

“SISTEMA DE DESHIELO DE PALAS Y DEMÁS COMPONENTES CRÍTICOS EN EL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR ANTÁRTICO”

PROTOTIPO: Darrieus H – Perfil No Simétrico S813



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue

Carrera: *Especialización en Energía Eólica*

Autor: *Ing. Bentivenga Lautaro*

Director: *Dr. Jorge Lassig*

Co-Director: *Mgt. Ing. Néstor Warchomica*

Neuquén – Argentina

2024

“Sistema de deshielo de palas y demás componentes críticos en el diseño de un aerogenerador antártico”

Autor: Ing. Bentivenga Lautaro

Director: Dr. Jorge Lassig

Co-Director: Mgt. Ing. Néstor Warchomica

Resumen:

Este trabajo final integrador analiza y propone un sistema de deshielo para palas y componentes críticos de un aerogenerador Darrieus H de eje vertical con perfil asimétrico S813, diseñado para operar en condiciones climáticas extremas en la Base Marambio, Antártida. Se detalla la caracterización ambiental del sitio, y se analizan fenómenos climatológicos e impactos de la formación de hielo en la operatividad de equipos. Se comparan tecnologías existentes de deshielo/antihielo, se definen requerimientos y tecnologías necesarias, y se implementan estrategias de monitoreo. Los resultados sugieren combinar recubrimientos antihielos (coatings) con monitoreo continuo mediante la estación meteorológica de la base científica, sensores locales y modelos de curva de potencia como solución más factible y eficiente. Se recomienda monitorear y evaluar la solución propuesta para garantizar su durabilidad y efectividad a largo plazo. Asimismo, se remarca la importancia de mantenerse actualizado con la investigación de las tecnologías emergentes en el área.

Abstract:

This comprehensive final project analyzes and proposes a de-icing system for the blades and critical components of a Darrieus H-type vertical axis wind turbine with an asymmetric S813 airfoil, designed to operate under extreme climatic conditions at the Marambio Base in Antarctica. The environmental characterization of the site is detailed, and climatological phenomena as well as the impacts of ice formation on equipment operability are analyzed. Existing de-icing/anti-icing technologies are compared, requirements and necessary technologies are defined, and monitoring strategies are implemented. The results suggest combining anti-icing coatings with continuous monitoring through the scientific base's meteorological station, local sensors, and power curve models as the most feasible and efficient solution. It is recommended to monitor and evaluate the proposed solution to ensure its long-term durability and effectiveness. Furthermore, the importance of staying updated on emerging research and technologies in this area is emphasized.

Agradecimientos

Este trabajo concluye una etapa muy importante de mi vida, y a su vez da inicio a otra que me permite continuar con la búsqueda de mis objetivos profesionales.

Agradezco a mis padres, a mis hermanos, a mi sobrina Fausti, que nos llenó de alegrías en un año muy caótico, y a mi pareja, que nunca dejaron de acompañarme en cada una de mis decisiones.

Agradezco a la Universidad Nacional del Comahue, a la Facultad de Ingeniería, a cada profesor por sus valiosos aportes a lo largo de la carrera y particularmente agradezco el apoyo y acompañamiento de mis tutores, Jorge Lassig y Néstor Warchomica.

Índice General

1.	<i>Introducción</i>	6
1.1	<i>Marco Teórico</i>	6
1.2	<i>Objetivos del Estudio</i>	7
1.3	<i>Alcance</i>	7
1.4	<i>Metodología</i>	7
2.	<i>Tecnología de Turbinas Eólicas</i>	8
3.	<i>Normas IEC relevantes para el diseño y operación de aerogeneradores</i>	15
4.	<i>Tecnología Aeronáutica</i>	17
5.	<i>Tecnología del Hielo aplicadas en Turbinas Eólicas</i>	21
6.	<i>Desarrollo</i>	39
6.1	<i>Caracterización Climática de la Antártida</i>	39
6.2	<i>Clima en Base Marambio</i>	45
6.3	<i>Definición de Requerimientos y Tecnologías Generales</i>	48
6.3.1	<i>Monitoreo para la Detección Temprana de formación de Hielo</i>	49
6.3.2	<i>Definición de los Componentes del Aerogenerador en estudio</i>	50
6.3.3	<i>Tecnología para la Estructura del Aerogenerador en la Base Marambio</i>	50
6.3.4	<i>Requerimientos y tecnologías para evitar el congelamiento de los fluidos lubricantes</i>	51
6.3.5	<i>Requerimientos y Tecnologías para Evitar la Formación de Hielo sobre las Palas del Aerogenerador</i>	53
7.	<i>Discusión y conclusión</i>	57
8.	<i>Referencias</i>	59

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Esquema de los Tipos de Turbina</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2: Curvas de Potencia según tipo de Aerogenerador</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3: Esquema sobre el efecto de la presencia de hielo en una aeronave.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4: Formación de hielo en un radio de curvatura pequeño (EGAST, 2017)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5: Operación de Deshielo en Tierra (Sir Chandler, 2023)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Esquema ejemplificativo de aplicación de manta térmica por Vestas.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7: Resumen de Tecnologías en el Programa de Cold Climate de Vestas</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8: Esquema de funcionamiento de calentadores en las palas.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9: Esquema de ubicación de calentadores en palas y componentes en cabina</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10: Aplicación de recubrimiento sobre placa metálica (Elemental Coatings).....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11: Diferentes formaciones de hielo en estructuras (Yiqiang Han, 2011)</i>	<i>30</i>
<i>Figura 12: Ilustración del funcionamiento del sistema en estudio (Pettersson y Sollén, 2019)</i> <i>.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13: Calentadores utilizados y experimento en laboratorio (Pettersson y Sollén, 2019)</i> <i>.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 14: Mapa Físico de la Antártida (Scientific Committee on Antarctic Research, ADD)</i> <i>.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15: Corrientes marinas alrededor de la Antártida (Vasallo 2017)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 16: Placa con recubrimiento antihielo en su extremo derecho - NANOMYTE</i>	<i>56</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Resumen de Características según tipo de Aerogenerador por Eriksson (2008) ..</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2: Detalles técnicos de las turbinas ensayadas por Eriksson (2008)</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3: Resumen de Resultados según tipo de Aerogenerador por Eriksson (2008)</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4: Comparativa entre las diferentes técnicas de prevención de hielo (Li et al., 2022)</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 5: Resumen de parámetros climáticos promedio en la Base Marambio</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 6: Estadísticas climatológicas normales para la Base Marambio.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7: Comparación de Detalles Técnicos de Grasas Sintéticas para bajas T°</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 8: Comparación de Detalles Técnicos de Aceites Sintéticos para bajas T°</i>	<i>53</i>

1. Introducción

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto integral "Aerogenerador Antártico", una iniciativa que busca desarrollar un prototipo de aerogenerador de pequeñas dimensiones específicamente diseñado para operar en las condiciones climáticas extremas de la Antártida Argentina. La dependencia actual de combustibles fósiles para la generación eléctrica en las bases antárticas plantea importantes desafíos logísticos, económicos y ambientales, motivando la búsqueda de alternativas sostenibles como la energía eólica.

En este contexto, las energías renovables se presentan como una solución viable y sostenible. Dado que las condiciones de baja radiación solar, especialmente durante los meses de invierno, limitan la factibilidad de implementar sistemas de energía solar fotovoltaica como fuente de generación renovable, se enfatiza en las condiciones favorables para el recurso eólico, ya que en la Antártida los vientos son abundantes y constantes.

Sin embargo, las particularidades del entorno antártico, con temperaturas extremadamente bajas y vientos intensos, plantean importantes desafíos técnicos para el desarrollo de aerogeneradores. Uno de los mayores radica en garantizar el correcto funcionamiento de los componentes críticos, especialmente las palas, ante la formación de hielo.

Es por ello que el presente trabajo se centra en el análisis y propuesta de un sistema de deshielo efectivo para las palas y otros elementos clave del aerogenerador antártico. Abordar esta problemática es fundamental para asegurar una operación confiable y eficiente de la turbina eólica en un ambiente tan hostil. Se exploraron diversas tecnologías y estrategias, evaluando su factibilidad técnica y económica, con el objetivo de determinar la solución más adecuada para el prototipo en desarrollo.

1.1 Marco Teórico

La energía eólica se ha convertido en una fuente esencial de energía renovable, y tanto los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) como los de eje horizontal (HAWT) tienen características únicas que los hacen más adecuados para distintos entornos. En particular, los aerogeneradores tipo Darrieus H son apreciados por su diseño simple, su menor impacto ambiental y su capacidad para operar eficientemente en vientos cambiantes sin necesidad de mecanismos de orientación complejos.

Sin embargo, un desafío importante en la operación de estos aerogeneradores es la formación de hielo en las palas, lo que puede afectar seriamente su rendimiento aerodinámico, disminuyendo de manera directa la eficiencia energética. Para enfrentar este problema, se han desarrollado diversas tecnologías de deshielo y antihielo, que incluyen desde el uso de calefactores, recubrimientos especiales y avanzados sistemas de monitoreo, hasta tecnologías más sofisticadas como métodos descongelantes que se basan en fuerzas electromagnéticas repulsivas.

En las siguientes secciones, se profundizará en los aspectos teóricos y técnicos relevantes en lo que refiere a las tecnologías de turbinas eólicas, normas IEC relevantes para el diseño y operación de los aerogeneradores, tecnologías aeronáuticas, y tecnologías de hielo en turbinas eólicas.

1.2 Objetivos del Estudio

El propósito de este trabajo final integrador es analizar un sistema de deshielo para las palas y otros componentes críticos de un pequeño aerogenerador diseñado para operar en la Antártida. El estudio se centra en el desarrollo de un prototipo que optimice la eficiencia operativa y minimice los riesgos asociados con la formación de hielo, utilizando tecnologías accesibles y efectivas.

1.3 Alcance

Este estudio se centrará en la evaluación del estado de la tecnología en el campo de la ingeniería del hielo aplicada a aerogeneradores. Se incluirá una evaluación de las tecnologías disponibles y su viabilidad para su implementación en las condiciones extremas de la Antártida.

1.4 Metodología

Para determinar la tecnología más apropiada se llevará a cabo una búsqueda bibliográfica en las áreas de energía eólica, aeronáutica e ingeniería del hielo. Se seleccionarán las tecnologías más adecuadas disponibles en el país y se propondrán para su implementación en el marco del proyecto "Aerogenerador Antártico".

2. Tecnología de Turbinas Eólicas

En esta sección se analizan y comentan diferentes estudios de investigación y ensayos de laboratorio relacionados con las Tecnologías de Turbinas Eólicas.

***Eriksson (2008)**, aborda el creciente papel de la energía eólica como una fuente importante de energía sostenible, centrándose en la comparación entre dos tipos principales de turbinas: las de eje horizontal (HAWT) y las de eje vertical (VAWT).*

El autor realiza un breve repaso histórico de la energía eólica, donde menciona sobre la decisión que se tomó a lo largo de los años de avanzar con las investigaciones específicamente para las HAWT, postergando los estudios de las turbinas de eje vertical (Savonius, Darrieus, H-Rotor).

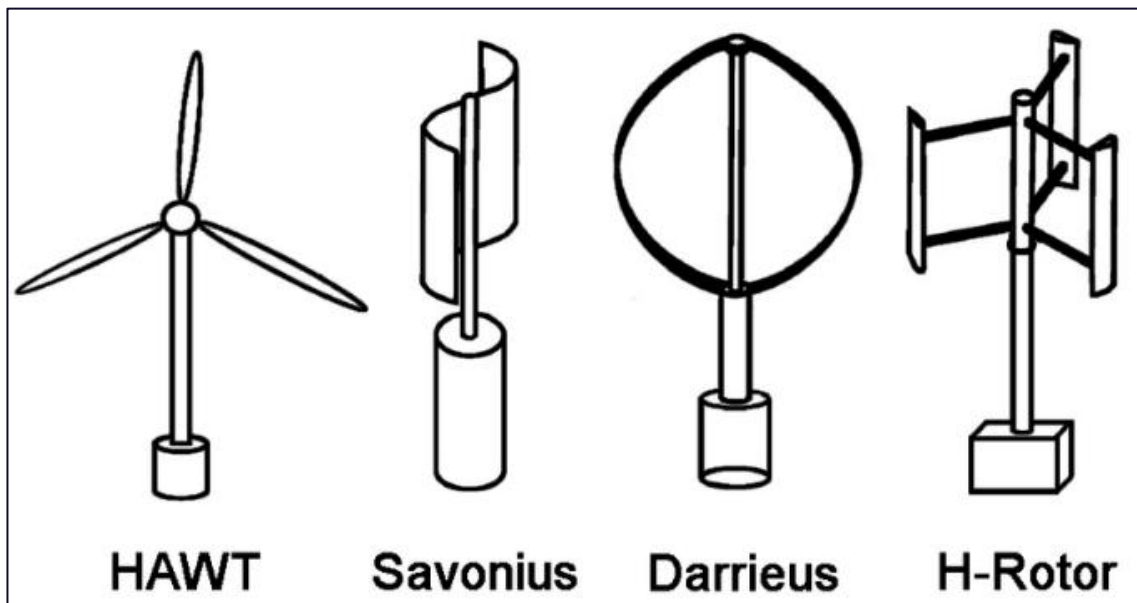


Figura 1: Esquema de los Tipos de Turbina

Eriksson examina y compara diferentes aspectos clave de estas turbinas, tales como la dinámica estructural, los sistemas de control, el mantenimiento, la fabricación y el equipo eléctrico, y presenta un análisis comparativo entre estos dos tipos de turbinas, incluyendo un estudio de caso con tres turbinas de 500 kW.

