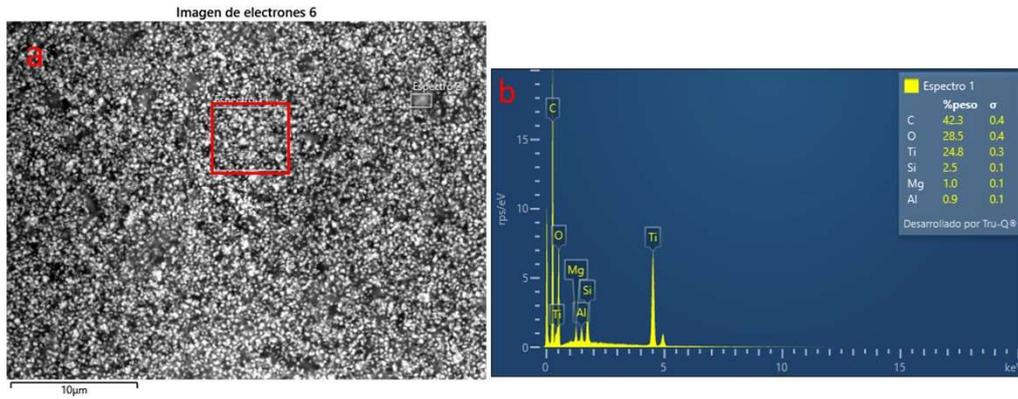


Figura 3.36. a) aspecto superficial del aluminio con revestimiento orgánico; b) análisis de componentes de las probetas expuestas en la zona intermareal del muelle Piedra Buena.

Acero Inoxidable AISI 304

El acero AISI 304 sufrió corrosión por picado debajo de la arandela usada para fijación de la probeta al bastidor. La corrosión fue del tipo intersticial y se expandió hacia la parte inferior de la probeta. La corrosión por picado se observó en la superficie de ambos lados y en el borde de la probeta (**Figuras 3.37**). La **Figura 3.38** muestra el análisis superficial (EDS) en zona corroída. En este espectrograma se puede apreciar la intensidad de los elementos presentes, como Fe, Cr, Cl, Na.

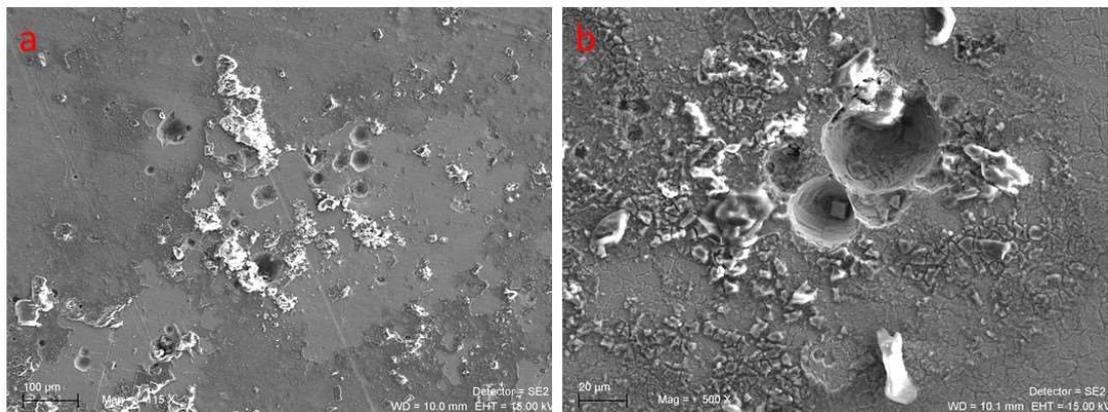


Figura 3.37. Aspecto superficial de una zona del acero AISI 304, observada por microscopía electrónica (SEM), dos resoluciones, a) resolución 100 µm, b) 20 µm, probetas expuestas en la zona intermareal del muelle Piedra Buena.

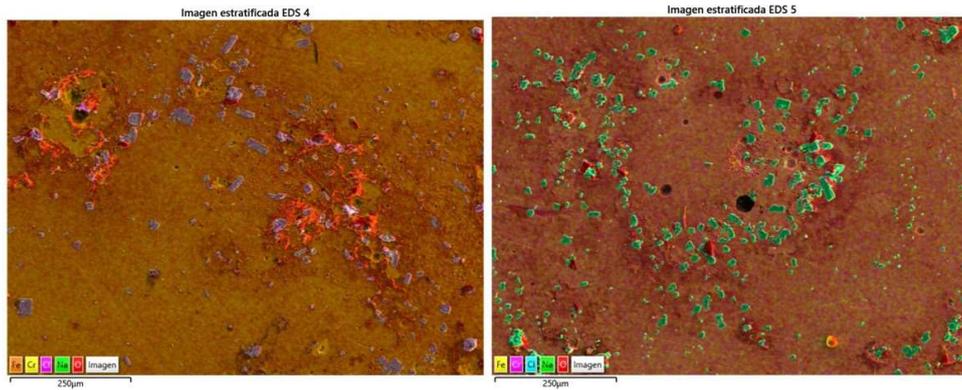


Figura 2.38. Análisis de elementos realizados en la zona corroída de la probeta de acero AISI 304 expuesta en la zona intermareal del muelle Piedra Buena.

Acero Inoxidable AISI 430

Este acero también sufrió corrosión por picado, con mayor densidad de picaduras y de productos de corrosión con respecto a todos los otros materiales examinados (**Figuras 3.39**), evidenciando, también en estas pruebas, una menor resistencia a la corrosión localizada. Se observa mayor ataque en una de las caras de las probetas con respecto a la otra, y la presencia de una zona de pequeñas dimensiones cubierta por ensuciamiento biológico. El óxido se acumuló en la zona de los bordes de la probeta revestida con resina epoxi colocada para su protección, (**Figura 3.29**). La **Figura 3.40** muestra el análisis superficial (EDS) en zona corroída. En este espectrograma se puede apreciar la intensidad de los elementos presentes, como Fe, Cr, Cl, Na y O

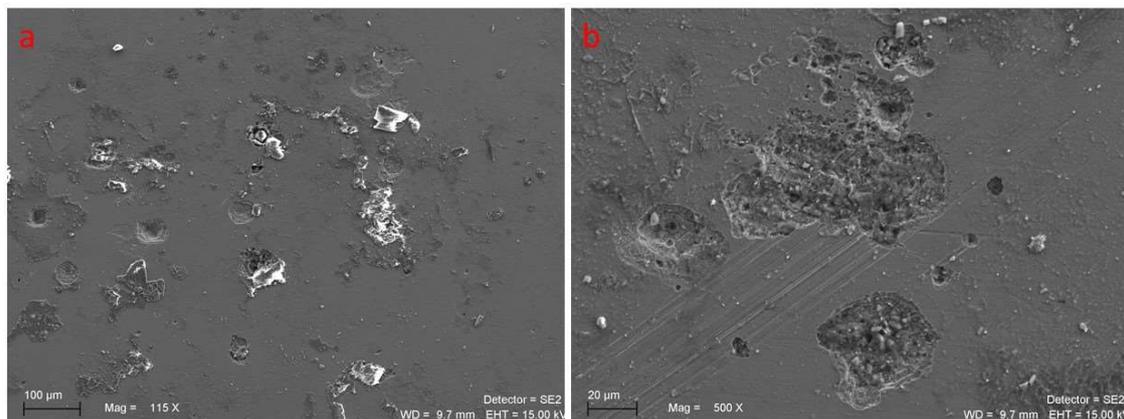


Figura 3.39. Aspecto superficial de una zona del acero AISI 430, observada por microscopía electrónica (SEM), bajo dos resoluciones: a) resolución 100 µm; b) resolución 20 µm, probetas expuestas en la zona intermareal del muelle Piedra Buena.

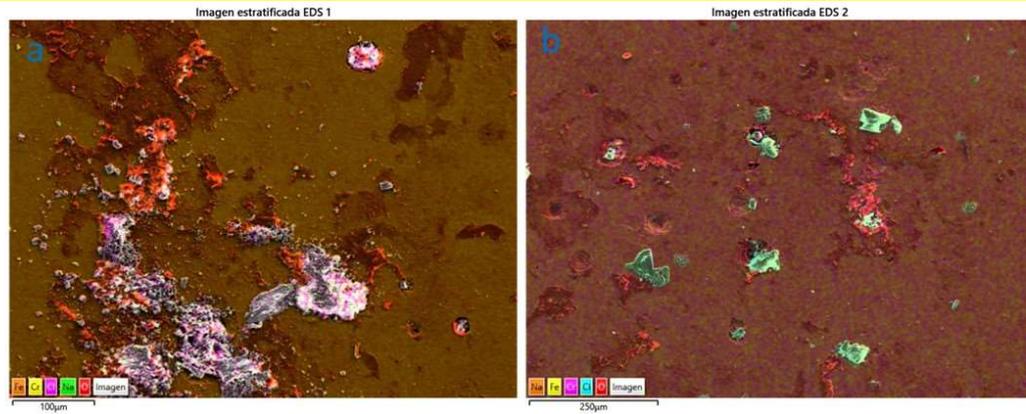


Figura 3.40. Análisis de elementos en la zona corroída para acero AISI 430 a) resolución 100 µm, b) resolución 250 µm.

Como se mencionó en el caso de los resultados de las pruebas de laboratorio y de los materiales expuestos al ambiente en el muelle Piedra Buena, el inferior comportamiento del acero inoxidable AISI 430 comparado con el del acero AISI 304 es debido a las características de la película pasiva. La resistencia a la corrosión es atribuida, principalmente, a la presencia de cromo y de níquel en la aleación (Boccolari *et al.*, 2007, Boccolari *et al.*, (2009).

En cuanto a aspectos de impacto ambiental, tanto los aceros inoxidables como el aluminio anodizado son reciclables, lo que resulta positivo tanto para favorecer una producción sostenible, de bajo impacto ambiental, como para lograr un ahorro económico considerable. Sin embargo, el acero es menos reciclable que el aluminio y el proceso es más costoso. El aluminio puede reciclarse indefinidamente sin perder sus propiedades (maleabilidad, durabilidad) con un ahorro de energía utilizada en su producción. Sin embargo, durante el proceso de reciclado se pierde la capa anodizada.