Las turbinas analizadas son:

- 1. Turbina clásica de Eje Horizontal (HAWT)*
- 2. Turbina Darrieus (VAWT)*
- 3. Turbina H-Rotor (VAWT)*

A continuación, se resumen las ventajas y limitantes de las VAWT según el autor:

Ventajas de las VAWT:

- *Omni-direccionales:* No requieren un mecanismo de orientación de palas (yaw), lo que permite la captura de viento desde cualquier dirección, simplificando la instalación y mejorando la eficiencia operativa en vientos variables. Sin embargo, esto también representa un desafío por las turbulencias que genera el cambio del ángulo de ataque continuo.
- *Diseño más simple:* La ubicación del generador en la base de la torre, el sistema de transmisión directa, las dimensiones más pequeñas y menos complejas tales como las palas rectas facilitan la instalación, operación y mantenimiento, reduciendo potencialmente los costos de ciclo de vida y logrando una mayor rentabilidad en términos de costo/kWh. A su vez, la posibilidad de prescindir de una caja de cambios y utilizar el sistema de transmisión directa reduce las pérdidas de manera significativa.
- *Reducción de ruido:* La menor velocidad de la punta de la pala se traduce en una operación más silenciosa, haciéndolas más adecuadas para entornos urbanos o cercanos a zonas residenciales.
- *Menor impacto ambiental:* La velocidad de rotación más lenta y el diseño optimizado minimizan el riesgo de colisión con aves y murciélagos.
- *Menor susceptibilidad a la proyección de hielo:* La menor velocidad de rotación y el sentido de giro reducen los riesgos asociados a la proyección de hielo hacía arriba o debajo de la turbina.

Limitantes de las VAWT:

- *Eficiencia actual:* Las HAWT tienen coeficientes de potencia (C_p) superiores en el estado actual de la tecnología.
- *Etapas de desarrollo:* La ausencia de producción en serie a gran escala podría suponer inicialmente unos costes de fabricación más elevados en comparación con las HAWT consolidadas.

-
- *Fatiga sobre las palas: Las palas de las VAWTs pueden sufrir momentos flectores por la fuerza centrípeta, sin embargo, las variaciones en el diseño y en el material utilizado pueden reducir significativamente este efecto negativo.*
 - *Torque de arranque (excepto H-rotor): En algunos casos, podría requerirse un sistema de arranque asistido para iniciar la rotación.*
 - *Control de Potencia: En las Darrieus se menciona que no es posible controlar la potencia con control pitch, sin embargo, en las VAWTs como H-Rotor, es posible el control pasivo por stall, lo que hace necesaria una estructura resistente y estable que soporte las fatigas generadas por las vibraciones del stall control. A su vez se menciona la posibilidad de reducir estas pérdidas aumentando la cantidad de palas, o utilizando frenos mecánicos de seguridad*

Por otro lado, se detallan las ventajas y limitantes de las HAWT definidas por Eriksson en su trabajo.

Ventajas de las HAWT:

- *Tecnología en uso y evolución: Las HAWT se benefician de una amplia experiencia en el sector, economías de escala en la fabricación y una base de conocimiento consolidada.*
- *Eficiencia potencial: Las HAWT actualmente alcanzan coeficientes de potencia (CP) ligeramente superiores.*
- *Tecnologías de gran escala consolidadas: Los aerogeneradores multimegawatt ya se encuentran en funcionamiento y cuentan con una gran aceptación en el mercado energético y también a nivel social, lo que lleva a que las investigaciones continúen desarrollándose en este campo, en búsqueda de la máxima eficiencia.*

Desventajas de las HAWT:

- *Complejidad del diseño: Requieren un mecanismo de oscilación de las palas, góndola, caja de cambios y otros componentes, lo que aumenta la complejidad del diseño y potencialmente los costes de mantenimiento.*
- *Mayor ruido: La mayor velocidad de la punta de la pala se traduce en una mayor generación de ruido aerodinámico.*

- *Mayor impacto ambiental: La mayor velocidad de rotación y las dimensiones del aerogenerador aumentan el riesgo de colisión con avifauna y de flickering.*
- *Costes de construcción e instalación: Las torres de las HAWT suelen ser más pesadas y costosas de instalar debido a la necesidad de soportar la góndola en la parte superior y la logística que conlleva. La complejidad de su fabricación también conlleva a que el costo de fabricación sea alto.*

Se presenta en la siguiente imagen las características más importantes de cada turbina:

	H-rotor	Darrieus	HAWT
Blade profile	Simple	Complicated	Complicated
Yaw mechanism needed	No	No	Yes
Pitch mechanism possible	Yes	No	Yes
Tower	Yes	No	Yes
Guy wires	Optional	Yes	No
Noise	Low	Moderate	High
Blade area	Moderate	Large	Small
Generator position	On ground	On ground	On top of tower
Blade load	Moderate	Low	High
Self starting	No	No	Yes
Tower interference	Small	Small	Large
Foundation	Moderate	Simple	Extensive
Overall structure	Simple	Simple	Complicated

Tabla 1: Resumen de Características según tipo de Aerogenerador por Eriksson (2008)

En el siguiente gráfico se detallan las curvas de potencia analizadas por el autor, donde se establece que las HAWTs cuentan con la mejor curva de potencia, sin embargo, hace hincapié en que el estudio y los avances en las turbinas de eje vertical pueden mejorar estos valores y lograr coeficientes de potencia similares o mejores a los de turbinas horizontales.

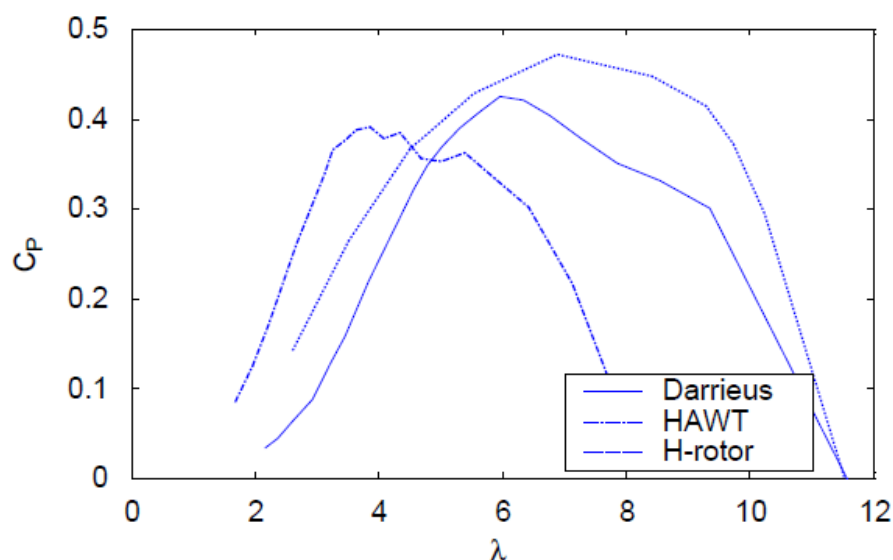


Figura 2: Curvas de Potencia según tipo de Aerogenerador

Eriksson (2008) presenta un caso de estudio comparativo que analiza en detalle las características técnicas de diferentes turbinas eólicas de 500 kW de potencia nominal. Los detalles técnicos de las turbinas contempladas en el estudio comparativo se muestran en la siguiente tabla.

Las turbinas incluidas en la comparación son tres VAWTs (H-rotor 1 y 2, Darrieus), una HAWT de 600 kW y, finalmente, la misma HAWT ajustada utilizando la escala de Froude para que los datos sean aplicables a una turbina de 500 kW.

	H-rotor 1	H-rotor 2	Darrieus	HAWT (scaled)	HAWT
Rated power (kW)	500	500	500	500	600
Swept area (m ²)	850	850	955	1370	1520
Rated wind speed (m/s)	~13.5	~13.5	12.5	15	15
No. of blades	2	2	2	3	3
Tower height (m)	30	30	50	47	50
Turbine diameter (m)	35	35	34	42	44
Blade length (m)	24.3	24.3	54.5	18	19
Blade material	GRP	GRP	Aluminium	GRP	GRP
Yaw mechanism	No	No	No	Yes	Yes
Pitch or active stall mechanism	No	No	No	Yes	Yes
Gear box	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Guy wires	No	No	Yes	No	No
Generator position	In tower	On ground	On ground	In nacelle	In nacelle
Rotation speed (rpm)	Constant, 13.6/20.4	Variable	Semi-variable, 28–38	Constant, 19/28	Constant, 18/27
Overall structure	Simple	Simple	Moderate	Complicated	Complicated
Mass blades only (t)	6	6	-	13	15
Mass turbine (t)	~24	~24	72.2	13	15
Mass nacelle (t)	~20	No nacelle	No nacelle	20	23
Mass tower (t)	153	32.8	No tower	36	42
Total weight above ground level (t)	197	56.8	72.2	68	80

Tabla 2: Detalles técnicos de las turbinas ensayadas por Eriksson (2008)

Eriksson (2008) argumenta que las palas de las VAWT no son necesariamente más grandes que las de las HAWT. Desarrolla el concepto de que la superficie total de las palas depende principalmente de la solidez, que está directamente relacionado con la velocidad específica (λ) de la turbina. Donde a mayor velocidad específica (λ), menor solidez se requiere, de modo que las palas pueden ser más pequeñas sin afectar negativamente el rendimiento de la turbina. Sin embargo, advierte que una reducción excesiva de la solidez puede comprometer la resistencia de las palas.

A continuación, se presenta la tabla con los resultados del estudio:

Turbine	Tip speed ratio	$C_{P,max}$ (theoretical)	Solidity	Blade area fraction
H-rotor	4	0.45	0.30	2.50
H-rotor	5	0.43	0.20	1.67
H-rotor	6	0.38	0.12	1.00
Darrieus	5.4	0.44	0.13	2.91
HAWT	5–7	0.47	0.06	1.00

Tabla 3: Resumen de Resultados según tipo de Aerogenerador por Eriksson (2008)

El autor concluye que las turbinas de eje vertical, especialmente el diseño H-rotor, ofrecen ventajas significativas en términos de simplicidad, reducción de ruido y posibles ahorros en costos de operación y mantenimiento. A medida que la tecnología de las turbinas de eje vertical avanza, se espera que su eficiencia se equipare cada vez más con las turbinas de eje horizontal. Sin embargo, Eriksson señala que aún existen desafíos que deben superarse para mejorar la competitividad de este tipo de turbinas.

La elección entre una VAWT y una HAWT dependerá de las necesidades específicas del proyecto, considerando factores como el régimen eólico local, las limitaciones de emplazamiento, el entorno donde se instalará la turbina y las preocupaciones ambientales y acústicas, entre otros.

Por ejemplo, en un caso de estudio integral como el presentado en este trabajo integrador, donde se debe instalar una turbina en una base científica en la Antártida, las limitaciones económicas, climáticas y logísticas hacen que la turbina Darrieus H sea una opción viable.

Mats Wahl (2007) plantea el diseño de una turbina eólica de rotor en H para la Estación del Polo Sur de Amundsen-Scott, con el objetivo de generar una potencia media de 5 kW a una velocidad promedio de 6.7 m/s, destinada a la calefacción de equipos de perforación almacenados en contenedores en la base.

Teniendo en cuenta las consideraciones de diseño, Wahl desarrolla los criterios para la turbina, la estructura de la torre y el generador, considerando las condiciones climáticas extremas de la Antártida, como las temperaturas extremadamente bajas y los vientos intensos.

Para el caso planteado, a partir del análisis de las condiciones meteorológicas del Polo Sur, Wahl indica la necesidad de seleccionar un perfil de pala más grueso para garantizar la resistencia estructural y permitir a la turbina soportar cargas aerodinámicas extremas. Además, sugiere que la estructura debe ser robusta para soportar los vientos intensos y recomienda el uso de materiales resistentes a bajas temperaturas para asegurar la operatividad de la turbina en el entorno antártico.

Respecto a la formación de hielo, Wahl detalla que, debido a la baja humedad y al aire seco del Polo Sur, el riesgo de formación de hielo es mínimo, reduciendo la necesidad de sistemas de descongelación específicos. El autor propone elevar la turbina a una altura de 10 m sobre la nieve, utilizando la estructura de la torre o los contenedores como base para evitar la acumulación de nieve en la turbina. Además, sugiere diseñar estructuras con aberturas mínimas para las partículas de nieve y utilizar métodos de sellado o filtrado cuidadosos cuando sea necesario.

A su vez, Wahl recomienda utilizar lubricantes sintéticos aptos para bajas temperaturas y acero resistente al frío para las piezas de la turbina, debido a los efectos adversos de las bajas temperaturas en los materiales.

Wahl (2007) presenta un diseño viable para una turbina eólica de rotor en H que puede proveer energía de manera confiable en la estación del Polo Sur de Amundsen-Scott. El diseño tiene en cuenta las limitaciones específicas del sitio, incluyendo las condiciones climáticas extremas y los fuertes vientos, y utiliza materiales y métodos de construcción que pueden soportar estas condiciones.

Si bien el estudio realizado en Amundsen-Scott sugiere que la formación de nieve es poco probable en el sitio, para nuestro caso de estudio, esto no es aplicable debido a las

diferentes condiciones climáticas y geográficas de la Base Marambio. La Base Marambio se encuentra en una zona costera, donde la mayor humedad, las temperaturas más moderadas y la influencia oceánica y topográfica hacen que este sitio sea más propenso a las nevadas y la formación de hielo.

3. Normas IEC relevantes para el diseño y operación de aerogeneradores

Las Normas IEC (International Electrotechnical Commission) son fundamentales en el diseño y operación de aerogeneradores ya que establecen estándares de seguridad y rendimiento que garantizan la fiabilidad y eficiencia de los sistemas de energía eólica. Además, proporcionan un marco común para fabricantes, operadores y reguladores, facilitando la interoperabilidad y la comparabilidad entre diferentes sistemas.

Estas normas ayudan a optimizar el diseño de los aerogeneradores para diferentes condiciones ambientales, incluyendo climas fríos, lo que es particularmente relevante para este proyecto.

A continuación, se describen las normas y lineamientos relevantes para el diseño y operación de aerogeneradores en el contexto de este proyecto:

[IEC 61400-1: Sistemas de Generación Eólica - Parte 1: Requisitos de Diseño](#)

Esta norma se centra en las especificaciones técnicas para el diseño de sistemas generadores de energía eólica. El objetivo general de la norma IEC 61400-1 es garantizar que los aerogeneradores estén diseñados para soportar las cargas esperadas, funcionar correctamente y operar de manera confiable en el entorno previsto.

En lo referido al diseño de aerogeneradores en climas fríos, esta norma desarrolla la sección 14 “Cold Climate, Anexos A.2 y Anexo L”, donde se abordan los parámetros de diseño, y cálculos de seguridad para los climas fríos. Sin embargo, las referencias son principalmente hacia turbinas de eje horizontal.

Dentro de los métodos de detección de hielo propuestos en la norma se detallan:

- Uso de detectores de hielo específicos que miden la severidad y/o la duración de las condiciones climáticas y/o instrumentales de formación de hielo.

-
- *Uso de un par de anemómetros de copa con calefacción, que se pueden utilizar para aproximar la duración de la formación de hielo instrumental.*
 - *Sistema de cámara en un componente estacionario, por ejemplo, un mástil meteorológico, o un componente giratorio como las palas.*
 - *Mediciones u observaciones a través de la altura de la base de la nube y/o la visibilidad y la temperatura.*
 - *Otro método validado para evaluar la formación de hielo meteorológica.*
 - *Equipo de medición y/o el aerogenerador también pueden verse afectados por un fenómeno llamado formación de hielo secundario. La formación de hielo secundario se forma a través del proceso de acumulación de hielo, derretimiento y recongelación. La formación de hielo secundario puede afectar, por ejemplo, la disponibilidad y confiabilidad del instrumento.*

IEC 60721-2-1: Clasificación de las condiciones ambientales - Parte 2-1: Condiciones ambientales que aparecen en la naturaleza - Temperatura y humedad

Esta norma define un marco para clasificar diferentes zonas ambientales en función de sus rangos de temperatura y humedad. Proporciona un sistema de clasificación para estas condiciones ambientales naturales. Esta clasificación es importante para diversas aplicaciones, incluyendo:

- *Selección de materiales: Comprender los niveles de temperatura y humedad a los que estará expuesto un equipo permite a los ingenieros elegir materiales apropiados que puedan soportar esas condiciones sin degradarse.*
- *Consideraciones de diseño: Conocer los extremos de temperatura y humedad esperados permite diseñar equipos que puedan funcionar correctamente dentro de ese rango.*
- *Estudio del rendimiento: La clasificación de las condiciones ambientales proporciona una base para predecir cómo el rendimiento del equipo podría verse afectado por las variaciones de temperatura y humedad.*

4. Tecnología Aeronáutica

Las tecnologías aeronáuticas juegan un papel crucial en la seguridad y eficiencia del vuelo, especialmente en climas fríos, como los presentados en nuestro caso de estudio. Por ello, es fundamental estudiar los fenómenos asociados a la formación de hielo.

*El Equipo Europeo de Seguridad de la Aviación General, **EGAST (2017)**, elaboró un documento para ayudar a los pilotos de aviones simples que carecen de sistemas modernos de protección anti-hielo. Este documento describe los fenómenos relevantes, y propone una serie de instrucciones orientativas sobre cómo manejar la formación de hielo en la estructura externa del avión durante el vuelo.*

EGAST explica que cuando una aeronave está expuesta a temperaturas bajo cero, el agua líquida que impacta en su estructura puede formar hielo, y afectar las condiciones aerodinámicas. A temperaturas extremadamente bajas, el hielo se forma principalmente cerca del borde de ataque, mientras que, a temperaturas cercanas al punto de congelación, se extiende hacia atrás, cubriendo una mayor área.

El Equipo Europeo de Seguridad de la Aviación General menciona que, en nubes con temperaturas bajo cero, no siempre ocurre que las gotas de agua se conviertan en hielo. Si no hay partículas alrededor de las cuales estas gotas puedan cristalizarse, las mismas permanecen en un estado que se denomina “superenfriadas”, y pueden llegar a temperaturas de -40 °C en estado líquido. Este fenómeno es común en nubes convectivas, que se forman por corrientes de aire caliente que asciende y aire frío que desciende.

Las nubes convectivas pueden formar estratocúmulos cuya densidad y color dependen del desarrollo vertical. A menor desarrollo vertical, la nube es más densa y tiene un color más oscuro por su mayor concentración de agua. Por otro lado, mientras mayor es el desarrollo vertical, la nube es más clara, y la concentración de gotas de agua se distribuye en un área más grande, dando lugar a una mayor concentración de gotas de agua superenfriada. Es más frecuente encontrar este tipo de gotas de agua en las zonas superiores de las nubes convectivas.

Por lo tanto, la formación de hielo, según EGAST, dependerá de la concentración de agua líquida superenfriada y del tamaño de las gotas. Cuando una nube contiene principalmente partículas cristalizadas, presenta un escenario más favorable para el vuelo, ya que la

posibilidad de encontrar agua líquida superenfriada que se adhiera a la estructura de la aeronave es menor.

En cuanto a la nieve seca, EGAST indica que representa un riesgo menor de formación de hielo en la estructura de la aeronave, ya que no se adhiere fácilmente. Sin embargo, las tomas de aire y los bordes de ataque son más susceptibles a la acumulación de hielo.

Las precipitaciones suelen comenzar como hielo y convertirse en nieve, granizo o lluvia al atravesar distintas capas atmosféricas. Si la lluvia atraviesa una inversión térmica y regresa a temperaturas bajo cero, puede formar una peligrosa "lluvia de hielo", que es difícil de detectar y se acumula rápidamente en la estructura del avión.

EGAST (2017) describe cómo la presencia de hielo en las superficies de la aeronave afecta su comportamiento aerodinámico, destacando la reducción de la sustentación y el aumento de la resistencia para un ángulo de ataque determinado. Además, la eficiencia de la hélice y su empuje disminuyen, y el peso de la aeronave aumenta debido a la acumulación de hielo. Esto requiere una mayor fuerza de sustentación para mantener el vuelo, lo que a su vez **eleva la velocidad crítica de entrada en pérdida**.

Para compensar el peso adicional y mantener la sustentación adecuada, es necesario aumentar la velocidad mínima de vuelo y el ángulo de ataque. EGAST (2017) también menciona que tecnologías como los flaps pueden ayudar a recuperar el control de la aeronave en estas condiciones.

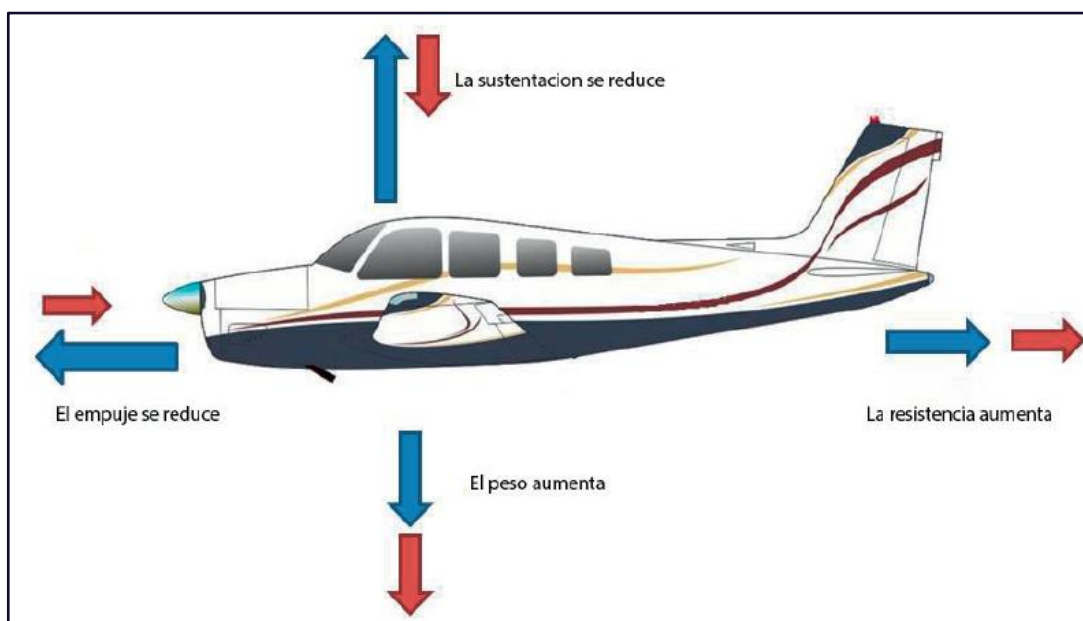


Figura 3: Esquema sobre el efecto de la presencia de hielo en una aeronave

Por otro lado, EGAST (2017), señala que los efectos de compresión adiabática en el flujo de aire alrededor de la aeronave a altas velocidades de vuelo pueden hacer que la estructura externa del avión esté unos grados por encima de la temperatura del aire exterior (1°C a 100 nudos de velocidad y 4°C a 200 nudos). Esta información es fundamental para la detección temprana de formación de hielo mediante sensores de temperatura.

La velocidad de acumulación de hielo en la estructura de la aeronave depende tanto de las condiciones atmosféricas como de la geometría de la estructura misma. Según los autores (EGAST, 2017), la forma geométrica del área donde se acumula hielo afecta tanto la velocidad de acumulación como la gravedad de esta acumulación. El hielo tiende a acumularse primero en las áreas con un radio de curvatura pequeño. Por lo tanto, se acumulará inicialmente en el plano de cola antes que en el ala.

En las alas, los radios de curvatura pequeños se encuentran en los bordes de ataque y de fuga. Esto se puede observar en la imagen siguiente, donde se muestra la formación de hielo sobre el borde de ataque de un ala.

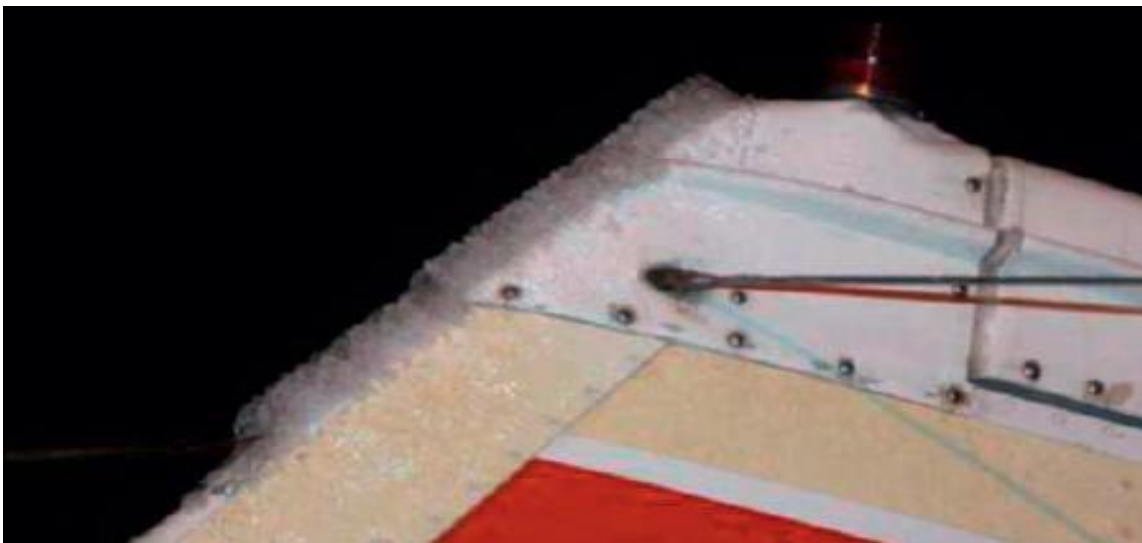


Figura 4: Formación de hielo en un radio de curvatura pequeño (EGAST, 2017)

También se puede encontrar indicativos de formación de hielo en el cono de la hélice o en el marco del parabrisas. Estos escenarios según los autores son relevantes para el piloto para reconocer rápidamente la formación de hielo en la aeronave.

EGAST menciona que las velocidades de acumulación son difíciles de predecir ya que bajo condiciones que pueden parecer iguales, se puede tener velocidades de acumulación

de hielo muy diferentes (de un orden de magnitud o más). Por este motivo, considera que la detección temprana del hielo es relevante.

Previo al despegue se debe eliminar cualquier contaminación por hielo que exista en las superficies de la aeronave para evitar dificultades en el manejo o control, o para evitar pérdidas de performance o daños mecánicos.

El deshielo es un procedimiento que elimina la nieve, escarcha y aguanieve de la aeronave, y las medidas antihielos evitan que esa contaminación de hielo se genere por un periodo limitado de tiempo (Hold Over Time).

EGAST (2017), detalla distintos fluidos que se utilizan como para el deshielo y control antihielo:

- Tipo I (solo deshielo), suelen ser a base de propilenglicol.
- Tipos II/III/IV (fluidos anti-hielo), contienen un agente espesante polimérico que permite que el fluido forme una película humectante líquida más espesa en las superficies externas de la aeronave.
- El fluido Tipo III está destinado a aeronaves con una velocidad de rotación (VR) lenta.

La Figura 5 muestra la ejecución de una operación de deshielo en tierra.



Figura 5: Operación de Deshielo en Tierra (Sir Chandler, 2023)

5. Tecnología del Hielo aplicadas en Turbinas Eólicas

Diferentes organizaciones comercializan, investigan y realizan ensayos en laboratorio relacionados con las Tecnologías de Hielo aplicadas en turbinas eólicas.

*Entre ellas, la empresa danesa **Vestas Wind Systems A/S** ha desarrollado el programa "Vestas Cold Climate Solutions" que ofrece una gama de productos diseñados para operar en climas fríos, específicamente en turbinas de eje horizontal.*

Dentro de este programa, Vestas propone varias soluciones:

1. Vestas Low Temperature Option

Este sistema permite que la turbina opere a temperaturas de hasta -30°C y soporte hasta -40°C en pausa. Para asegurar el funcionamiento de componentes sensibles a la temperatura en la góndola, se emplean elementos calefactores, como nacelle fan heaters. Además, se utilizan mantas calefactoras en el acumulador hidráulico para evitar que el aceite se vuelva viscoso a bajas temperaturas. El monitoreo de la temperatura y la densidad del aire en la cabina activa los elementos de calefacción, manteniendo un ambiente óptimo para el funcionamiento de la góndola. Sin embargo, esta opción no aborda el problema del congelamiento o la acumulación de nieve en las palas.