3.4 Conclusiones

Se establecieron algunas consideraciones relativas a alcances y límites del empleo de ciertos materiales metálicos en ambiente marino para la construcción de plataformas, estructuras conexas, sistemas complementarios de sujeción y soporte y partes de equipos hidrocineéticos (rotor, carcasa). Los materiales seleccionados fueron dos aceros inoxidables convencionales tipo AISI 304 y AISI 430, aluminio y aluminio anodizado. El comportamiento a la corrosión de estos materiales fue estudiado en laboratorio, mediante técnicas electroquímicas, en agua de mar (Golfo Nuevo) y agua de la desembocadura del Río Chubut, y en campo con exposiciones *in situ* en zona atmosférica e intermarial completadas con estudios de análisis superficial.

Los dos aceros inoxidables y el aluminio sufrieron corrosión por picado en los electrolitos de estudio y en las probetas expuestas *in situ*. En todas las condiciones de trabajo, en laboratorio, el potencial de picado del acero inoxidable

AISI 304 fue mayor al potencial del AISI 430 debido a su mayor resistencia a la corrosión por picado, determinada principalmente por la presencia de níquel que retarda la formación de picaduras (Boccolari *et al.*, 2007, Boccolari *et al.*, 2009). El aluminio anodizado, por el contrario, no presentó corrosión por picado en los estudios realizados en laboratorio respecto a los materiales estudiados *in situ*, solamente se observó corrosión debajo de depósitos biológicos en la zona intermareal. El comportamiento a la corrosión de los materiales en las pruebas de laboratorio mostró una muy buena correlación con el comportamiento de los materiales expuestos *in situ*. Del análisis de los resultados, se concluye que el material menos resistente a la corrosión localizada fue el aluminio y el más resistente el aluminio anodizado. Un comportamiento intermedio fue presentado por los aceros, resultado a subrayar ya que es frecuente asignar a estos materiales inmunidad a la corrosión en el ambiente marino, condición que no lograron cumplir.

En la sección a continuación, se presentan las conclusiones de los tres temas desarrollados en este trabajo como consideraciones finales.

Consideraciones finales

La producción de energía por medio de las THC es un proceso de conversión energética de carácter renovable; su producción es cuasi-infinita, no genera gases contaminantes de efecto invernadero y es un recurso global. El alto factor de carga debido a las propiedades del fluido (incompresibilidad y densidad del agua) y la característica de predictibilidad de las mareas, hacen a este recurso particularmente atractivo y complementario con respecto a otras energías renovables. Las corrientes de mareas se consideran un recurso para la generación sustentable de energía eléctrica.

Según trabajos previos (Lifschitz *et al.*, 2019, Dragani, 2016), datos obtenidos de las cartas náuticas y de las tablas de mareas del SHN, y el registro de mediciones *in situ*, existe un alto potencial de mareas en la costa de Chubut. Consideraciones territoriales y logísticas permitieron seleccionar cuatro sitios potencialmente idóneos para el emplazamiento de turbinas hidrocinéticas: boca del Golfo Nuevo, boca del Golfo San José, Canal Leones y desembocadura del Río Chubut. Sin embargo, dada la baja potencia y profundidad observada en la desembocadura del río, un emprendimiento de estas características no resultó justificable. Los otros sitios mostraron un alto potencial energético. Aspectos ambientales también considerados para la selección del lugar, como la interferencia de la turbina con el ambiente y la fauna local, la formación de *biofouling* y obturaciones por algas marinas, pueden minimizarse implementando un diseño de rotor adecuado, con baja velocidad de giro y de tamaño reducido. Cabe señalar que es imprescindible, además, realizar el correspondiente estudio de impacto ambiental de acuerdo a la legislación provincial, debido a que la zona tiene áreas protegidas. Este estudio no fue contemplado en los objetivos del trabajo.

La insuficiente información de campo disponible, como mediciones sistemáticas con tecnologías más robustas (ADCP o boyas con seguimiento satelital) y representaciones batimétricas de mayor precisión y resolución resultaron una limitante para los alcances de este trabajo y establece una instancia de mejora de la estrategia considerada. A pesar de esta limitación, los resultados expuestos demostraron la factibilidad de aprovechamiento energético de corrientes mareales en la provincia. La metodología de cálculo de potencia aplicada fue considerada satisfactoria como primera aproximación e indican la existencia de un potencial energético en la provincia, sentando las bases para su explotación.

En esta tesis se propuso un modelo de hélice de carácter exploratorio y bajo costo de construcción. La hélice diseñada pivotea con el cambio de dirección de las corrientes mareales, a media agua, con potencia de diseño 2200 W y velocidad nominal de 2 m/s. Para evitar pérdidas en el desempeño del rotor por la formación de *biofouling*, se utilizó el perfil NACA 2412 que puede soportar alteraciones en su geometría. Para minimizar o evitar el fenómeno de cavitación, se definió una velocidad crítica de rotación de las palas, controlada por el generador del sistema.

Se diseñó una pala trapezoidal con distribución de cuerda lineal, más fácil de construir, con un costo menor. Esta forma de la pala también fue utilizada por Coiro *et al.*, (2006), Ismail *et al.*, (2023), y Batten *et al.*, 2006. Con el objetivo de aumentar la velocidad de flujo a la velocidad de diseño en los lugares donde ésta resulto baja, se implementó una tobera. Se observó una mejora notable en la potencia del rotor de un 84 %. Además, este artefacto se utilizó para entubar la hélice y de esta manera despreciar efectos de punta tridimensionales y como elemento de flotabilidad positiva y protección del sistema. Se planteó un sistema de arranque simple, autónomo y sencillo sin carga en el eje, donde el perfil de la raíz de la pala es útil en el arranque aportando cupla al rotor y no potencia. Otros métodos de arranque, como alerones, control de *pitch* o usando el generador como motor, aumentan los costos y la complejidad de diseño. Los parámetros hidrodinámicos calculados con la teoría BEM, permitieron plantear las bases de diseño de un prototipo de rotor y definir los problemas a afrontar en el ambiente marino. Este método fue utilizado por varios autores, como Batten *et al.*, 2006 Batten *et al.*, 2008, Da Silva *et al.*, 2015, Nachtane *et al.*, 2019, Mukherji, 2010, Bakırcı and Sezayi, 2018.

El problema de corrosión en ambiente marino fue abordado mediante el estudio en laboratorio y la exposición en campo de dos aceros inoxidable convencionales tipo AISI 304 y AISI 430, aluminio 1370 y aluminio anodizado. Las exposiciones in situ y las pruebas electroquímicas realizadas en laboratorio, han evidenciado que el material menos resistente a la corrosión localizada fue el aluminio y el más resistente fue el aluminio anodizado. Un comportamiento intermedio fue presentado por los aceros, resultado que evidencia que los mismos pueden sufrir corrosión localizada dependiendo del ambiente de trabajo. Se destaca este resultado pues es frecuente asignar a estos materiales inmunidad a la corrosión en ambiente marino. Las pruebas indican que estos aceros no podrían usarse en componentes críticos, como por ejemplo en componentes de una THC, donde una perforación por un proceso de corrosión por picado es tema de seguridad, disminución de vida útil y pérdidas económicas.

En este estudio se diseñó y analizó el desempeño de un prototipo de rotor donde se tuvieron en cuenta consideraciones ambientales y operativas como cavitación, *biofouling* y corrosión de sus partes metálicas. El efecto del sistema sobre el ambiente se deberá evaluar mediante un futuro estudio de impacto ambiental, que considere, entre otras cuestiones, la contaminación sonora del dispositivo. Esta tarea no estuvo contemplada en los objetivos de esta tesis, pero constituyen una importante línea de trabajo.

Considerando que la dinámica de las corrientes de mareas en proximidad de las costas es compleja, con velocidades de flujo no uniformes en intensidad y dirección, los cálculos presentados deben tomarse como una primera instancia de estudio. Este trabajo permitió estimar la magnitud de la densidad de potencia en los sitios elegidos en la costa de Chubut y realizar un análisis de forma y tamaño de las palas de una turbina hidrocínética.

Referencias bibliográficas

- Ali Khan, M. Z., Ali Khan, H. y Aziz, M (2022). Harvesting Energy from Ocean: Technologies and Perspectives. *Energies* 2022, 15(9), 3456; <https://doi.org/10.3390/en15093456>.
- Aluminum Anodizers Council, (2022). Anodizing Essentials Class. <https://www.anodizing.org/>
- Abbott Ira and Von Doenhoff Albert. (1959). Theory of wing sections, Including a Summary of Airfoil Data. DOVER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK. https://www3.nd.edu/~ame40431/AME2021_2021/Other/AbbottDoenhoff_TheoryOfWingSectionsIncludingASummaryOfAirfoilData.pdf
- Adcock, T. A. A. and Draper, S. (2014). Power extraction from tidal channels – Multiple tidal constituents, compound tides and overtides. *Renewable Energy*, 63(0), 797–806.
- Alidadi, M. (2009). Duct Optimization for a ducted vertical axis hydro current turbine. Doctoral Thesis, Faculty of Engineering and Applied Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0067284>
- Ambarita E. E., Harinaldi, N. and Irwansyah R. (2021). A Study on Diffuser Augmentation of a Tidal Turbine. *Journal of advance research on Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfmts.83.1.170177>
- Aqua-RET. (2003). Available on line at: (<http://www.aquaret.com/images/stories/aquaret/pdf/cstshammerfeststrm.pdf>).
- ASTM G52 (Standard Practice for exposing and evaluating metals and alloys in surface seawater) <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmg52002011>
- ASTM G46-94 (Standard Guide for examination and evaluation of Pitting Corrosion) <https://www.astm.org/g0046-94r18.html>
- Baulange-Petermann L., De Cristófaró N. (2002). Improvement of the cleanability and disinfection of stainless steel surfaces for the food industry (dairy and meat). *Technical Steels Research Series*. EUR 20476 EN.
- Badea, I., Pricop, M. V., y Bobonea, A. (2014). Design procedure and numerical analysis of a small horizontal-axis hydrokinetic turbine. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 76(3). Recovered from <http://www.researchgate.net/publication/265122794>.
- Barclay V. M., Neill, S., and Angeloudis A. (2023) Tidal range resource of the Patagonian shelf, *Renewable Energy*, Volume 209. ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.001>.
- Bastianon R. A. (2008). Calculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas. <http://Ricardo.Bastianon.googlepages.com/>.
- Batten W.M.J, Bahaj A.S., Molland A.F y Chaplin J.R. (2006) Hydrodynamics of marine current turbines. *Renewable Energy* 31 (2006) 249–256.