2. Vestas Ice Detection

Este sistema detecta la presencia de hielo tanto en la góndola como en las palas de la turbina. Evalúa las condiciones de oscilación del flujo de frecuencia natural en las palas, lo que permite identificar el riesgo de desprendimiento y proyección de hielo. También detecta la acumulación de hielo en la góndola mediante la reducción del rendimiento de la curva de potencia.

3. Vestas De-Icing

Para maximizar la producción de energía, Vestas ha desarrollado un sistema de deshielo que se activa a través del sistema SCADA. Este sistema requiere detener la turbina, tras lo cual se circula aire caliente dentro de las palas para deshelas. El proceso de deshielo se concentra en el tercio exterior de la pala y en el borde de ataque del perfil, las áreas donde el hielo impacta más significativamente en la eficiencia de la turbina.

4. Vestas Anti-Icing System

Este sistema ofrece una solución continua al problema del hielo, sin necesidad de detener la turbina. Monitorea de forma continua la formación de hielo y se activa automáticamente para eliminar el hielo mientras la turbina está en funcionamiento. El sistema combina elementos calefactores independientes y en niveles, lo que permite una acción antihielo adaptada al evento específico de formación de hielo. Esto asegura una alta producción de energía en climas fríos y es particularmente eficaz en sitios con severidad de hielo baja a alta. La Figura 6 muestra un esquema ejemplificativo que ilustra la aplicación de los sensores y tecnologías utilizadas por Vestas para la acción antihielo en sus turbinas.

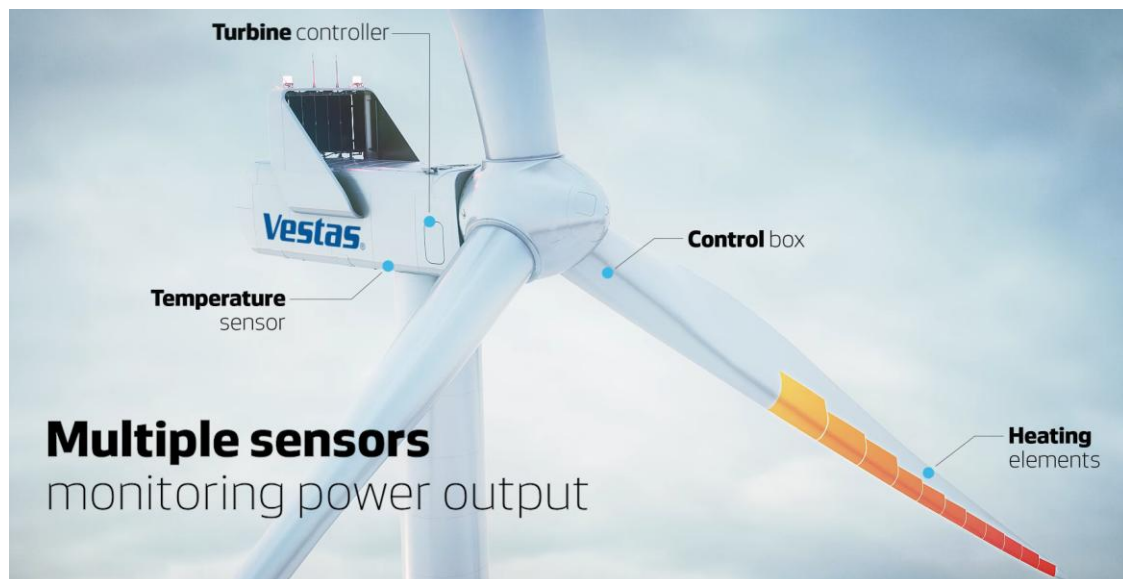


Figura 6: Esquema ejemplificativo de aplicación de manta térmica por Vestas

5. Vestas Anti-Icing System

Para evaluar los desafíos de formación de hielo, Vestas utiliza modelos y algoritmos meteorológicos avanzados que predicen la exposición al hielo de cada turbina en un parque eólico específico. Este sistema pronostica las condiciones de formación de hielo, la acumulación en las palas y las pérdidas esperadas, permitiendo una evaluación precisa de la producción total de energía en sitios de climas fríos.

6. Vestas Ice Control

Como parte del sistema SCADA, Vestas integra y coordina las funciones de rotación y pausado de la turbina con diversas acciones de mitigación de hielo. Este sistema

mejora la seguridad al pausar la turbina cuando la acumulación de hielo es crítica, reduce el tiempo de operación bajo alto riesgo de desprendimiento de hielo y reanuda automáticamente la operación cuando el riesgo disminuye. Además, elimina el hielo de las palas mientras la turbina está en modo de seguridad, representando la solución más avanzada dentro de los programas de Cold Climate Solutions de Vestas.

La Figura 7 muestra un esquema detallado del "Vestas Cold Climate Program", que ilustra las soluciones ofrecidas por Vestas Wind Systems A/S para la operación de turbinas eólicas en climas fríos. El esquema destaca la integración de diferentes funcionalidades y tecnologías diseñadas para maximizar la producción de energía y garantizar la seguridad en condiciones de hielo. Se presentan desde las opciones básicas de operación a baja temperatura hasta sistemas avanzados de evaluación de riesgos y control del hielo, incluyendo la integración con el sistema SCADA para una gestión optimizada. Este diagrama ofrece una visión general de cómo las diferentes soluciones se combinan para mitigar los desafíos asociados con la formación de hielo en turbinas eólicas.

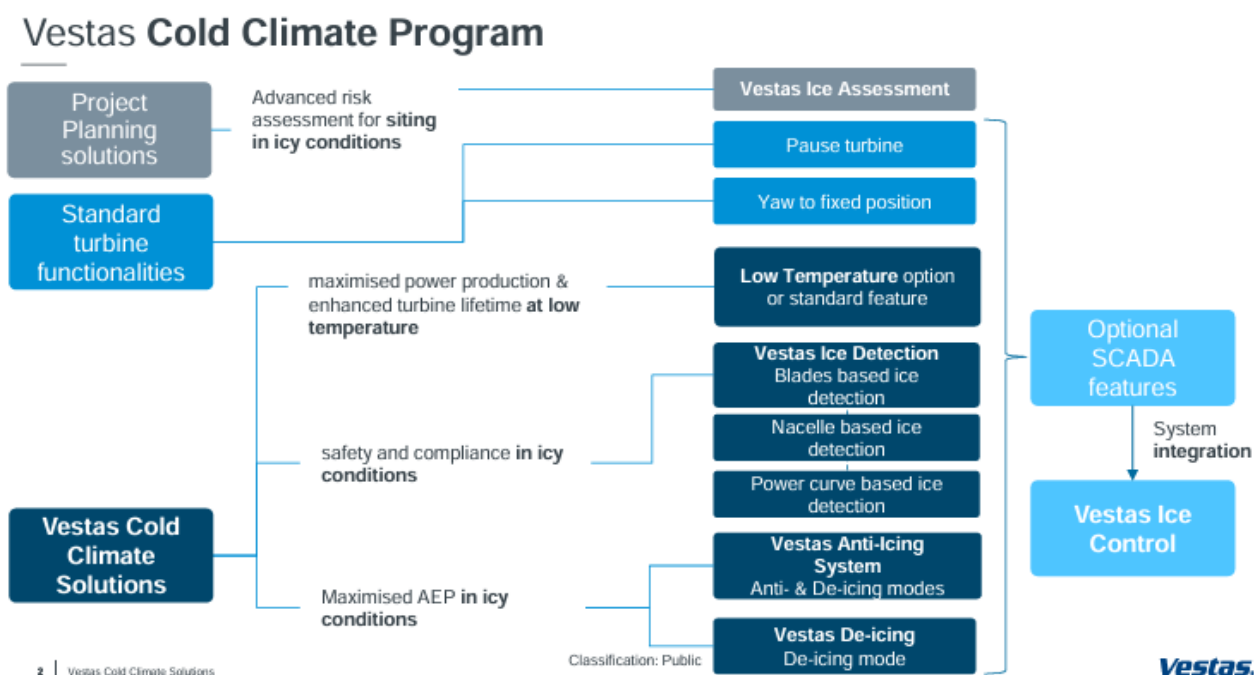


Figura 7: Resumen de Tecnologías en el Programa de Cold Climate de Vestas

Por otro lado, **Siemens Gamesa** utiliza una tecnología denominada "Rotor Blade Ice Detection", diseñada para detectar la formación de hielo en las palas de las turbinas eólicas y así prevenir su impacto negativo en la producción de energía y la seguridad.

Esta tecnología opera de manera similar al sistema Vestas Ice Detection, pero presenta diferencias clave. Siemens Gamesa emplea sensores de fibra óptica para la detección de hielo, mientras que Vestas utiliza sensores de temperatura y humedad convencionales. Además, el sistema Rotor Blade de Siemens Gamesa se distingue por su capacidad de detectar hielo con un peso mínimo de 10 kg por pala, una especificación de sensibilidad que no se menciona en la información disponible sobre el sistema de Vestas.

Otra empresa que ha desarrollado tecnologías para enfrentar el riesgo de formación de hielo es **ENERCON**. Las soluciones que ofrece son comparables a las de Vestas, con ambos fabricantes presentando sistemas de detección de hielo basados en el análisis de la curva de potencia, el uso de sensores de humedad y temperatura, así como en la aplicación de modelos y algoritmos predictivos.

En cuanto al deshielo de palas, ENERCON implementa un sistema de calentamiento mediante calefactores de aire, que recirculan aire caliente a lo largo de la pala. Este proceso eleva la temperatura de la superficie por encima de los 0°C, derritiendo el hielo acumulado. El sistema puede activarse mientras el aerogenerador sigue en funcionamiento, aunque en situaciones críticas, donde la temperatura desciende significativamente, es necesario detener el aerogenerador para llevar a cabo la descongelación de las palas.

La Figura 8 presenta un esquema detallado de este sistema, ilustrando cómo los calefactores de aire recirculan el aire caliente a lo largo de las palas para elevar su temperatura y derretir el hielo acumulado.

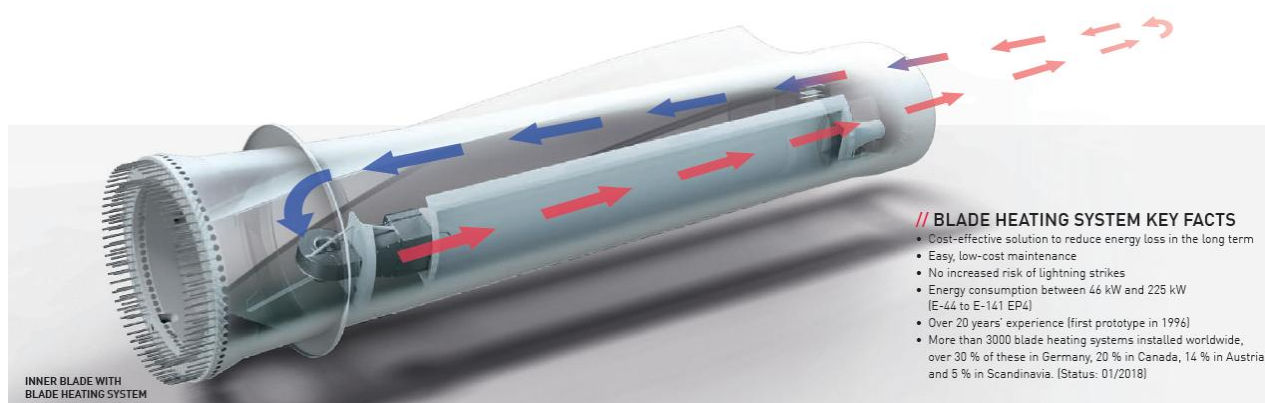


Figura 8: Esquema de funcionamiento de calentadores en las palas

La empresa **Wicetec Oy**, ofrece el sistema **WISP** (Wicetec Ice Prevention System) para prevenir la formación de hielo en las palas de turbinas eólicas. Este sistema combina detección avanzada de hielo y calentamiento controlado de las palas.

El sistema de detección de hielo emplea sensores ubicados en la cabina y en las palas, los cuales utilizan diversas tecnologías, incluidas la evaluación de la curva de potencia, la temperatura, la humedad y las vibraciones.

Para el descongelamiento, **WISP** utiliza calefactores eléctricos de fibra de carbono, que calientan rápidamente la superficie de las palas, evitando la formación de hielo. El tejido de carbono empleado es altamente eficiente en la conducción de electricidad, resistente a la fatiga mecánica, y su delgada estructura (0.5 mm) no afecta la aerodinámica de las palas. Además, la temperatura de calentamiento se regula automáticamente para proteger los materiales de las palas. Este sistema también es robusto frente a sobretensiones provocadas por rayos.

La Figura 10 ilustra la disposición de los calentadores en las palas y los componentes en la cabina.

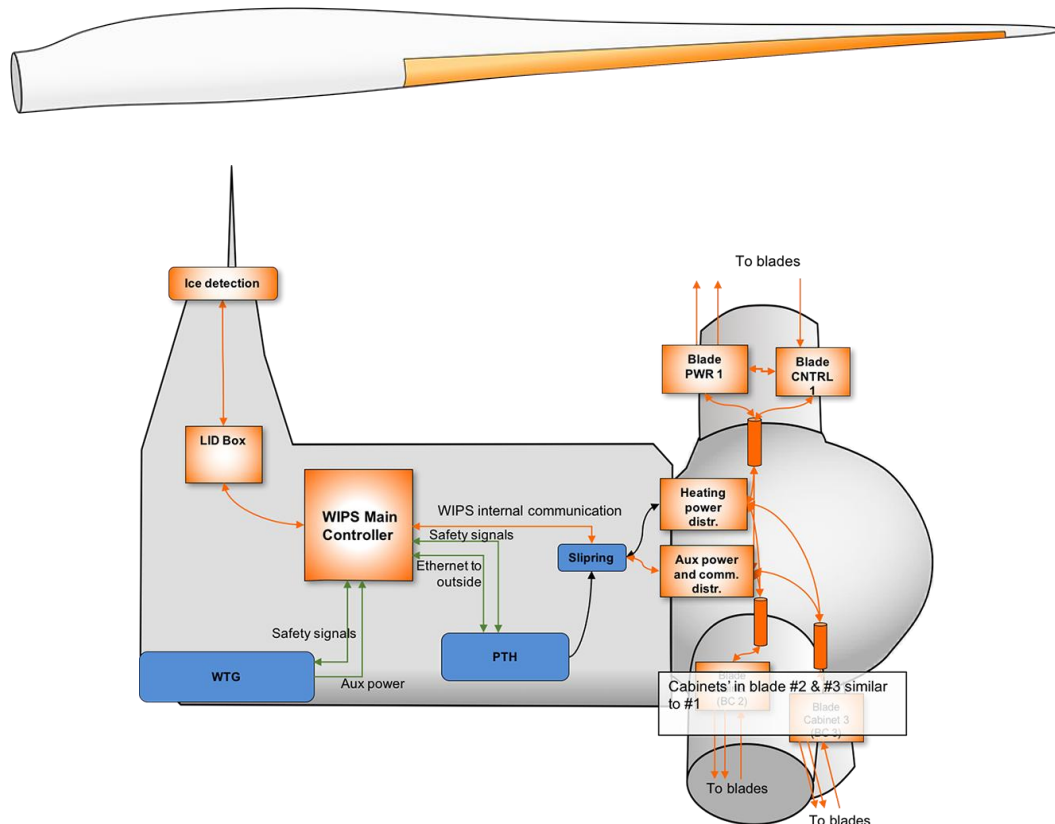


Figura 9: Esquema de ubicación de calentadores en palas y componentes en cabina

Por otro lado, **Weather Guard Lightning Tech** ha desarrollado “A Guide to Wind Turbine Blade Anti-Icing Technologies”, una guía detallada sobre las tecnologías y recomendaciones para asegurar la operatividad de los parques eólicos en climas fríos. En esta guía se recomiendan los siguientes sistemas y tecnologías:

1. **Sistemas de Detección de Hielo:**

Estos sistemas emplean una combinación de sensores de temperatura, humedad y flujo de aire, junto con anemómetros y cámaras, para detectar la formación incipiente de hielo en las palas. La información recopilada permite predecir la acumulación de hielo y activar mecanismos de prevención. Los sensores pueden instalarse en la góndola, en las propias palas o en ambas ubicaciones para mejorar la precisión.

2. **Sistemas de Calefacción de Palas:**

La calefacción de palas es un método común para prevenir la formación de hielo. Consiste en calentar el borde de ataque de la pala, impidiendo la acumulación de hielo. Estos sistemas pueden integrarse durante la fabricación del aerogenerador o como una actualización posterior (retrofit). Sin embargo, en el caso de retrofit, se requiere el desmontaje de las palas para la instalación de los elementos calefactores en un entorno controlado.

Los autores mencionan como empresas destacadas en estas soluciones a **Borealis Wind**, cuyo sistema utiliza aire caliente impulsado a través del interior de la pala a lo largo del borde de ataque, y **Wicetec**, que emplea calefactores de fibra de carbono integrados en las palas, tal como se detalla en la sección anterior.

Weather Guard destaca la importancia de cómo la alteración de la temperatura en el borde de ataque de las palas puede afectar el flujo de viento y, en consecuencia, la producción de energía. Además, aunque la calefacción por aire caliente se emplea para combatir la formación de hielo en las palas de aerogeneradores, en el caso de palas de gran tamaño, se requiere un volumen considerable de aire caliente para su calefacción, lo que puede hacer que el sistema sea ineficiente.

Es importante señalar, como explican los autores, que el sistema de calefacción por aire caliente actúa principalmente como descongelante, es decir, interviene una vez que el hielo ya se ha formado. Esto implica la necesidad de detener el

aerogenerador durante el proceso de descongelamiento, lo que conlleva una pérdida en la producción de energía.

Considerando las desventajas del sistema de calefacción por aire caliente, la tecnología de fibra de carbono resulta ser una alternativa más atractiva, ya que calienta directamente la superficie de las palas y se activa antes de la formación del hielo. Esto evita la parada del aerogenerador y maximiza la producción de energía.

3. **Recubrimientos Antihielo:**

Los recubrimientos antihielos son una tecnología emergente inspirada en la industria aeroespacial. Estos recubrimientos se aplican a la superficie de las palas y, si bien no evitan totalmente la formación de hielo, facilitan su desprendimiento, minimizando la acumulación y permitiendo una limpieza más rápida y eficiente. Esto reduce el riesgo de paradas forzadas y mejora la producción general de energía.

Los autores remarcen las soluciones propuestas por **Elemental Coatings**, una empresa con amplia experiencia en recubrimientos antihielo para la industria aeroespacial, que está adaptando su experiencia en recubrimientos antihielo para su aplicación en aerogeneradores.

La Figura 10 muestra la aplicación de recubrimientos antihielo sobre una placa metálica, un procedimiento relevante en la adaptación de estas tecnologías para aerogeneradores.



Figura 10: Aplicación de recubrimiento sobre placa metálica (Elemental Coatings)

En otro orden, **Tahir y Virk (2021)**, en el artículo “Vertical axis wind turbine operation in icing conditions”, analizan el potencial de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) como una alternativa viable para la generación de energía eléctrica en regiones frías propensas a la formación de hielo.

Según los autores, los climas fríos presentan una densidad de aire mayor, lo que es un parámetro ventajoso en la función de generación de energía, sin embargo, estos climas conllevan grandes desafíos y limitaciones cuando aparece la formación de hielo.

Tahir y Virk, destacan la creciente demanda de energía eólica y las ventajas que presentan las VAWT en comparación con las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) tradicionales, así como también las limitaciones. A su vez, mencionan que los estudios y experimentos realizados en VAWT, principalmente fueron ejecutados sobre modelos de turbina Darrieus H de palas rectas.

Los autores, describen el desafío que representa la acumulación de hielo en las VAWT y la limitada literatura disponible sobre este tema. Desarrollan dos técnicas principales para estudiar los efectos de la formación de hielo en las VAWT.

1. Experimentos en túneles de viento

Esta técnica permite recrear condiciones de congelación controladas y observar directamente su impacto en las aspas de la turbina.

Varios estudios en túnel de viento han demostrado que la formación de hielo depende del tipo de perfil y del ángulo de ataque de las palas, y que el hielo afecta la forma aerodinámica de la pala, reduciendo su rendimiento. Además, se ha observado que un mayor ángulo de ataque incrementa el área de acumulación de hielo.

Finalmente, los autores hacen foco en que los estudios realizados hasta la fecha han considerado únicamente un rango limitado de velocidades de rotación de la VAWT, con un Tip Speed Ratio (TSR) de 0 a 1.

2. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD):

Esta técnica se utiliza para simular el flujo de aire y la formación de hielo sobre las palas mediante modelos numéricos.

Las simulaciones numéricas confirman que la velocidad del viento y el flujo de agua son factores clave en la formación de hielo. Un mayor ángulo de ataque expone una mayor superficie de la pala al viento, lo que aumenta la formación y distribución del hielo.

Además, se observan diferencias en la forma de acumulación de hielo según el tipo de hielo presente, como glaseado o escarcha. Los resultados de las simulaciones estudiadas por los autores permiten confirmar que la acumulación de hielo glaseado implica mayores pérdidas en el rendimiento en comparación con el hielo en escarcha, ya que altera drásticamente la aerodinámica del perfil.

Tahir y Virk, profundizan en el impacto del hielo de escarcha y del hielo glaseado en la aerodinámica de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT). Su estudio abarca diferentes escenarios tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Aunque el hielo en escarcha tiene implicaciones menores en comparación con el hielo glaseado, sigue siendo un fenómeno que debe ser mitigado. Es importante destacar que la formación de hielo afecta a la totalidad del perfil de la pala, y no solo a un borde del mismo, lo que representa una limitación significativa en el diseño y operación de las VAWT.

Los autores contrastan los coeficientes de torque estático y dinámico, y concluyen que una VAWT operando en condiciones de formación de hielo podría funcionar con normalidad al inicio, pero eventualmente alcanzaría un punto crítico donde el exceso de resistencia impediría la generación de energía.

Por otro lado, los autores identificaron una reducción significativa en la relación sustentación-resistencia (C_l/C_d) debido a la presencia de hielo, especialmente en el caso del hielo glaseado. Dado que las VAWT operan a altas velocidades de rotación, la formación de hielo glaseado a lo largo de toda la pala es más probable, lo que agrava aún más las pérdidas de rendimiento.

Tahir y Virk, remarcan la importancia del impacto del hielo sobre la integridad estructural de las turbinas, incluyendo la fatiga de los puntales y la necesidad de un diseño resistente, y además indican que, según los estudios realizados, las pérdidas por formación de hielo pueden alcanzar hasta el 58% de la generación anual en turbinas de eje vertical.

La Figura 11 muestra las diferentes estructuras de formación de hielo.

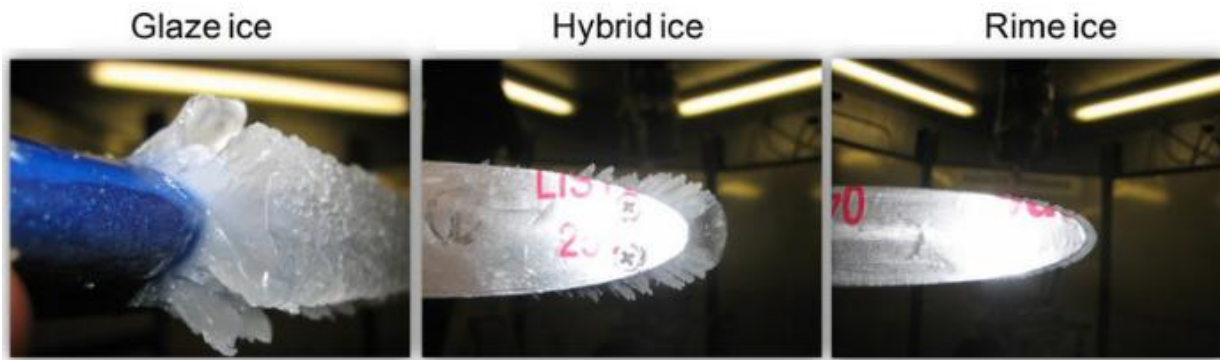


Figura 11: Diferentes formaciones de hielo en estructuras (Yiqiang Han, 2011)

Los autores clasifican los métodos de detección de hielo en dos categorías principales: *detección directa e indirecta*. A continuación, se describen estos métodos abordados por los autores y se evalúa la factibilidad de cada uno:

1. Detección Directa: Este enfoque utiliza sensores instalados en los componentes de la turbina para identificar la presencia de hielo.

- a. *Ultrasonido:* Se transmiten ondas sonoras hacia receptores instalados en la turbina, y se analiza su atenuación para detectar la formación de hielo. Este método no es viable para las VAWT debido a la rotación de las palas y la formación de hielo en todas las caras del perfil.
- b. *Propiedades eléctricas:* Detecta cambios en las propiedades eléctricas del material cuando el hielo se adhiere a la superficie. Requiere la instalación de sensores en todas las direcciones y ángulos de las palas, lo cual resulta impráctico para las VAWT debido a la cantidad de sensores necesarios.
- c. *Infrarrojo:* Utiliza sensores para detectar cambios en la radiación infrarroja emitida y reflejada por el hielo. Este método es efectivo para detectar hielo meteorológico en parques eólicos VAWT, pero no detecta hielo dentro de la estructura de la turbina.
- d. *Variación en la Carga:* Detecta el peso adicional del hielo acumulado en un sensor. Este método no se instala directamente en las palas y su precisión es limitada, ya que no detecta pequeñas formaciones de hielo.

-
- e. *Frecuencia de resonancia: Detecta el cambio en la frecuencia de vibración de un sensor debido a la presencia de hielo. Este método puede colocarse cerca de la turbina.*
 - f. *Cambio de temperatura: Compara la temperatura ambiente con una referencia para detectar la presencia de hielo. Aunque proporciona información útil, no cuantifica la cantidad de hielo acumulado, limitando su eficacia en la operación de las VAWT.*

2. Detección Indirecta: *Analiza los cambios en los parámetros ambientales y meteorológicos para inferir la presencia de hielo.*

- a. *Potencia real vs esperada: Compara la potencia generada con la esperada según la velocidad del viento. La presencia de hielo se infiere a partir de las diferencias en la potencia generada. Sin embargo, las variaciones naturales en la producción de energía de las VAWT pueden dificultar la detección precisa de hielo, especialmente en casos leves.*
- b. *Anemómetro calefaccionado vs no calefaccionado: Detecta la formación de hielo en el anemómetro mismo. Se colocan dos anemómetros, uno calefaccionado y otro de referencia. Cuando se encuentran diferencias en las mediciones, se utilizan relaciones para deducir la presencia de hielo. Aunque este método es efectivo, no refleja necesariamente la formación de hielo en las palas de la VAWT, lo que puede generar errores.*
- c. *Datos meteorológicos: Analiza información como temperatura, humedad y tamaño de gotas de agua para predecir la formación de hielo. Aunque es un método accesible, es poco confiable debido a la posibilidad de falsos positivos y a la falta de cuantificación de la cantidad de hielo en las palas.*
- d. *Cambios en el ruido de la turbina: Compara el ruido generado por las palas heladas con el ruido en condiciones normales. Este método es altamente sensible al ruido ambiental y requiere modelos predictivos aún en desarrollo, especialmente para las VAWT, lo que lo hace poco factible.*
- e. *Cambios en la frecuencia de resonancia: Detecta hielo a través de las vibraciones adicionales generadas en la turbina. No se considera factible para VAWT debido*

a su instalación en ambientes urbanos, y se trata de un sistema sofisticado y sensible a errores relacionados con el funcionamiento de las turbinas.