- Batten W., M., J., Bahaj A., S., Molland A., F., Chaplin, J., R., (2008). The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines *Renewable Energy* 33 (2008) 1085–1096
- Bakırcı, M. and Sezayi, Y. (2018). Theoretical and computational investigations of the optimal tip-speed ratio of horizontal-axis wind turbines. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 21 (2018) 1128–1142.
- Benelghali S., Benbouzid M., y Charpentier Jean Frédéric. (2007). *Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Status*. IEEE IEMDC'07, Antalya, Turkey. Pp.1407-1412. hal-00531255.
- Betz A., (1927). *Die Windmühlen im Lichte Neuerer Forschung*. *Naturwissenschaften*, XV, p. 905.
- Bhuiyan, M., A., Khare, V., Hamaguchi, Y., Thakur, B., K. and Rahman, M., K. (2022) Economic feasibility of marine renewable energy: Review. *Front. Mar. Sci.* 9:988513. doi: 10.3389/fmars.2022.988513
- Bianchi, D., Mazzaroppi M., and De Cristóforo, N. (2004). Effect of Oxygen Content, Temperature, Turbulence and Salinity on the Corrosion of a Structural Steel in Substitute Sea Water. *Eurocorr Balatonfured*, Hungary,
- Biancucci, M. y Labriola C. (2007). Propuesta para generación combinada eólico-mareomotriz en la Patagonia. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/92909/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bindelli, L., Kazimierski, L., y Re M. (2020). Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica: Modelos numéricos y potencial energético. Proyecto Instituto Nacional del Agua - Informe LHA 02-372-18, Ezeiza. <https://www.researchgate.net/publication/341255158>.
- Boccolari, S., De Cristofaro N., Franchi, M., Pileggi, R. (2007). *Associazione. Pasividad y rotura de la pasividad por corrosión localizada de aceros inoxidables martensíticos Ni-free* Associazione Italiana di Metallurgia, Ferrara, Italia.
- Boccolari, S., De Cristofaro, N., Paris, V. (2009) *Comportamiento activo-passivo dell'acciaio inossidabile ferritico 1.4521 in soluzioni neutre e acide*. Jornadas de Corrosión, Associazione Italiana di Metallurgia, Udine, Italia.
- Boulangé Petermann, L., Guio, M., J., Benezech, T., Faille, C., Jullien, C., Bellon-Fontaine, M., N., De Cristofaro, N. (2001). *Improvemente of the cleanability and disinfection of stainless steel surfaces for the food industry (dairy and meat)* ISSN 92-894-4297-2 EUR 20476 EN
- Boulangé Petermann, L., Guio, M., J., De Cristofaro, N., Benezech, T., Faille, C. Jullien, C., Bellon-Fontaine, M., N. (2002). *Improvement of the cleanability and disinfection of stainless steel surfaces for the dairy food industry*. 4th European Stainless Steel , Science and Marketed Congress, Junio 10-13, 2002, Paris , France.
- Buchanan, T., J. and Somers, W., P. (1976). *Techniques of Water- Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Chapter A8: Discharge Measurements at Gaging Stations. USGC.
- Cardona-Mancilla, C., Sierra del Río, J., A., and Hincapié Zuluaga, D., A. (2017). *Computational Hydrodynamic Analysis of Horizontal-Axis Hydrokinetic Turbine*

With and without Diffuser. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 7 (2017) pp. 1178-1181. Research India Publications. <http://www.ripublication.com> 1178.

- Cardona-Mancilla, C., Sierra, J., Chica, E. y Hincapié-Zuluaga, D. (2018): Turbinas hidrocínicas de eje horizontal: una revisión de la literatura - Tecnología y Ciencias del Agua 09(3):180-197. DOI - 10.24850/j-tyca-2018-03-08.
- Castro-Santos and Haro A. (2015) Survival and Behavioural Effects of Exposure to a Hydrokinetic Turbine on Juvenile Atlantic Salmon and Adult American Shad. Estuaries and Coasts 38. S203–S214 DOI 10.1007/s12237-013-9680-6.
- Catálogo GEMA (2018). <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/tesis/articulos-cientificos/>
- Castelao Caruana, M., E. (2019). La energía renovable en Argentina como estrategia de política energética e industrial. Prob. Des vol.50 no.197 Ciudad de México abr./jun. 2019 Epub 18-Oct-2019. <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2019.197.64625>
- Chica, E., Perez, F., Rubio-Clemente, A. and Agudelo, S. (2015). Design of a hydrokinetic turbine. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 195, 137-148
- Chingotto, M. (2005). Energía mareomotriz. ¿Sí? ¿Dónde? ¿No? ¿Por qué? Conclusiones. Boletín del Centro Naval Número 813 enero/abril de 2006 Recibido: 7.7.2005. www.centronaval.org.ar/boletin/BCN813/813chingotto.pdf
- Coiro, D.P., Nicolosi, F., De Marco, A., Melone, S., and Montella, F. (2005). Dynamic behavior of novel vertical axis Tidal current turbine: Numerical and experimental investigations. Proceeding of 15th Internet Offshore and Polar Engin. Conference Seoul, Korea, Jun 19-24, Vol. 1.
- Coiro, D., P., Maisto, U., Scherillo, F., Melone, S., Grasso, F. (2006). Horizontal axis Tidal Current Turbine: Numerical and Experimental Investigations, Proceeding of offshore wind and other marine renewable energies in Mediterranean and European seas, European seminar, Rome, Citeseer.
- Coiro D. P., Troise G. and Bizzarrini N. (2018a). Experiences in Developing Tidal Current and Wave Energy Devices for Mediterranean Sea. TECHNOLOGY REPORT article. Front. Energy Res., 12 December 2018. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00136>
- Coiro, D., P. (2018b). Introduction to current energy. [Material del aula]. Curso: Energías Renovables y Contaminación Sonora. Universidad Tecnológica Nacional, Regional Chubut.
- Contreras, A., Oseguera Chazaro, M. y Flores Irigollen, A. (2014). Estimado Grueso de Energía Cinética en la Corrientes Marinas de La Ensenada de la Paz. Departamento Académico de Ingeniería en Pesquerías de la Universidad Autónoma de Baja California Sur Ciencia desde el Occidente | Vol. 1 | Núm. 1 | marzo 2014.
- Corda, S. (2017). Introduction to aerospace engineering with a flight test perspective. Wiley. SBN 9781118953372 (epub) | ISBN 9781118953389.
- Da Silva, P., A., S., F., Daiki Shinomiya, L., de Oliveira, T., f., Rogério Pinheiro Vaz, J., Amarante Mesquita, A., L., and Pinho Brasil Junior, A., C. (2015). Design of Hydrokinetic Turbine Blades Considering Cavitation. The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015 Energy Procedia 75 (2015) 277 – 282
- De Cristóforo, N., Piantini, M., and Zacchetti, N., (1997). The influence of temperature on the passivation behaviour of a super duplex stainless steel in a boric –borate buffer solution. Corrosion Science. 12.

- De Cristóforo, N., Piantini M., Zacchetti N., (1999). Effect of surface finish on the passivity and passivity breakdown of austenitic AISI 304 stainless steel. Proceedings of the International Stainless Steels '99-Chia Laguna, Sardinia.
- De Cristóforo, N., and Menegali, D. (2000). “Effetto del trattamento di finitura superficiale sul comportamento attivo-passivo dell'acciaio inossidabile AISI 304” (2000). AIMAT, Spoleto, 17-21 Julio (2000).
- Dembicz, K. (2008). Sociedades locales y desarrollo territorial en América latina frente a los desafíos del siglo XXI. CESLA. ISBN 83-89251-44-2. https://www.researchgate.net/profile/Katarzyna-Dembicz/publication/262187927_SOCIEDADES_LOCALES_Y_DESARROLLO_TERRITORIAL_EN_AMERICA_LATINA_FRENTE_A_LOS_DESAFIOS_DEL_SIGLO_XXI/links/00463536fe2249eecd000000/SOCIEDADES-LOCALES-Y-DESARROLLO-TERRITORIAL-EN-AMERICA-LATINA-FRENTE-A-LOS-DESAFIOS-DEL-SIGLO-XXI.pdf#page=137
- Devalis, C. (2018). Regulación de las energías renovables en la Argentina. Rev. Fac. [online]. 2018, vol.9, n.1 [citado 2023-08-25], pp.1-20. <http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-30612018000100010&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1850-9371.
- Dragani, W. (2006). Estudio de la circulación de las aguas del golfo San Matías mediante la aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos forzados con marea y viento. PROYECTO GEF PATAGONIA SAyDS – Donación FMAM Nro. 28385 AR – PNUD – AR/02/018 INFORME DE AVANCE.
- Dragani, W. C., Lifschitz, A. J., Tedesco, C.; Tomasini, N., Seisdedos, G., Veneciano, M., Galia, F. (2016). Energías Renovables Derivadas del Aprovechamiento de Aguas, Vientos y Biomasa, 2016. ISBN: 9789874610485. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/111295>
- Elliot, D. (2012). Tidal Power. In G. Boyle (Ed.), Renewable energy - Power for a sustainable future. Oxford University Press, 3° edition.
- Electric Power Research Institute Inc., (EPRI) (2005). Ocean Tidal and Wave Energy, Renewable Energy Technical Assessment Guide – TAG-RE. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1010489.
- Fallon, D., Harnett, M., Olbert, A., and Nash, S. (2014). The effects of array configuration on the hydro-environmental impacts of tidal turbines. Renew Energy 2014, 64:10–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.035>.
- Filho, G., L., T., Souza, Z., De Rossi, C. a B. De, Barros, R. M., and Silva, F. D. G. B. Da. (2010). Hydrokinetic turbine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 12, 12094. Recovered from <http://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012094>.
- Fontana, M., G. (1987). Corrosion Engineering, III edition, McGraw-Hill International Editions.
- Gaden, D., L., F., and Bibeau, E., L. (2010). A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydrokinetic turbines using a validated momentum source turbine model. Renewable Energy, 35(6), 1152-1158. Recovered from <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.023>
- Galvele, J., R y Duffó, G., S. (2006). Degradación de Materiales–Corrosión. Monografía Tecnológica No. 3. Instituto Sabato. Universidad Nacional de San Martín. Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires (2006).