- f. *Machine Learning*: Este método novedoso utiliza redes neuronales entrenadas con datos históricos para predecir eventos de formación de hielo. Con una precisión del 84%, tiene el potencial de adaptarse tanto a turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) como a VAWT y se integra en sistemas SCADA.

Tahir y Virk abordan la mitigación del hielo en las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), destacando la importancia de implementar estrategias efectivas para minimizar el impacto del hielo y asegurar un funcionamiento óptimo de las turbinas. Las estrategias se dividen en activas y pasivas, y dentro de estas, se consideran métodos de antihielo (Anti - Icing) que evitan la formación de hielo, y descongelantes (De-Icing) donde se busca mitigar el hielo una vez que ya se formó sobre la estructura del aerogenerador.

1. Métodos Activos: Requiere el uso de tecnologías y consumo de energía.

- a. *Mantener la temperatura de la pala*: Calentar las palas con aire caliente o resistencias eléctricas es el método más común, pero consume mucha energía (1-4% de la producción anual). Para VAWT, calentar con aire caliente podría ser más sencillo que en HAWT (eólica horizontal) debido a la estructura de las palas. Sin embargo, calentar toda la superficie con resistencias sería más complejo y costoso que en HAWT.
- b. *Ultrasonido y microondas*: Tecnologías sin mucho desarrollo para eólicas. Los ultrasonidos rompen el hielo con vibraciones, y las microondas lo calientan mediante un recubrimiento especial de la pala. Podrían ser viables para VAWT, pero necesitan pruebas de campo.
- c. *Deshielo mecánico con botas flexibles*: Debido al menor tamaño de las VAWT comparadas con HAWT, este método podría ser beneficioso. Se trata de inflar y desinflar botas para quebrar el hielo. Se usa en aviación, pero aún está en desarrollo para eólicas por su complejidad y posible impacto en la aerodinámica.

2. Métodos Pasivos: No requieren consumo de energía, actúan debido al material de construcción.

-
- a. *Recubrimientos superficiales: Son económicos, pero tienen limitaciones. Existen recubrimientos hidrófobos y antihielo, pero ninguno evita completamente la formación de hielo y tienen una vida útil limitada.*
 - b. *Palas flexibles: En HAWT se han usado palas flexibles que se deforman para desprender el hielo. No parece viable para VAWT ya que podría aumentar el radio de la turbina a altas velocidades e incrementar la fatiga del material. Se necesitan estudios para analizar su aplicabilidad.*

Además, Tahir y Virk analizan la importancia del mantenimiento de las VAWT en condiciones de formación de hielo, considerando los riesgos y desafíos asociados con la acumulación y el desprendimiento de hielo. En un parque eólico, el hielo acumulado puede desprenderse y causar daños en estructuras cercanas, como otros aerogeneradores, edificaciones, e incluso poner en riesgo a personas, animales y aves.

También se abordan los impactos ambientales de la energía eólica, incluyendo el ruido, la mortalidad de aves, los daños por proyección de hielo y el impacto visual de los aerogeneradores. Se comparan estos impactos con los asociados a las turbinas eólicas horizontales (HAWT).

Finalmente, los autores destacan la necesidad de realizar investigaciones adicionales sobre el funcionamiento de las VAWT en condiciones de formación de hielo. Se subraya la importancia de desarrollar estrategias que permitan el uso efectivo de las VAWT en regiones frías propensas al hielo.

*Otro estudio relevante en el ámbito de las técnicas de mitigación de hielo en turbinas eólicas es el desarrollado por **Hanxiang Li et al. (2022)**, titulado "Review on Anti-icing and De-icing Techniques of Wind Turbine Blades". Este trabajo aborda los desafíos que enfrentan las turbinas eólicas en regiones de gran altitud o latitudes elevadas debido a la formación de hielo, lo cual afecta significativamente el rendimiento aerodinámico de las turbinas.*

En su revisión, Hanxiang Li et al. (2022) clasifican las técnicas Anti-Icing y De-Icing utilizadas en turbinas eólicas en dos categorías principales: Métodos Pasivos y Métodos Activos. Los métodos pasivos no requieren consumo energético y se basan en las propiedades físicas o químicas de los materiales aplicados, mientras que los métodos activos requieren un aporte energético para su funcionamiento.

A continuación, se detallan los métodos mencionados por Hanxiang Li et al. (2022):

1. Métodos Anti-hielo

○ Métodos Pasivos:

- *Químicos: Utilización de fluidos poliméricos para evitar la adherencia del hielo en las superficies de las palas.*
- *Revestimientos Antihielo (Coatings): Aplicación de recubrimientos especializados que reducen la adherencia del hielo a la estructura.*

○ Métodos Activos:

- *Resistencia Eléctrica: Uso de calentadores eléctricos para elevar la temperatura de la superficie de las palas.*
- *Capa de Aire: Circulación de aire dentro y en la superficie de la pala a través de pequeños orificios, creando una barrera que impide la formación de hielo.*
- *Aplicación de Microondas: Emisión de ondas electromagnéticas de longitud específica para calentar la superficie de las palas.*
- *Insuflación de Aire Caliente: Inyección de aire caliente en las palas para prevenir la acumulación de hielo.*

2. Métodos Descongelantes

- Métodos Pasivos:
 - *Aspas flexibles: Eliminación del hielo mediante la flexión de las palas por las fuerzas de corte.*
 - *“Blade Pitching”: Orientación de las palas hacia el sol para aprovechar la energía calorífica de la radiación solar.*
- Métodos Activos:
 - *Resistencias Eléctricas: Similar al método antihielo, pero enfocado en la eliminación del hielo ya formado.*
 - *Insuflación de Aire Caliente: Uso de aire caliente para derretir el hielo acumulado en las palas.*
 - *Descongelamiento Ultrasónico: Utilización de vibraciones ultrasónicas para desprender el hielo de las superficies.*
 - *Descongelamiento por Electroimpulso: Aplicación de una fuerza electromagnética repulsiva para desprender el hielo.*
 - *Descongelamiento Neumático: Uso de un sistema mecánico que infla una cobertura neumática en el borde de ataque de la pala, provocando el desprendimiento del hielo acumulado.*

La Tabla 4 compara las diferentes técnicas de prevención de hielo abordadas por Hanxiang Li et al. (2022), evaluando sus tipos de protección, la necesidad de modificaciones en las turbinas (WT Reform), el aumento de rugosidad en la superficie, las dificultades de control, el consumo operativo y la efectividad general.

TABLE I. COMPARISON AMONG ICE PREVENTION TECHNIQUES

	Protection Types	WT Reform	Roughness Increase	Control Difficulties	Operation Consumption	Effect
Chemicals	Anti-icing/De-icing	No	Low	No	No	Limited
Anti-icing Coatings	Anti-icing/De-icing	No	Medium	No	No	Limited
Black Coatings	Anti-icing/De-icing	No	Medium	No	No	Limited
Microwave	Anti-icing/De-icing	Yes	No	High	Low	Effective
Hot Air	Anti-icing/De-icing	Yes	No	Medium	High	Effective
Ultrasonic Wave	De-icing	Yes	No	High	Low	Effective
Electric Resistance	Anti-icing/De-icing	Yes	Low	High	High	Highly Effective
Electro-impulse	De-icing	Yes	Medium	High	Medium	Highly Effective
Pneumatic	De-icing	Yes	Medium	Medium	Low	Highly Effective

Tabla 4: Comparativa entre las diferentes técnicas de prevención de hielo (Li et al., 2022)

Entre los métodos mencionados, Li et al., 2022, destaca que los recubrimientos antihielo son efectivos para reducir la adherencia del hielo, sin embargo, su eficacia disminuye con el tiempo, especialmente después de varios ciclos de formación de hielo.

Por otro lado, los métodos térmicos, como el uso de resistencias eléctricas o aire caliente, presentan un alto consumo energético y una eficiencia limitada, haciendo de ellos una alternativa que no siempre es viable.

Las técnicas que emplean microondas y ultrasonidos, aunque tienen un bajo consumo energético y una rápida respuesta, son complejas y aún no se han adaptado completamente para su uso en aerogeneradores. Además, su resistencia a las tormentas eléctricas no ha sido verificada (Li et al., 2022).

Finalmente, según el autor, los métodos mecánicos, como el descongelamiento por electroimpulso o neumático, resultan más simples y económicos, con alta eficiencia energética, pero su desempeño frente a la fatiga y su aplicabilidad en aerogeneradores aún requieren mayor investigación.

Los estudios previos mencionados han abordado tecnologías en desarrollo para mitigar la formación de hielo en aerogeneradores. No obstante, la búsqueda de soluciones emergentes continúa siendo un área de investigación activa. Un ejemplo destacado es el trabajo de **Pettersson y Sollén (2019)**, quienes en su ensayo de maestría titulado “Experimental Investigation of a De-icing System for Wind Turbine Blades Based on Infrared Radiation” exploraron una alternativa innovadora basada en la radiación infrarroja para el deshielo de palas.

Pettersson y Sollén llevaron a cabo una investigación centrada en el desarrollo de un sistema de deshielo por infrarrojos para las palas de aerogeneradores, con el objetivo de abordar los riesgos de seguridad y las pérdidas de producción causados por la acumulación de hielo. Las autoras analizan primero los métodos de detección y anti-hielo más comunes en aerogeneradores ubicados en climas fríos, destacando las limitaciones de estas tecnologías, lo que las llevó a explorar alternativas como el calentamiento por infrarrojos.

El sistema de deshielo diseñado se instala en la torre del aerogenerador y opera descongelando una pala a la vez. Para lograrlo, emplea calentadores que irradian un haz concentrado de radiación infrarroja sobre las palas, con el fin de descongelar eficientemente toda la superficie. La Figura 12 ilustra el funcionamiento de este sistema, mostrando la disposición de los calentadores y su enfoque sobre las palas.



Figura 12: Ilustración del funcionamiento del sistema en estudio (Pettersson y Sollén, 2019)

En el transcurso de la investigación, se evalúan varios parámetros para optimizar la eficiencia del deshielo, como la demanda energética, la distancia entre las aspas y los calentadores, y la longitud de onda de la radiación. Las pruebas se llevaron a cabo en laboratorio bajo diferentes escalas y condiciones de formación de hielo, incluyendo tanto hielo seco como húmedo. La Figura 13 presenta imágenes de los calentadores utilizados en estos experimentos, así como del montaje experimental en el laboratorio.



Figura 13: Calentadores utilizados y experimento en laboratorio (Pettersson y Sollén, 2019)

Un aspecto crítico identificado por las autoras fue el impacto ambiental asociado a la luz visible emitida por los calentadores, especialmente los halógenos. Según Pettersson y Sollén, esta emisión de luz podría interferir con la fauna, las personas que viven en las proximidades, y las aeronaves. Aunque existen regulaciones para la iluminación de obstrucción, no hay normativas que limiten la cantidad de luz visible generada por los aerogeneradores, lo que representa una complicación adicional en la implementación de esta tecnología.

Si bien el sistema de deshielo por infrarrojos demostró ser eficaz, no alcanzó la eficiencia de los sistemas comerciales disponibles en el mercado. Las autoras sugieren que es necesario un mayor desarrollo para mejorar su rendimiento y aplicabilidad.

Pettersson y Sollén plantean varias recomendaciones para futuros estudios, incluyendo el diseño de calentadores específicamente para esta aplicación, la exploración de la rotación de las palas para aumentar la superficie expuesta al calentamiento, y la integración del diseño mecánico y eléctrico con un sistema de control avanzado. Además, sugieren realizar pruebas en campo bajo condiciones climáticas reales y estudiar el impacto ambiental de la tecnología.

Finalmente, las autoras proponen combinar el sistema con un recubrimiento de pala que aumente la absorción de la radiación infrarroja, así como evaluar la viabilidad económica del método.

6. Desarrollo

A partir de los antecedentes descriptos en la sección anterior, se desarrollará el sistema de deshielo para un aerogenerador en la Antártida, con foco en la Base Marambio. Comenzaremos con una descripción del clima antártico y las características específicas del sitio. Luego, abordaremos los requisitos y tecnologías generales, incluyendo el monitoreo de hielo, componentes del aerogenerador, estructura adaptada, y tecnologías para evitar el congelamiento y la formación de hielo en las palas. Estos análisis guiarán la selección de soluciones efectivas para garantizar la operación óptima del aerogenerador en condiciones extremas.

6.1 Caracterización Climática de la Antártida

Las características medioambientales relevantes para este estudio están íntimamente relacionadas con la climatología de la región en estudio y el sitio específico donde se pretende instalar el equipo. Una caracterización climática detallada del área resulta crucial, ya que estas variables ambientales condicionarán los requerimientos técnicos del equipamiento a instalar, así como los procedimientos y dificultades operativas a considerar.

Clima de la Antártida

La Antártida, con aproximadamente 14.000.000 km² de superficie, es el continente más frío, árido, ventoso y de mayor altitud media del planeta, superando los 2.000 metros sobre el nivel del mar (4ta Edición de Revista Antártida Argentina, Dirección Nacional del Antártico, 1992). Menos del 1% de su extensión corresponde a áreas libres de hielo permanente. Su ubicación enteramente rodeada por el Océano Austral determina un marcado contraste climático entre las regiones costeras y las extensas zonas interiores conocidas como Meseta Polar Antártica.

Geográficamente, la Antártida se divide en dos grandes regiones por la Cordillera Transantártica (4ta Edición de Revista Antártida Argentina, Dirección Nacional del Antártico, 1992), siendo la Antártida Oriental y Occidental. La Figura 14 presenta el mapa físico de la Antártida, obtenido del Antartic Digital Database (ADD).

La Antártida Oriental, situada frente al Océano Índico, tiene un radio de algo más de 2000 km y está casi completamente cubierta por un vasto domo de hielo que alcanza profundidades superiores a los 4000 m. Bajo este domo, la altura promedio del basamento

rocoso se aproxima a los 0 m. El paisaje de la Antártida Oriental es relativamente uniforme, caracterizado por una extensa planicie de hielo conocida como la Meseta Polar, que solo se interrumpe en algunos puntos por cadenas montañosas y unos pocos cerros aislados, denominados nunataks, que emergen del campo de hielo. Esta región abarca más de tres cuartas partes de la superficie continental total.

Por otro lado, la Antártida Occidental se extiende hacia el norte y presenta un relieve más variado, con cadenas montañosas y cerros aislados o nunataks. La línea de costa es generalmente regular, dominada por frentes de hielo que alcanzan unos 50 metros de altura. Una característica distintiva de esta región es la Península Antártica, situada a latitudes relativamente menores en comparación con el resto del continente. Esto resulta en una mayor radiación solar incidente y extensas áreas de roca expuesta sin cobertura glaciar. Estos factores contribuyen a un régimen térmico más moderado, con aumentos significativos de las temperaturas durante el período estival.

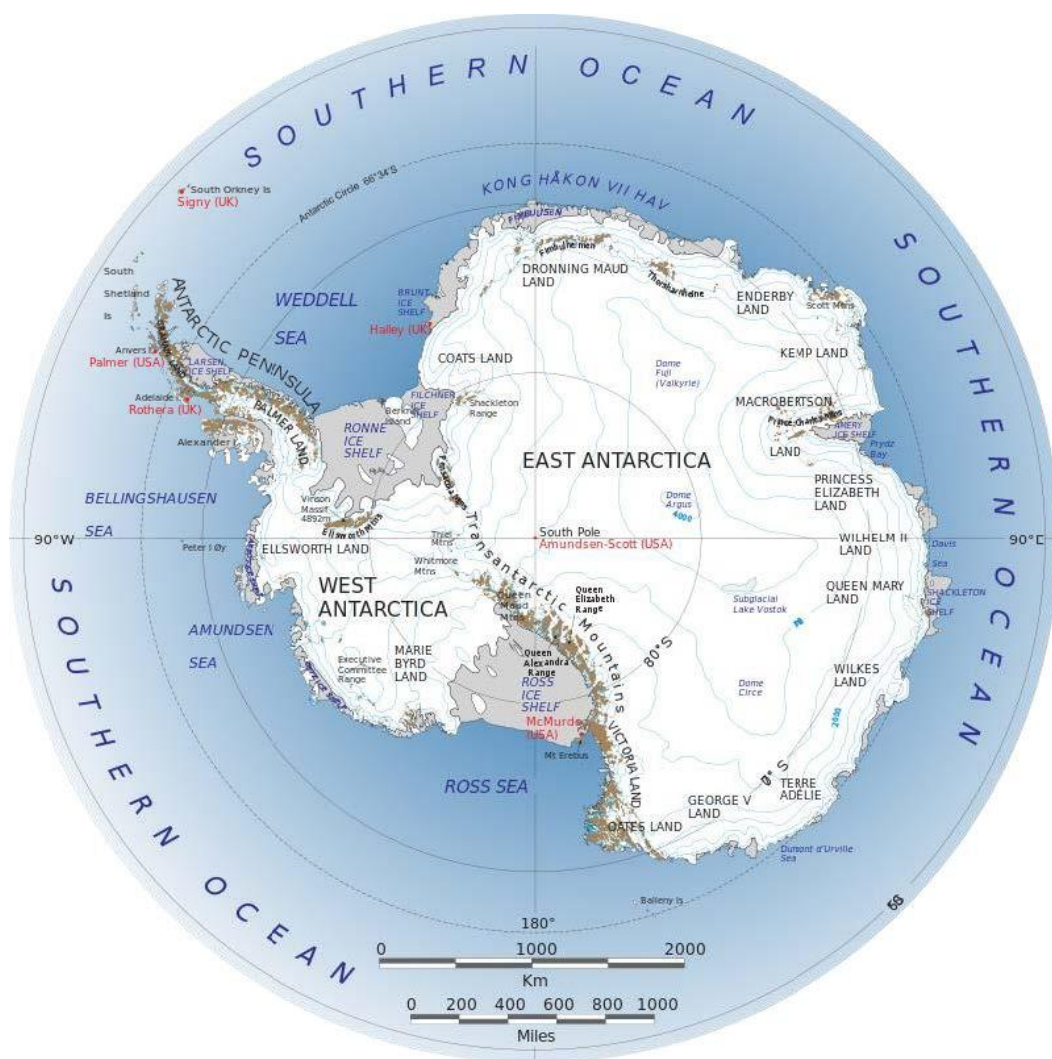


Figura 14: Mapa Físico de la Antártida (Scientific Committee on Antarctic Research, ADD)

La ubicación polar de la Antártida contribuye a sus bajas temperaturas debido a la baja radiación solar recibida por unidad de superficie. La incidencia de la radiación ocurre de manera tangencial, de modo que las horas de sol se reducen, especialmente en invierno donde no hay radiación solar durante las 24 horas. El efecto albedo, que refleja entre el 80 y el 90% de la energía solar, acentúa esta característica, especialmente entre marzo y septiembre.

La elevación del continente, con más del 50% de su superficie por encima de los 2000 metros, también juega un papel importante, ya que la temperatura disminuye un grado por cada 100 metros de elevación. La geografía de la Antártida, con su forma circular, limita la influencia moderadora del mar a las costas, de modo que, en la región de la Meseta Polar, las condiciones climáticas se hacen más extremas.

En verano, y especialmente en las zonas costeras, la temperatura de la Antártida puede aumentar ligeramente debido al ingreso de masas de aire más templado provenientes del norte. Estos vientos septentrionales traen consigo aire más cálido y húmedo, lo que puede elevar las temperaturas y aumentar la frecuencia de nevadas debido al mayor contenido de humedad en el aire (Ormazabal, 2022). La humedad relativa en estas áreas costeras es generalmente más alta durante el verano, en comparación con el interior del continente, donde la humedad relativa es significativamente más baja.

En función de lo anterior, se identifican dos grandes regiones térmicas contrastantes con los siguientes registros de temperatura (Ormazabal, 2022):

- *Zonas Costeras: Temperaturas medias anuales que oscilan entre -10 y -15 °C, con máximas superiores en la Península Antártica (18,3°C en Estación Esperanza el día 6/2/2020, dato tomado del Servicio Meteorológico Nacional). Durante el invierno, las mínimas pueden variar entre -10 °C y -40 °C, dependiendo de los sectores, y en las zonas más elevadas, las temperaturas pueden descender hasta -60 °C).*
- *Meseta Polar Interior: Máximas estivales de hasta -30°C y promedios invernales de -60°C, alcanzando valores mínimos históricos de -93,2°C (Domo Argus, y Domo Fuji). El verano en esta región es extremadamente breve, con una duración máxima de 1 a 2 meses.*

El régimen de vientos en la Antártida se encuentra estrechamente vinculado a la circulación atmosférica y oceánica de gran escala en las latitudes polares (Ormazabal, 2022).

A nivel continental, el intenso enfriamiento de las masas de aire en contacto con la extensa masa de hielo genera un flujo radial de aire frío, y denso desde el interior de la Meseta Polar hacia las regiones costeras por efecto de la fuerza de gravedad. Este régimen de vientos descendentes, denominado vientos catabáticos, puede alcanzar velocidades superiores a los 200 km/h en las zonas costeras. A mayor escala, el flujo de vientos catabáticos es desviado hacia el oeste por efecto de la aceleración de Coriolis inducida por la rotación terrestre.

Es importante señalar que el continente antártico se encuentra rodeado por la Corriente Marina Circumpolar Antártica, un flujo oceánico de aguas frías y relativamente poco profundas que fluye de oeste a este movilizand o enormes volúmenes de agua. Esta corriente conecta los océanos Atlántico, Índico y Pacífico, modulando los intercambios térmicos entre aguas antárticas y subantárticas e influyendo en las características de los vientos circumpolares. En la Figura 15 se presenta un esquema ilustrativo de las corrientes marinas que rodean el continente Antártico.

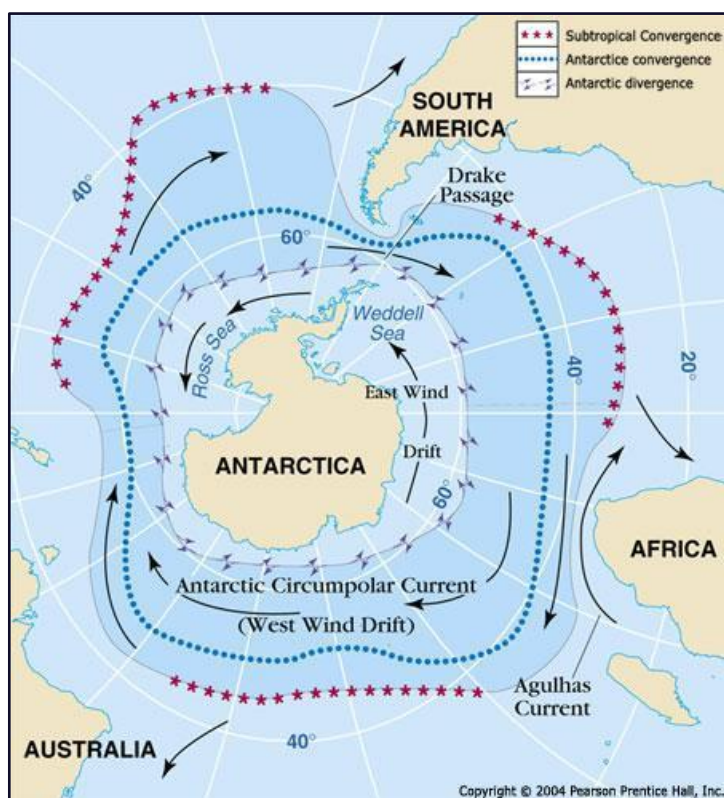


Figura 15: Corrientes marinas alrededor de la Antártida (Vasallo 2017)

La conjunción de los vientos polares, asociados al cinturón circumpolar antártico de bajas presiones, da origen a las corrientes en chorro o vientos rasantes de gran intensidad que rodean al continente actuando como una barrera aislante de influencias atmosféricas de latitudes más bajas.

Durante el verano austral, la circulación atmosférica puede verse parcialmente perturbada en ciertos sectores como la Península Antártica. Su configuración topográfica favorece el ingreso ocasional de masas de aire más cálidas y húmedas provenientes del norte, generando un moderado aumento de las temperaturas en la zona. Esta diferencia de temperaturas entre las regiones polares y las latitudes medias es menor que en invierno, y como consecuencia se reduce el gradiente de presión entre el polo y las latitudes más bajas. La intensidad de los vientos está fuertemente ligada a estos gradientes de presiones, de modo que, con un menor gradiente de presión, como ocurre durante el verano, los vientos son más débiles.

La Antártida es extremadamente seca debido a su posición polar, su altitud y el patrón de vientos que impiden la entrada de aire húmedo. Sin embargo, debido a los fenómenos climatológicos mencionados anteriormente, en las épocas de verano, ingresan frentes de aire cálido y húmedo, que determinan una variación en el régimen térmico, específicamente en ciertos sectores. Los procesos de precipitación difieren notablemente entre las zonas costeras y el interior del continente antártico.

En las zonas costeras, las precipitaciones son generalmente níveas o de nevada, pero durante el verano pueden presentarse en forma de lluvia, llovizna, aguanieve y gránulos, especialmente en latitudes más altas como las Shetland del Sur y el extremo norte de la Península Antártica. Las depresiones frontales, que son sistemas de baja presión asociados con frentes cálidos y frentes fríos, juegan un papel importante en la meteorología costera. Estas depresiones traen masas de aire cálido y húmedo desde latitudes más templadas, que, al encontrarse con el aire frío antártico, generan inestabilidad y precipitación. Las depresiones que traen la precipitación son generalmente débiles o están en proceso de disipación, de manera que en la mayor parte de los casos la intensidad es débil, lo que quiere decir que no suele depositarse más de 0,5 mm por hora de agua equivalente o más de 5 mm por hora de acumulación de nieve.

Los casos de precipitación moderada ocurren durante el verano, y el fenómeno que explica este proceso se conoce como lluvias orográficas, donde las masas de aire húmedo se

elevan al encontrarse con zonas montañosas o de gran elevación, como las que se encuentran en la Península Antártica. Al ascender, el aire se enfría adiabáticamente, condensándose y precipitando en forma de nieve o lluvia. En la Península, esta precipitación es más frecuente debido a la exposición a flujos marítimos templados y húmedos. En cambio, en la región oriental, con un clima más continental, recibe menos precipitaciones.

En contraste, el interior del continente antártico es extremadamente seco, con precipitaciones anuales menores a 100 mm, comparables a las registradas en los desiertos más áridos del mundo. La mayoría de estas precipitaciones se producen en forma de cristales de hielo que se desprenden de nubes delgadas o aisladas, e incluso de cielos conocidos como “diamond dust”, que se caracterizan por la presencia de cristales de hielo muy pequeños que flotan en el aire, cuando el cielo parece estar despejado. La topografía elevada y la lejanía del mar contribuyen a estas condiciones áridas, ya que las masas de aire húmedo raramente penetran profundamente en el continente.

La flora antártica presenta una baja riqueza de especies, estando representada principalmente por criptógamas no vasculares como líquenes, briófitas (musgos y hepáticas) y algas (Ormazabal, 2022). Los líquenes, organismos simbiotes entre un hongo y un alga, son el grupo mejor adaptado al clima polar extremo. Sólo se han registrado dos especies de plantas con flor: Deschampsia antártica y Colobanthus quitensis.

Se identifican dos regiones fitogeográficas: la Antártica Marítima en el sector occidental de la Península Antártica e islas adyacentes, con predominio de briófitas y líquenes; y el resto del continente antártico con formaciones de líquenes dispersos y menor representación de musgos. Además, se encuentran algas terrestres como Prasiola crispa y crioestonas, adaptadas para habitar entre los intersticios de hielo o sobre la nieve.