- Gill, A., E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series. Volume 30.
- Glorioso, P., D. and Flather, R., A. (1997). The Patagonian Shelf tides. Prog. Oceanog. Vol. 40, pp. 263-283.
- Glorioso, P., D. and Flather R., A. (1995). A barotropic model of the currents off SE South America. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 100, NO. C7, PAGES 13,427-13,440
- Glorioso, P., D. (2000). Patagonian shelf 3D tide and surge model. Journal of Marine Systems 24 (2000). 141-151.
- Gonzalez, P. y Esteves J. L., (2008). Relevamiento de la situación ambiental urbana en la zona costera patagónica / compilado por - 1a ed. - Informe Técnico, Puerto Madryn Fundación Patagonia Natural.
- Google Earth, mapa digital. <https://earth.google.com/web/>
- Grasso, F. (2012). Design and Optimization of Tidal Turbine Airfoil. Article in Journal of Aircraft. DOI: 10.2514/1.C031617
- Guney, M., S. and Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 2996-3004
- Hansen, M.O.L, (2007) Aerodynamics of wind turbines, Routledge. UK.
- Hansen, M., O., L. (2008). Chapter 2 2-D Aerodynamics“, Aerodynamics of wind turbine Second Edition, Earthscan, UK and USA.
- Hayes, M.O. (1979). Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In Leathemar SP (editor). Barrier Island: from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico, Academic Press, New York 1-27. 1979.
- Heusler, K., E. and Fisher, L. (1976). Kinetics of Pit Initiation at Passive Iron. Volume 27, Issue 8 Pages: 551-610, August 1976 <https://doi.org/10.1002/maco.19760270802>
- Hydroquest. Hydroquest smart power solutions, <http://www.hydroquest.net/the-benefits-of-river-currentturbines/?vlang=en>; 2018 [accessed 2019 Mar 11]
- Ibrahim, W., I., Mohamed, M., R., Ismail, M., R., Leung, P., K., Xing W. and Shah, A. (2021). Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review Energy Reports 7 (2021) 2021-2042
- IEA, (International Energy Agency), (2020). Key World Energy Statistics 2020 Statistics report — August. https://iea.blob.core.windows.net/assets/1b7781df-5c93-492a-acd6-01fc90388bof/Key_World_Energy_Statistics_2020.pdf
- IEA, (International Energy Agency) (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA, (International Energy Agency), (2023). Electricity Market Report. <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>
- IEC TS, (2015). TECHNICAL SPECIFICATION Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 201: Tidal energy resource assessment and characterization INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION ICS 27.140 ISBN 978-2-8322-2591-2.
- Industrias Bass. (2018). Informe Ambiental de Proyecto. Ley XI N°35 (antes Ley N° 5439) - Código Ambiental de la Provincia del Chubut. Decreto Reglamentario N° 185/09 -

Anexo III. PROYECTO “Construcción de Muelle Pesquero Corporación Puerto Rawson”. 2018. <http://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2018/10/IAP-Muelle-CPToRW.pdf>.

IRENA, (2020), fostering a blue economy: Offshore renewable energy. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Fostering-a-blue-economy-Offshore-renewable-energy>.

IRENA, (2022). World Energy Transitions outlook <https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>

IRENA, (2023) Las Estadísticas de Capacidad Renovable 2023 <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>.

Ismail, K.A.R., Okita, W.M. and Teggur, M. (2023). Effects of the Hydrofoil Geometry on the Small Horizontal Hydrokinetic Turbines' Performance. Arab J Sci Eng 48, 3681–3695 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07207-4>

ISO, 1985 <https://www.sis.se/api/document/preview/918575/>

ISO, 1463. (2021) Metallic and oxide coatings — Measurement of coating thickness — Microscopical method.

Jacinto, G., Carrizo S. y Gil S. (2018). Energía y pobreza en la Argentina. Petrotecnia 2018 <http://www.petrotecnia.com.ar/junio18/Petro/EnergiaPobreza.pdf>

Jing, F., Wei-jia Ma, Zhang, L., Wang S., Wang X. (2017). Experimental study of hydrodynamic performance of full-scale horizontal axis tidal current turbine. Journal of Hydrodynamics. 2017,29(1):109-117. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60722-9

Khaligh, A. and Onar, O. (2010). ENERGY HARVESTING: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems. Energy, Power Electronics, and Machines Series AH Emadi, Series Editor Taylor and Francis Group, LLC.

Krepper, C. y Rivas, A. (1979). Dinámica de las aguas costeras en Golfo Nuevo. Medición de corrientes en superficies derivantes. Acta Oceanográfica Argentina 2: 83-106.

Labriola, C., V., M. y Peralta, C., E. (2014). Análisis de sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina, <https://doi.org/10.22305/ictunpa.v4i1.43>, junio 2014.

Labriola, C. y Alvarez, J. (2016). Sistemas de Convertidores Fluidodinámicos de Energías Alternativas para la Patagonia Argentina, <https://doi.org/10.22305/ictunpa.v8i3.224>, dic. 2016

Lacal- Arantegui, R, Jaeger-Waldau A, Vellei M, Sigfusson B, Magagna D, Jakubcionis M, Perez Fortes M, Lazarou S, Giuntoli J, Weidner Ronnefeld E, De Marco G, Spisto A, Gutierrez Moles C., Carlsson, J. (2014). Energy Technology Reference Indicator projections for 2010-2050. EUR 26950. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2014. JRC92496

Lazzari, L, y Pedferri P. (2000). Protezione Catodica, McGraw Hill, Milano.

Lee, R.F. and Turnock S.R. (2008). Tidal energy extraction: renewable, sustainable and predictable. Science Progress. Doi: 10.3184/003685008X285582.

Lewis, M., S., P. Neill, P., Robins, M.R., Hashemi, S. Ward. (2017). Characteristics of the velocity profile at tidal-stream energy sites. Renewable Energy.

- Lifschitz, A. J., De Cristóforo, N. B., y Coiro, D. (2019). Algunas consideraciones sobre el potencial energético de corrientes de mareas en el litoral de la provincia de Chubut, Argentina. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) ENERLAC. Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe. Año 2019. No.1 ISSN: 2602-8042 (impresa); 2631-2522 (digital).
- Lifschitz, A. J., Coiro D., Troise, G., Giaquinta H., Lazcano, F., and De Cristofaro N. B., (2022). Kinetic energy of tidal currents in the province de Chubut, Argentina. Vol 5 No 1. International Marine Energy Journal. DOI: <https://doi.org/10.36688/imej.5.11-22>
- López, D. H., Menéndez, M. y Munhos, V. (2021) Diseño y dimensionamiento de un hidroala aplicado al surf. Tesis presentada a la facultad de ingeniería de la universidad de la república. file:///C:/Users/lenovo/Downloads/LMM21.pdf
- Lynn, P., A. (2013). Electricity from Wave and Tide: An Introduction to Marine Energy. Print ISBN: 9781118340912 | Online ISBN: 9781118701669 | DOI:10.1002/9781118701669. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118701669>
- Maalawi and Badr. (2003). A practical approach for selecting optimum wind rotors. Renewable Energy. 28, 803–822.
- Marine Current Turbine (MCT), (2012). Available online at: <http://www.marineturbines.com/Contact-Marine-Current-Turbines>.
- Marine Energy Wales. (2019). Available on line at: https://www.marineenergywales.co.uk/wp-content/uploads/2019/03/uk_marine_energy_2019.pdf
- Matano, R., P., and Palma, E., D. (2018). Seasonal variability of the oceanic circulation in the Gulf of San Jorge, Argentina. Oceanography 31(4):16–24, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.402>.
- Mazio, C., Dragani, W., Caviglia, F., and Pousa, J. (2004). Tidal Hydrodynamics in Golfo Nuevo, Argentina, and the Adjacent Continental Shelf. Journal of Coastal Research. 204. 1000-1011. 10.2112/03500A.1.
- McMaster, J. and Henderson M. L, (1980). Low Speed Single Element Airfoil Synthesis. Technical Soaring, 6(2), pp.1–22.
- Mendoza Gomero, L., M. (2018). Análisis aerodinámico del perfil Wortmann fx 60-126 empleado en una turbina eólica y comprobación del coeficiente de potencia mediante modelos analíticos y métodos numéricos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10001>.
- MeyGen | Tidal Projects. SIMEC Atlantis Energy n.d. <https://simecatlantis.com/projects/meygen/> (accessed March 20, 2020).
- Ministerio de Interior, Obras Públicas y Vivienda. (2018). Cuenca del Rio Chubut. <https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/65.pdf>.
- Ministerio de Economía de la Nación (2022). <https://www.argentina.gob.ar/noticias>.
- Mohaded, M., G., Reyna, T. y Labaque M. (2018). Diversificación de la matriz energética diseño de una micro turbina turgo. Practica supervisada Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales- Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11414/PS%20MARTIN%20MOHADED.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Moreira, D., Simionato, C., G. and Dragani, W. (2011). Modeling ocean tides and their energetics in the North Patagonia Gulfs of Argentina. *Journal of Coastal Research*, 27(1), 87–102. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Mouzo, F. y Garza, M. (1979). Rasgos de la geología submarina del Golfo Nuevo (provincia de Chubut). 6º Congreso Geológico Argentino, Actas: 413-430, Buenos Aires.
- Munch, C., Vonlanthen, J., Gomes, R., Luquet, P., Guinard and Avellan, F. (2009) Design and performance assessment of a tidal ducted turbine. In: Proceedings of the third IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. Brno, Czech Republic.
- Muratoglu, A. and Yuce, M. I. (2015). Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections. <https://www.researchgate.net/publication/289531220>
- Mukherji, S. (2010). Design and critical performance evaluation of horizontal axis hydrokinetic turbines. Masters Theses. 5430. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5430
- Nachtane, M., Mostapha T., Ahmed el Moumen and Saifaoui D. (2019). Design and Hydrodynamic Performance of a Horizontal Axis Hydrokinetic Turbine. 2019. <https://www.researchgate.net/publication/330842730>
- Nachtane, M., Tarfaoui M., Goda I., and Rouway, M. (2020). A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines. *Renewable Energy* 157 (2020) 1274e1288 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.155>
- Niebuhr, C., M., Van Dijk, M., Neary, V.S., Bhagwan, J. (2019). A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 113, October 2019, 109240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.047>
- NOAA, Our Restless Tides. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/restles3.html>
- Octave software. <https://www.gnu.org/software/octave/index>
- Oldfield, J., W. (1987). Test techniques for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and nickel-base alloys in chloride-containing environments, *International Materials Reviews*, 32:1, 153-172, DOI: 10.1179/095066087790150313.
- Orbital Marine Power Ltd (Orbital) <https://www.orbitalmarine.com/orbital-marine-power-takes-final-lessons-from-sr2000-tidal-turbine-and-brings-prototype-programme-to-a-close/>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2021). State of the Global Climate 2021: WMO Provisional report. <https://public.wmo.int/es>
- Owen, J., H., Herrero G., Serdá, G., A. y Griznik, M. (2005). IGEPAT, Párrafos Geográficos Año IV N° 4 “Manejo Integral del Estuario del Río Chubut”.
- Pagitsas, M., Paulidou M. and Sazou, D. (2008). Localized passivity breakdown of iron in chlorate- and perchlorate-containing sulphuric acid solution: a study based on current oscillations and a point defect model. *Electrochimica Acta*. 2008, Vol. 53.
- Paparazzoa, D., Bacchia, F., y Scarabino, A. (2018). Diseño y estudio numérico de turbina hidrocínética de baja potencia. *Mecánica Computacional Vol XXXVI*, págs. 535-545 (artículo completo) <https://cimec.org.ar/~mstorti/MECOM2018/paper-6046.pdf>

- Paterlini, M. y Mouzo, F. (2013). Exploración Sísmica del Golfo Norpatagonico San José, Plataforma Continental Argentina, Provincia de Chubut. GEOACTA 38(1): 81-94. ISSN 1852-7744.
- Parques Nacionales. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.argentina.gob.ar/parquesnacionales>.
- Pedefferri, P. (2007). Corrosione e protezione dei materiali metallici. s.l.: CittàStudiEdizioni.
- Pedlosky, J. (1998). Ocean Circulation Theory. Springer.
- Pinzón Paz, S. (2013). El perfil alar y su nomenclatura naca. Revista Ciencia y Poder Aéreo - Edición No. 8 Septiembre 2013 ISSN 1909-7050. DOI:10.18667/cienciaypoderaereo.4
- Pizarro, M., J. (1975). Análisis de los resultados de la Primera Campaña Oceanográfica en el golfo San José. Informe técnico 1.10.2, Centro Nacional Patagónico, 1-18 p. http://200.9.244.24/fisicambien/Pub_Selec.htm.
- Polo, M., Rodríguez J, Sarmiento, A. (2008). Tidal Current Potential for Energy Generation along the Colombian Coastline. Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. rev.ing. ISSN. 0121-4993. N° 28.
- Pugh, D., T. (1987). Tides, surges and mean- sea level. Chichester, UK, John Wiley and Sons Ltd, 472 pp.
- Qblade guidelines_vo6 disponible en http://qblade.org/project_images/files/guidelines_vo6.pdf
- Rivas, (1985). Balance estacional de calor y sal en el golfo Nuevo. Tesis de Maestría. <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/items/6ce83960-190a-4503-b252-8f415ce7fe62>.
- Rivas, A. y Ripa P. (1989). Variación estacional de la estructura termohalina del Golfo Nuevo, Argentina. Geofísica Internacional, Revista de la unión geofísica mexicana, auspiciada por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 28. Número 1.
- Rivas, A. and Beier, E. (1990). Temperature and salinity fields in the Northpatagonic Gulfs. Oceanologica Acta. Vol. 13-N°1, 1990.
- Rivas, A. L., (1997). Current meter observations in the Argentine continental shelf. Continental Shelf Research. 17, 391e406.
- Rourke, F., O., Fergal, B. and Reynolds, A. (2010) Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 14, Issue 3, April 2010, Pages 1026-1036. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109002743>
- Sato, N. (1995). The stability of localized corrosion. Corrosion Science. Vol. 37, 12.
- Samsó, R., Crespin J., García-Olivares A. and Solé J. (2023). Examining the Potential of Marine Renewable Energy: A Net Energy Perspective. Sustainability 2023, 15(10), 8050; <https://doi.org/10.3390/su15108050>
- Song, S., Weichao S., Yigit Kemal Demirel, Mehmet, A. (2019). The effect of biofouling on the tidal turbine performance https://strathprints.strath.ac.uk/68418/1/Song_etal_AEAB2019_The_effect_of_biofouling_on_the_tidal_turbine_performance.pdf.

- Schiuma, M., D. (2017). Hidrocarburos y otros tipos de energía, su impacto ambiental. Energía y ambiente. AAPC, Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. <https://aargentinapciencias.org/grandes-temas-ambientales/energia-y-ambiente-2/>
- SeaPower. Consortium with University of Naples Federico II <http://www.seapowerscrl.com/node>
- Secretaria de Producción y Ambiente de la municipalidad de Rawson, (2016), disponible en: www.municipioderawson.gov.ar.
- Sedriks A., J. (1979). Corrosion of stainless steel. John Wiley & Sons, New York. ISBN 0-471-05011-3.
- Shadman, M., Roldan-Carvajal M., Pierart, F., Haim P. A., Alonso, R., Corbiniano S., Osorio A., F., Almonacid, N., Carreras G., Amiri, M. M., Arango-Aramburo, S., Rosas, M. A., Pelissero M., Tula, R., Segen F. E., Lafoz Pastor, M. y Ronald Saavedra, O., (2023). A Review of Offshore Renewable Energy in South America: Current Status and Future Perspectives. *Sustainability* 2023, 15(2), 1740; <https://doi.org/10.3390/su15021740>
- Syed, S., K., Zhang L. and Nazia S., (2013). Tidal Energy Using Vertical Axis Tidal Turbine. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5(1): 239-252, 2012 ISSN: 2040-7459; e-ISSN: 2040-7467 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China 239
- Servicio de Hidrografía Naval, (2013). Tablas de Mareas Nautical charts: <http://www.hidro.gov.ar/nautica/cco.asp>.
- Servicio de Hidrografía Naval, (2016). Tablas de Mareas de Puerto Madryn. http://www.hidro.gob.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp (último acceso agosto de 2016).
- Servicio de Hidrografía Naval, (2018). Tablas de Mareas de Puerto Madryn. http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp
- Shives, M. and Crawford, C. (2010). Overall efficiency of ducted tidal current turbines. *Oceans*, 2010.
- Simionato, C., G., Dragani, W., Nunez, M., N. and Engel, M. (2004). A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Rio de la Plata estuary, part I: M2. *Journal of Coastal Research*, 2004b, 20(3), 893-912.
- Szlarska -Smialowska Z. (2006). Pitting Corrosion of Metals, NACE, Houston.
- Tocado (2021). The Dutch Tidal Power Company, <https://www.tocado.com/about/>
- Tonini, M., Palma, E. y Rivas, A. (2006). Modelo de alta resolución de los golfos norpatagónicos. *Mecánica Computacional Vol XXV*, pp. 1441-1460. Alberto Cardona, Norberto Nigro, Victorio Sonzogni, Mario Storti. (Eds.) Santa Fe, Argentina.
- Tonini, M., H. (2010). Modelado Numérico del Ecosistema de los Golfos Norpatagónicos. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. 255pp.
- Tonini, M., H. and Di Palma, E. (2017). Tidal dynamics on the North Patagonian Argentinean Gulfs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 189 (2017) 115e130.
- Uihlein, A. and Magagna D. (2016). Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58, 2016, 1070-1081

- Veiga Martínez, J. (1994). Remodelación del Puerto de Rawson. Anteproyecto Tomo I y Diagnóstico Tomo I. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura).
- Vermaak, H., J., Kusakana, K. and Koko, S., P. (2014). Status of microhydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 625-633. Recovered from <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.066>
- Verneau, M., Audouard, J., P., Tamba A., and De Cristofaro, N. (1996). Application of stainless steels to the storage and transportation of chemical and food products, ISBN 92-828-9555-0. EUR 19378 EN (1996)
- Vitale, A., J. and Rossi, A., P. (2008). Computational method for the design of wind turbine blades. *International journal of hydrogen energy* 33 (2008) 3460 – 3465
- Vitorino, M., E., Labriola, V. M. y Moyano, H. A. (2016). Sistemas Conversores Fluido - Dinámicos de energía renovable para la Patagonia Argentina, <https://doi.org/10.22305/ictunpa.v8i2.176>, agosto 2016.
- Vitorino, M., E., Labriola, V., M., y Moyano, H., A. (2017). Sistemas Conversores Fluido - Dinámicos de energía renovable para la Patagonia Argentina, <https://doi.org/10.22305/ictunpa.v9i1.237>, abril 2017.
- Voneschen, M., F. (1989). Traducción del libro "Introducción a la teoría de las turbinas eólicas. Kleine Windräder: Berechnung u. Konstruktion" - Wiesbaden; Berlin, Bauverlag, 1989. ISBN 3-7625-2700-8
- World Energy Council | World Energy Resources (2016). <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>
- World Energy Council. (2003). www.worldenergy.org.
- Yuce, M., I., and Muratoglu, A. (2015). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72-82. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037>
- Zabaleta, F., Buono N., Cáceres, R., A., Tomazin, N. y Cecotti, R. (2016). Estudio del recurso energético marino de la Patagonia austral. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/83821>

Anexos

Anexo I Figuras de la introducción

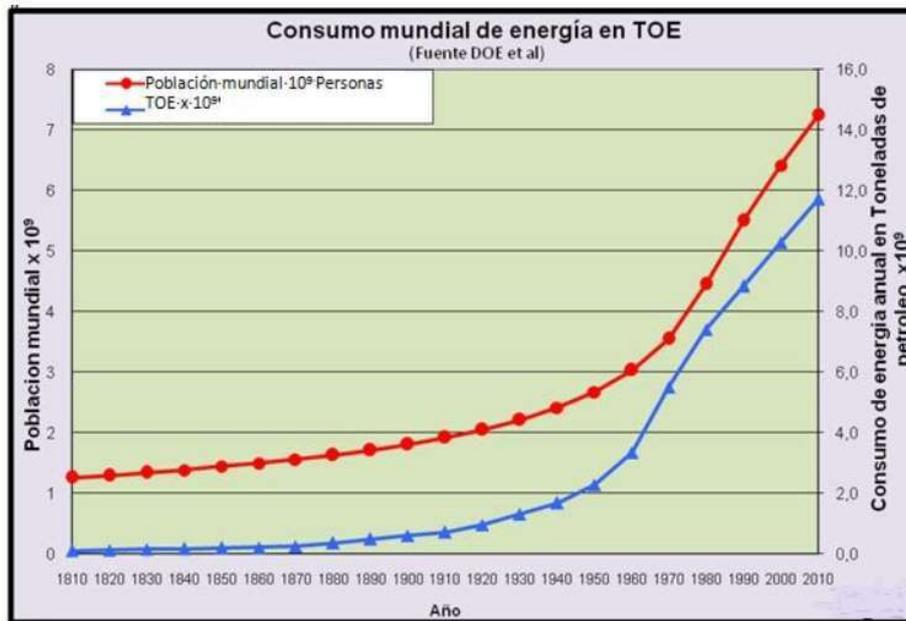


Figura 1. Consumo mundial de energía MTOE (Schiuma 2017).

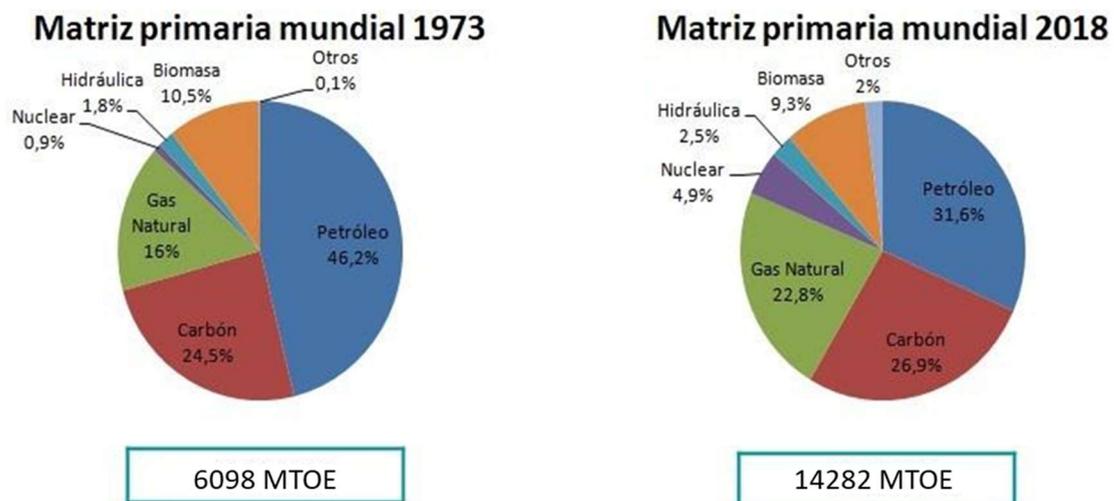


Figura 2. Evolución del consumo energético mundial. (IEA, 2020.) (TOE: tonelada equivalente de petróleo, unidad de medida que representa la energía que rinde una tonelada de petróleo).

Anexo II. Scripts en Octave

Script 1 Potencia para ala cuadrada

% cálculo de la potencia para ala cuadrada.

% parámetros fijos

rho=1025.5;

```

omega=14.02;
m=3;
cg=0.12; % cuerda geométrica m
fijo=0.5*rho*m*cg;
v= 2 ; % m/s
cu=15; % ala cuadrada de cuerda 15 cm
% para calcular el área, necesito posición relativa en cm.
% entro posición (cm) y ct
load posi.txt
po=posi(:,1); % posición relativa (cm) y ct
ct=posi(:,2); % ct alfa óptimo
n=length (posi);
% cálculos punto medios.
for i=1:n-1
    pom(i)=(po(i+1)+po(i))/2;
endfor
% dr izquierdo y dr derecho. lo hago separado: dri y drd.
% dr izquierdo dri
driz(1)=1;
for i=2:n
    driz(i)=po(i)-pom(i-1);
endfor
% dr derecho
drd(n)=1;
for i= 1: n-1
    drd(i)= pom(i)-po(i);
endfor
da(1)=cu*drd(1);
da(n)=cu*driz(n);
for i=2:n-1
    da(i)=cu*driz(i)+cu*drd(i);
endfor
dam= da*0.0001; % paso de cm2 a m2
% posición absoluta en la pala: po+17.4cm
pop=(po+17.4)/100; %paso de cm a m
% velocidad relativa al cuadrado: m^2.
w2=v^2+(omega*pop).^2;
for i=1:n
    dC(i)= w2(i)*dam(i)*ct(i)*fijo;
endfor
C=sum(dC)
pot=omega*C

```

Script 2 Potencia para ala trapezoidal

```

% cálculo de potencia ala trapezoidal
% parámetros fijos
rho=1023.725;
omega=12.03;
m=3;
cg=0.12; % cuerda geométrica m

```

```

a1=0.075; %pendiente recta inferior
a2= -0.025; % pendiente recta superior
fijo=0.5*rho*m*cg;
v= 2 % m/s
cur= 15; % cuerda raíz cm
cup=10; % cuerda punta cm
% para calcular el área, necesito posición relativa en cm.
% entro posición (cm), cuerda (cm) y ct
load posi.txt
po=posi(:,1); % posición relativa (cm)
ct=posi(:,2);
% matriz de coef
n=length (po);
% calculos punto medios.
for i=1:n-1
    pom(i)=(po(i+1)+po(i))/2;
    %lm(i)=cur-a1*pom(i) - (cur-(a2)*pom(i));
    lm(i)=-abs(a2)*pom(i)+cur -a1*pom(i);
endfor

% dareas (cm2)
da(1)=(lm(1)+cur)/2*(pom(1)-po(1));
da(n)=(cup+lm(n-1))/2*(po(n)-pom(n-1));
for i=2:n-1
    da(i)=(lm(i)+lm(i-1))/2*(pom(i)-pom(i-1));
endfor

dam= da*0.0001; % paso de cm2 a m2

% posición absoluta en la pala: (po+17.4cm)/100

pop=(po+17.4)/100; %paso de cm a m

% velocidad relativa al cuadrado: m^2.
w2=v^2+(omega*pop).^2;
% coeficientes de momento.
for i=1:n
    dc(i)= w2(i)*dam(i)*ct(i)*fijo;
endfor
C=sum(dc); %momento total y potencia
pot=omega*C

```

Script 3 Perfil velocidad capítulo I: ejemplo

```

profundidad=0:-0.1:-70;
x=0:10:7000;
[Mx,My]=meshgrid(x,profundidad);
# interpolación de la profundidad
largox=length(x);
largoprof=length(profundidad);
distancia=[0,1200,2400,3300,4000,5300,6800,7000];

```

```

perfildeprof=[0,-13,-14,-65,-10,-5,-3,0];
figure 2
plot(distancia,perfildeprof,'*')
perfil=interp1(distancia,perfildeprof,x,"pchip");
hold on
plot(x,perfil)
hold off
for i=1:largoX
    for j=1:largoProf
        if (My(i,j)-perfil(j)>0)
            if(perfil(j)<0)
                V(i,j)=1*((My(i,j)-perfil(j))/(-perfil(j)))^(1/7);
            else
                V(i,j)=1;
            endif
        else
            V(i,j)=0;
        endif
    endfor
endfor
endfor

```

```

figure 5
colormap("default");
shading flat
contourf(Mx,My,V,10,'k'); #10 lineas estilo k
colorbar ('FontSize',20)
set (gca, 'FontSize', 15)

```

```

xlabel ('X(m)')
ylabel('Profundidad(m)')
set (gca, 'FontSize', 18)

```

Script 4 Calculo coeficientes momento y empuje

```

% cargo coeficientes hidrodinámicos, ángulo de ataque de Qblade.
% programita
v=2; %m/s
m=3; % número de palas
% cargo matriz de coeficientes: alfa, Cl y Cd...ojo perfil!!!
load coefi.txt
coef=coefi;
alfa=coef(:,1);
cl=coef(:,2);
cd=coef(:,3);
aln=length(coef);

% cargo posición con ángulos (radianes)
% ojo!!!!...cambia numero= z/omega*r
load angulo.txt %phi en rad (sacado con calculadora)

phi=angulo; % entrar posicion es igual a entrar phi en radianes.
n=length(angulo)

```

```

for i=1:n
for j= 1: aln
ct(i,j) = cl(j)*sin(phi(i))-cd(j)*cos(phi(i));
cn(i,j) = cl(j)*cos(phi(i))+cd(j)*sin(phi(i));
endfor
endfor

```

% busco fuerza a lo largo de la pala (todos los phi= posición) del alfa óptimo.

```

ctt=ct';
cnt=cn';
% cambio de perfil cambia alf optimo
ctop= ctt(17,:); % ángulo (posición) a lo largo de la pala para alfa optimo
ctop=ctop';
% ojo...cambio de perfil, cambia alfa optimo!!!!
cnop= cnt(17,:); % ángulo (posición) a lo largo de la pala para alfa optimo
cnop=cnop';

```

```

save resulct.txt ctop
save resulcn.txt cnop

```

Script 5 Cálculo de coeficientes de momento para distintas velocidades angulares

% cálculo de ct para distintas velocidades angular

v=1 ; %velocidad del flujo libre

m=3; % número de palas

TSR=[8] ; %01 2 3 4 5 6];

omega=TSR*v/0.674; % R=0.674 m largo pala

radio=[0.174 0.299 0.3615 0.424 0.549 0.58025 0.61150 0.62713 0.64275 0.65838 0.66619
0.674];

mu=[1.35020 0.34034 0.27091 0.21980 0.14950 0.13624 0.12438 0.11897 0.11356
0.10868 0.10624 0.10379];

fijo=0.5*1025.5*3*0.12;

% cargo matriz de coeficientes: alfa, Cl y Cd para 2412

load coefi.txt %hasta que no cambie la vel libre, uso mismos perfiles

load area.txt;

dam=area;

coef=coefi;

alfa=coefi(:,1);

cl=coefi(:,2);

cd=coefi(:,3);

aln=length(coefi);

% cálculo de los phi con cada omega

for i=1: length(TSR)

for j=1:12

phi(i,j)=(atan(v/(omega(i)*radio(j))));

al(j)=round((phi(i,j)-mu(j))*180/3.14);

endfor

endfor

```

for i=1:length(TSR)
for j= 1: 12
    for k=1:aln
        ct(i,j,k) = cl(k)*sin(phi(i,j))-cd(k)*cos(phi(i,j));
        cn(i,j,k) = cl(k)*cos(phi(i,j))+cd(k)*sin(phi(i,j));
    endfor
endfor
endfor

for i=1: length (TSR)
for j=1:12
w2(i,j)=(v^2+(omega(i)*radio(j)).^2)*dam(j)*fijo; %ct(:,,ad);
endfor
endfor

```

Se utilizó una planilla excell para calcular las potencias vs. TSR para cada velocidad de flujo.

Script 6 Interpolación velocidades y tiempo capítulo I

```

% interpolación de velocidades
load velo.txt %GSJ
vel=velo(:,2);
hora=velo(:,1);
load x.txt
y = interp1 (hora, vel, x, "pchip"); %lineal
y1 = interp1 (hora, vel, x, "spline"); % polinomios cúbicos
y2 = spline(hora, vel, x); % es igual al interp1 spline

save resul.txt y
save resul1.txt y1
save resul2.txt y2

load velo1.txt %GN
vel=velo1(:,2);
hora=velo1(:,1);
load x1.txt %vector cada 1 hora
ygn = interp1 (hora, vel, x1, "pchip");
%y1 = interp1 (hora, vel, x1, "spline");
%y2 = spline(hora, vel, x1); % es igual al interp1 spline
save regn.txt ygn

% interpolación del tiempo
load tiempo.txt
th=tiempo(:,1);
th1=tiempo(:,2);
load x1.txt;
hora = interp1 (th, th1, x1, "pchip");
save hora.txt hora

```

Script 7 Cálculo de áreas y velocidades de la tobera

```
% cálculo de la tobera
%valores
w1=0.53;
w2=2;
a2=1.43; % área en la hélice
% calculo a1
coefw=(w2-w1)/(w2+w1);
a1=a2*(1+coefw)/(1-coefw)
r1=sqrt(a1/pi)
% calculo wm2: velocidad máxima en la tobera
wm1=0.8; % velocidad máxima en el flujo
coefa=(a2-a1)/(a2+a1);
wm2=wm1*(1-coefa)/(1+coefa)

% calculo wm2: velocidad mínima en la tobera
wm1=0.28; % velocidad mínima en el flujo GN
wm1= 0.2; % velocidad mínima en el flujo rio

% áreas ya determinadas pa GN
a1= 5.1; % área pa aumentar velocidad a 1 m/s (Re=100.000)
a2=1.43;

% áreas ya determinadas pa rio Chubut
a1=5.1903;
a2=1.43; %donde está el rotor
a1=1.43 ;% para sacar v1 en cálculo de tiempo de generación
coefa=(a2-a1)/(a2+a1);
wm2=wm1*(1-coefa)/(1+coefa)

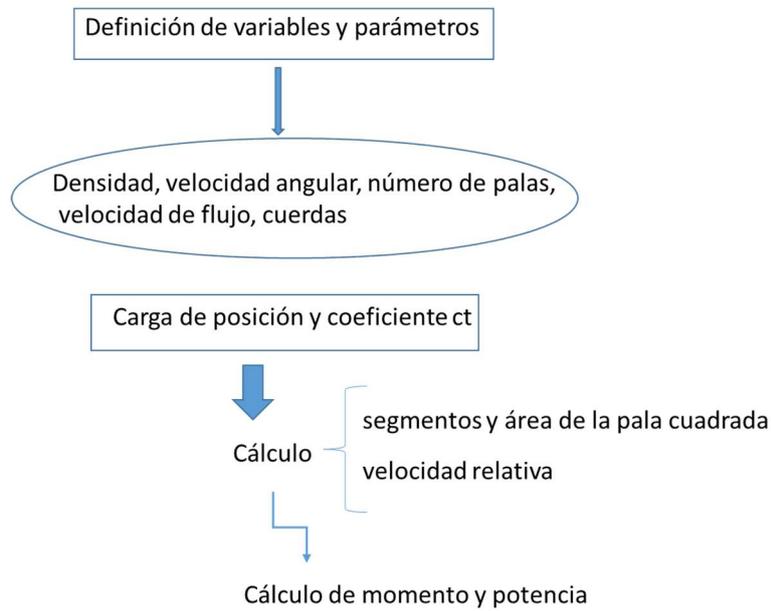
% cálculo de la velocidad v1
v2=0.832411214; % velocidad en la tobera
coefa=(a2-a1)/(a2+a1);
v1=v2/((1-coefa)/(1+coefa))%

% cálculo de la velocidad v2 aumentada en la tobera
v1=0.57;
coefa=-(a2-a1)/(a2+a1);
%v1=v2/((1-coefa)/(1+coefa))%
v2=v1*((1+coefa)/(1-coefa))

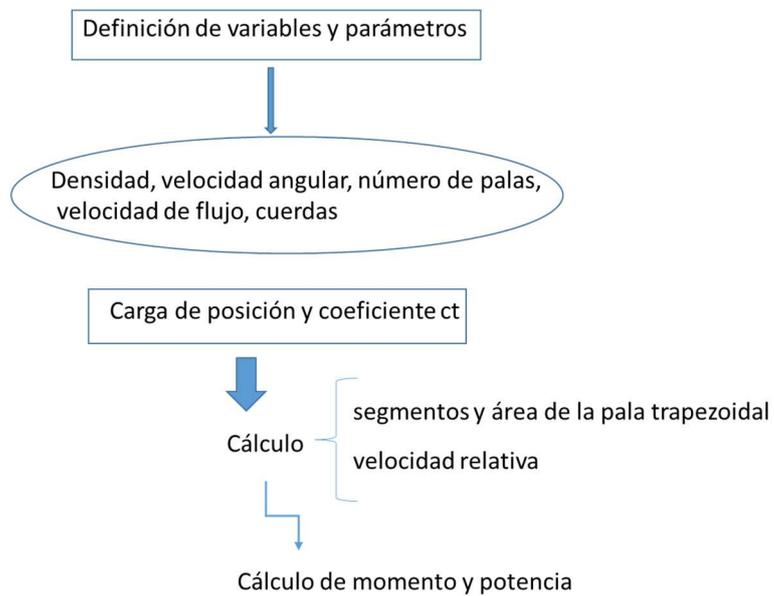
% cálculo de la potencia en el tiempo
% datos: a1, a2, v1 (vector)
% incógnita: v2
a1= 8.412;
a2= 1.43;
da=(a2-a1)/((a2+a1)/2);
load ve1.txt
v1= ve1;
v2=v1*((1-da/2)/(1+da/2));
save v2.txt v2
```

Anexo III Diagramas de flujo de los programas en Octave.

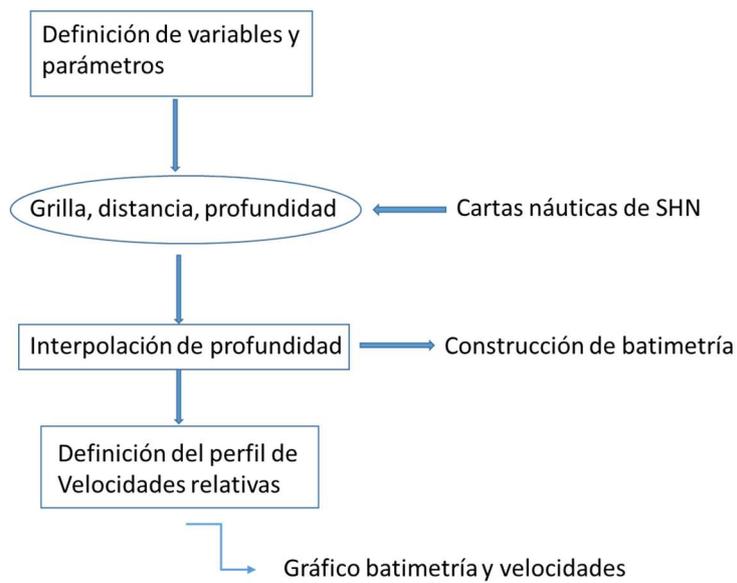
Script 1 Potencia para ala cuadrada



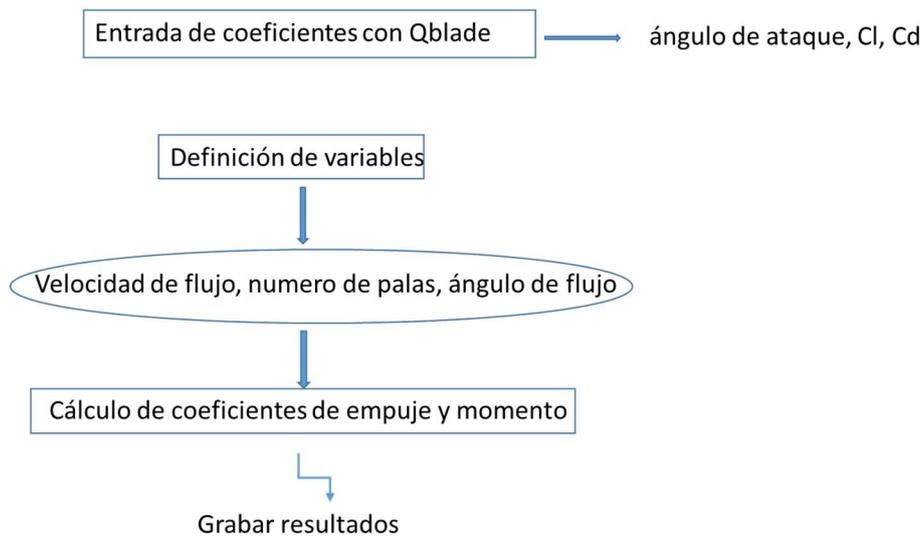
Script 2 Potencia para ala trapezoidal



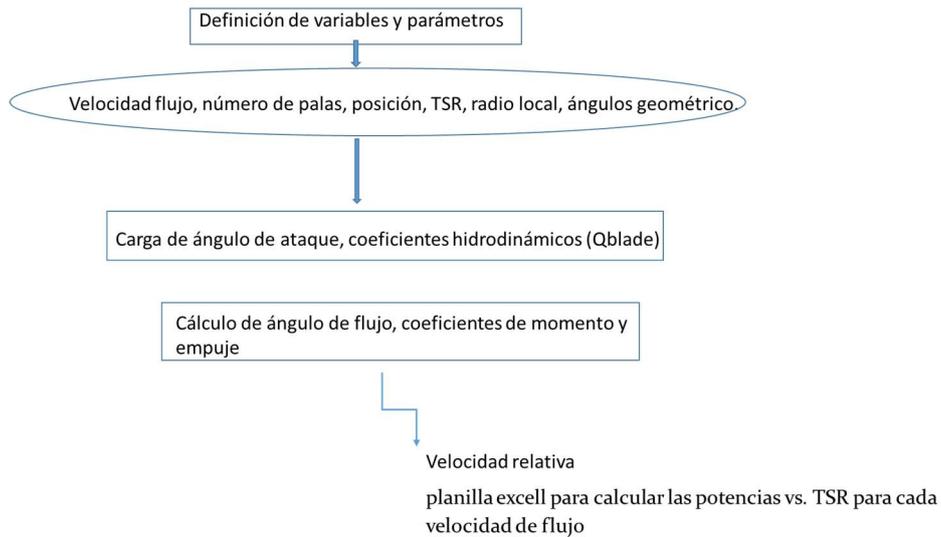
Script 3 Perfil velocidad capítulo I: ejemplo



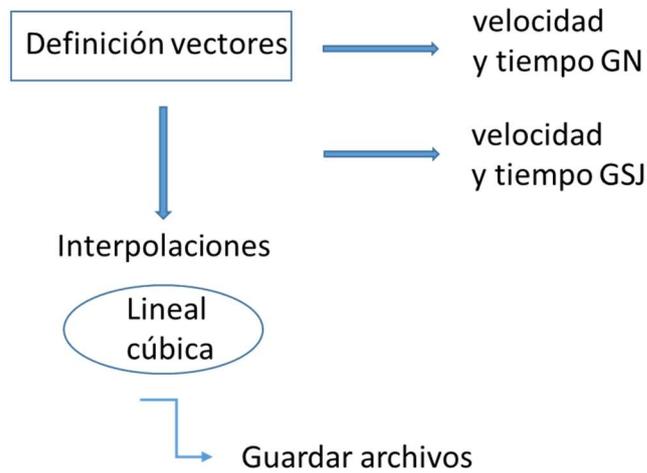
Script 4 Cálculo coeficientes momento y empuje



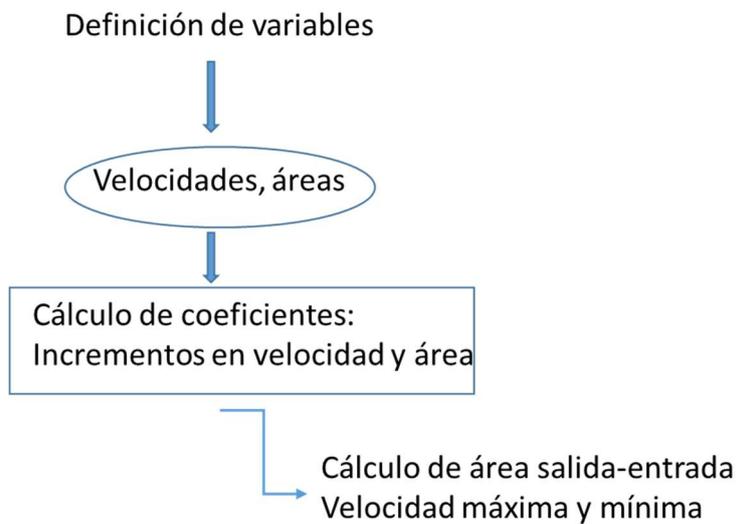
Script 5 Cálculo de coeficientes de momento para distintas velocidades angulares



Script 6 Interpolación velocidades y tiempo capítulo I



Script 7 Cálculo de áreas y velocidades de la tobera



Anexo IV Potencia que suministra la sección interior de una pala según Voneschen, (1989).

Se tiene un rotor ideal de eje horizontal, con diámetro $D = 2R$. Según la ecuación de potencia teórica, la parte interior de las palas (cerca del eje) suministran la siguiente potencia:

$$dP = cte. da. v^3$$

De acuerdo a la **Figura 3**, la potencia desarrollada por las palas en la superficie $da = \pi r^2$, es:

$$dP = cte. \pi r^2 v^3$$

Por definición, la potencia de todo el rotor es:

$$P = cte. \pi R^2 v^3$$

Dividiendo ambas ecuaciones, obtendremos la siguiente relación:

$$\frac{dP}{P} = \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

Esta última ecuación está representada en la **Figura 3**.

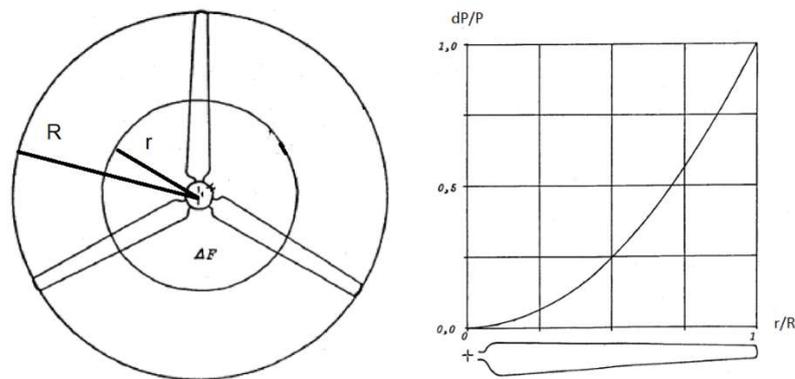


Figura 3. Superficie barrida por las palas cerca al buje del rotor. Aportación de la zona de las palas entre el eje y el radio r a la potencia total del rotor.

Anexo V Tablas Potenciales de Picado.

Tabla 1. Potenciales de picado 430 y 304- agua de mar (GN) 35‰

Electrolito: agua del GN (35 ‰)					
Material	Medición	Potencial de Picado (mV)	Material	Medición	Potencial de Picado (mV)
AISI 304	I	320	AISI 430	I	170
	II	420		II	222
	III	372		III	180
	IV	415		IV	310
	V	395		V	305
	VI	373		VI	260
	VII	430		VII	190
	VIII	325		VIII	270
	IX	428		IX	325
	X	376		X	246

Tabla 2. Potenciales de picado 430 y 304- agua del río Chubut - 30‰

Electrolito: agua del río (30 ‰)					
Material	Medición	Potencial de picado (mV)	Material	Medición	Potencial de Picado (mV)
AISI 304	I	403	AISI 430	I	230
	II	367		II	266
	III	402		III	255
	IV	378		IV	297
	V	400		V	290
	VI	485		VI	326
	VII	480		VII	250
	VIII	455		VIII	248
	IX	420		IX	226
	X	393		X	376

Tabla 3. Potenciales de picado 430 y 304- agua de mar (GN) 35 ‰ a 7°C

Electrolito: agua del GN (35 ‰) (7 °C)					
Material	Medición	Potencial de Picado (mV)	Material	Medición	Potencial de Picado (mV)
AISI 304	I	453	AISI 430	I	340
	II	455		II	311
	III	415		III	295
	IV	426		IV	305
	V	470		V	280
	VI	460		VI	300
	VII	430		VII	320
	VIII	420		VIII	295
	IX	455		IX	300
	X	445		X	410

Tabla 4. Potenciales de picado 430 y 304- agua de río 30 ‰ a 7°C

Electrolito: agua del río (30 ‰) (7 °C)					
Material	Medición	Potencial de Picado (mV)	Material	Medición	Potencial de Picado (mV)
AISI 304	I	483	AISI 430	I	353
	II	540		II	324
	III	470		III	325
	IV	465		IV	300
	V	430		V	320
	VI	520		VI	340
	VII	510		VII	337
	VIII	540		VIII	360
	IX	430		IX	300
	X	460		X	340

Tabla 5. Potenciales de picado 430 y 304- agua de mar (GN) 35 ‰ sin O₂

Electrolito: agua del GN (35 ‰) (sin O ₂)					
Material	Medición	Potencial de Picado (mV)	Material	Medición	Potencial de Picado (mV)
AISI 304	I	390	AISI 430	I	240
	II	410		II	280
	III	390		III	260
	IV	410		IV	202
	V	409		V	270
	VI	400		VI	240
	VII	420		VII	270
	VIII	400		VIII	210
	IX	410		IX	260
	X	405		X	250

Tabla 6. Potenciales de picado 430 y 304- agua de río 30 ‰ sin O₂

Electrolito: agua del río (30 ‰) (sin O ₂)					
Material	Medición	Potencial de Picado (mV)	Material	Medición	Potencial de Picado (mV)
AISI 304	I	397	AISI 430	I	250
	II	420		II	249
	III	430		III	230
	IV	432		IV	248
	V	426		V	220
	VI	406		VI	230
	VII	435		VII	225
	VIII	410		VIII	240
	IX	420		IX	235
	X	420		X	240