En cuanto a la fauna, esta se concentra mayoritariamente en las áreas costeras, siendo la Península Antártica e islas aledañas las zonas de mayor riqueza debido a su latitud y cercanía al mar. La diversidad de peces está representada por 300 especies de peces óseos, muchos de ellos endémicos y con adaptaciones como glicoproteínas anticongelantes en la sangre. La avifauna, que representa el sector de mayor importancia por sus implicancias ambientales con los aerogeneradores, cuenta con 39 especies,

destacando petreles, pingüinos, albatros, escúas, cormoranes, gaviotas y palomas antárticas.

Los mamíferos están representados por el orden Carnívora con 6 especies de pinnípedos (focas, elefantes y lobos marinos) de gran tamaño corporal; y el orden Cetacea con 15 especies de ballenas y delfines. La fauna de invertebrados incluye zooplancton, esponjas, moluscos, equinodermos, anfípodos, poliquetos y entre otros de menor abundancia.

6.2 Clima en Base Marambio

En la Base Marambio, las temperaturas diarias durante el verano oscilan entre 2°C y -5°C, con extremos que pueden alcanzar máximas de hasta 10°C y mínimas de -20°C. A pesar del frío predominante en esta estación, el verano registra la mayor cantidad de días con nevadas debido a la mayor frecuencia de precipitaciones y al ingreso de vientos septentrionales (del norte), los cuales incrementan el contenido de humedad en el aire (Ormazabal, 2022).

Según Ormazabal (2022), en invierno las temperaturas en la Antártida son considerablemente más bajas, con máximas diarias de -20°C y mínimas de -35°C, llegando la sensación térmica habitualmente a -40°C. Las temperaturas extremas invernales pueden descender hasta -45°C, mientras que las máximas rara vez superan los -10°C.

Esta información es consistente con los datos meteorológicos oficiales recogidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la Base Marambio. Como se observa en las Tablas 5 y 6, correspondientes a los períodos 1971-1990 y 1981-2010 respectivamente, las temperaturas medias y extremas en cada estación del año reflejan estas características climáticas. Durante los meses de verano, las temperaturas máximas absolutas registradas han alcanzado hasta 17.4°C, mientras que en invierno las mínimas absolutas han llegado a descender hasta -38.3°C, con precipitaciones que se concentran principalmente en los meses más cálidos. Además, las humedades relativas registradas por el SMN oscilan entre el 80% y 90% en verano, mientras que en invierno son ligeramente menores.



Parámetros climáticos promedio de Base Marambio



[ocultar]

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. máx. abs. (°C)	15.2	15.8	17.4	12.3	15.4	8.4	10.8	8.5	9.8	11.7	13.8	16.5	17.4
Temp. máx. media (°C)	0.1	-0.6	-3.5	-7.9	-10.0	-10.9	-10.9	-10.8	-6.9	-3.0	-1.4	0.5	-5.4
Temp. media (°C)	-1.9	-3.0	-6.9	-12.1	-13.8	-15.1	-14.9	-14.5	-11.1	-7.1	-4.3	-1.7	-8.9
Temp. mín. media (°C)	-3.6	-5.2	-9.9	-15.4	-17.2	-18.7	-18.4	-18.8	-15.0	-10.6	-7.0	-3.7	-12.0
Temp. mín. abs. (°C)	-9.5	-15.6	-24.6	-31.5	-34.5	-37.6	-36.8	-38.3	-34.0	-26.8	-21.3	-11.2	-38.3
Precipitación total (mm)	56	48	75	59	54	47	54	72	62	56	65	59	707
Días de nevadas (≥ 1 mm)	16	13	13	12	9	8	8	7	8	10	13	15	132

Fuente n.º 1: Servicio Meteorológico Nacional,⁸ Weatherbase (precipitación)⁹

Fuente n.º 2: Meteo Climat¹⁰

Tabla 5: Resumen de parámetros climáticos promedio en la Base Marambio. (Temperatura máxima absoluta (Tmax. abs., °C), temperatura máxima media (Tmax. med., °C), temperatura media (Tmed., °C), temperatura mínima media (Tmin. med., °C), temperatura mínima absoluta (Tmin. abs., °C), precipitación total (mm), y el número de días con nevadas (≥ 1 mm). Período: Datos correspondientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) consultados en Wikipedia para el período 1971-1990.

Estadísticas Climatológicas Normales - período 1981-2010

Se deja constancia que la información vertida en el presente informe puede sufrir variaciones debido a los procesos de consistencia y depuración a los que es sometida la misma

S/D: Sin Dato

Estación	Valor Medio de	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
BASE MARAMBIO	Temperatura (°C)	-0.8	-2.0	-6.1	-10.8	-12.8	-14.7	-14.7	-13.1	-10.1	-7.6	-3.6	-1.2
	Temperatura máxima (°C)	1.6	0.7	-2.8	-6.6	-8.5	-10.5	-10.3	-8.9	-5.8	-3.8	-0.5	1.3
	Temperatura mínima (°C)	-2.9	-4.3	-9.1	-14.2	-16.6	-18.3	-18.7	-17.3	-14.1	-11.0	-6.5	-3.5
	Humedad relativa (%)	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
	Velocidad del Viento (km/h)	23.7	25.5	28.5	31.1	30.5	34.8	34.5	31.5	31.9	33.6	28.9	26.7
	Nubosidad total (octavos)	6.7	6.5	6.1	5.6	4.9	4.9	4.8	4.8	5.2	5.7	6.2	6.4
	Precipitación (mm)	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
	Frecuencia de días con Precipitación superior a 0.1 mm	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D

Fuente: Datos Abiertos - Centro de Información Meteorológica - Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Tabla 6: Estadísticas climatológicas normales para la Base Marambio. (Temperatura media (Tmed., °C), temperatura máxima (Tmax., °C), temperatura mínima (Tmin., °C), humedad relativa (%), velocidad del viento (km/h), nubosidad total (octavos), precipitación total (mm) y frecuencia de días con precipitación superior a 0.1 mm. Período: Estadísticas basadas en el período 1981-2010, según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Las precipitaciones en la Base Marambio son predominantemente nevadas, aunque en verano pueden ocurrir en forma de lluvia, llovizna, aguanieve y gránulos. En general, las precipitaciones son leves, con intensidades de hasta 0.5 mm/h de agua o 5 mm/h de nieve.

En la Isla Marambio, las precipitaciones anuales no superan los 250 mm, siendo predominantemente en forma de nieve, con precipitaciones líquidas menores al 20%. El verano es la estación con mayor cantidad de días de nevadas, en promedio 24 días de nevada por mes. En enero, el número de días con precipitación puede llegar hasta 16, mientras que en agosto se reduce a aproximadamente 7 días (Montes et al., 2019).

En la Base Marambio, los vientos predominantes provienen del sur y suroeste. La frecuencia de días con vientos fuertes (iguales o superiores a 43 km/h) supera los 20 días por mes, excepto en verano, cuando la velocidad media de los vientos disminuye a 28 km/h.

Durante el invierno (marzo a agosto), las ráfagas pueden superar los 220 km/h. Es común la entrada de aire templado desde el noroeste y noreste, lo que genera aumentos en la temperatura. El aire del noroeste se calienta al descender por la cordillera antártica peninsular, mientras que el aire del noreste trae consigo nieblas y cielos cubiertos con precipitaciones líquidas. La niebla es muy frecuente en la isla, especialmente sobre la meseta (Ormazabal, 2022).

La Base Marambio, en la Península Antártica, tiene condiciones climáticas extremas que limitan la flora a musgos, líquenes y algas. Sin embargo, la avifauna es diversa, destacando aves marinas y costeras como skuas, petreles, gaviotas, pingüinos Adelia y pingüinos barbijo, entre otros.

En la Isla Marambio, un estudio realizado en enero-febrero del año 2000 reportó la abundancia y distribución de aves marinas, identificando seis especies nidificantes: Pingüino Adelia, Petrel de Wilson, Escúa Pardo, Escúa Polar del Sur, Gaviota Cocinera y Gaviotín Antártico. También se registraron cinco especies no nidificantes: Pingüino Emperador, Pingüino Papúa, Petrel Gigante del Sur, Cormorán Antártico y Gaviotín Ártico (Montalti y Soave, 2002). La colonia más grande es la de Pingüinos Adelia, localizada en la costa sudeste de la isla, con 20,061 pichones contados, siendo la especie reproductora más abundante de la Isla Marambio (Montalti y Soave, 2002).

Si bien se reconocen diferentes tipos de aves, a los fines de este estudio, resulta relevante hacer foco en las aves voladoras y migratorias que puedan significar un riesgo de colisión con la instalación de un aerogenerador.

6.3 Definición de Requerimientos y Tecnologías Generales

En este apartado se definirán las tecnologías y elementos necesarios para el diseño y puesta en marcha del aerogenerador Darrieus H en la Base Marambio de la Antártida, específicamente en lo que respecta a la implementación de sistemas de monitoreo y soluciones para prevenir el congelamiento de fluidos lubricantes y la formación de hielo en las palas.

Cabe destacar que el diseño de este aerogenerador busca ser accesible y eficiente tanto en términos económicos como de recursos. Por este motivo, aunque se analizaron en la primera parte de la investigación todas las tecnologías utilizadas o probadas hasta la fecha, desde las más sencillas hasta las más sofisticadas, en este trabajo, cuyo objetivo

es hallar una solución a la problemática de la formación de hielo en el equipo, se propondrán las alternativas más factibles para nuestro caso de estudio

6.3.1 *Monitoreo para la Detección Temprana de formación de Hielo*

Es necesario instalar un sistema de monitoreo continuo de temperatura y humedad para la detección temprana de la formación de hielo. Este sistema permitirá conocer las variables climatológicas específicas del sitio donde se instalará el aerogenerador. Existen diversas tecnologías avanzadas para el monitoreo y detección de formación de hielo, sin embargo, como se mencionó anteriormente, se busca un diseño accesible como primer prototipo.

Los métodos indirectos pueden ser una opción viable para nuestro caso de estudio. Aunque se pretende obtener información precisa para la detección temprana de nevadas o formación de hielo, el diseño del aerogenerador también se enfocará en mantener el funcionamiento continuo del equipo, aplicando sistemas de anti-congelamiento o descongelamiento en casos extremos.

La utilización de sensores de temperatura y humedad, junto con la estación meteorológica de la Base Marambio, permitirá predecir períodos de temperaturas extremadamente bajas y nevadas.

Para ello, se recomienda complementar los siguientes métodos:

- Sensores de Humedad y Temperatura Localizados en la estructura del aerogenerador: Sistemas como los de ENERCON y Vestas, que utilizan sensores de humedad y temperatura para monitorear las condiciones ambientales y prever la formación de hielo a partir de la relación entre diferentes variables climatológicas, empleando modelos y algoritmos meteorológicos avanzados.
- Datos Recabados de la Estación Meteorológica de la Base Marambio: La estación meteorológica de la Base Marambio permite predecir las condiciones climáticas y pronósticos del clima de manera regional, facilitando conocer la climatología esperada en mayores escalas.
- Análisis de la Curva de Potencia: Estos sistemas también analizan la curva de potencia de la turbina para detectar desviaciones que podrían indicar la acumulación de hielo.

6.3.2 Definición de los Componentes del Aerogenerador en estudio

La instalación se diseña para una configuración de generación directa si necesidad de transformadores, siendo los componentes principales la turbina eólica de eje vertical del tipo Rotor H con generador de imanes permanentes, la torre estructural, rectificador, alternador en caso de ser necesario y el circuito de conexión al sistema de almacenamiento a baterías.

6.3.3 Tecnología para la Estructura del Aerogenerador en la Base Marambio

Con respecto a la Torre del Aerogenerador, el material que se utilizará se trata de Aluminio Aeronáutico 6061, que cuenta con las propiedades adecuadas al clima antártico.

Se recomienda la instalación de la torre con una altura mínima de 10 metros. Esta altura busca asegurar la eficiencia, teniendo en cuenta el perfil de velocidad y la rugosidad de la superficie por las infraestructuras circundantes, y a su vez para mantener el aerogenerador por encima del nivel de las posibles nevadas, garantizando su operatividad y evitando la acumulación de nieve que podría afectar su funcionamiento.

6.3.4 *Requerimientos y tecnologías para evitar el congelamiento de los fluidos lubricantes*

Para garantizar el funcionamiento adecuado del aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus H con generador de imanes permanentes en las condiciones climáticas extremas que presenta el sitio en estudio, es fundamental utilizar fluidos lubricantes que eviten el congelamiento y aseguren una lubricación efectiva a temperaturas extremadamente bajas. A continuación, se detallan los requerimientos de los fluidos lubricantes para el caso de estudio:

- *Tipo de Lubricante: Lubricantes sintéticos de baja viscosidad.*
- *Punto de Congelación: Debe estar por debajo de los -40°C , acorde a las temperaturas mínimas extremas observadas en la Estación Meteorológica de la Base Marambio.*
- *Sistema de Calefacción Anticongelante: No se considera necesario, ya que los lubricantes seleccionados deben tener puntos de congelación suficientemente bajos para mantenerse en funcionamiento incluso cuando se alcancen las temperaturas mínimas registradas.*

En un generador de imanes permanentes, los componentes críticos que requieren lubricación son los rodamientos del eje principal y del generador, así como la caja de engranajes si se incluye en el diseño de este prototipo. El diseño del generador de imanes permanentes implica menos componentes móviles y, por lo tanto, menos puntos de lubricación en comparación con otros tipos de generadores.

Se detallan a continuación las tecnologías necesarias para la lubricación de los componentes críticos:

- **Rodamientos del Eje Principal y del Generador**

Tipo de lubricante: Grasa de alta calidad con propiedades para bajas temperaturas.

Recomendación: Grasa de litio compleja o grasa de base sintética que pueda funcionar en temperaturas extremadamente bajas.

La Tabla 7 muestra una comparación detallada entre dos grasas lubricantes de Kluber Lubrication Argentina: ISOFLEX PDL 300 A y BARRIERTA KL 092.

- *ISOFLEX PDL 300 A es ideal para bajas temperaturas (-70°C a 110°C) y momentos de fricción bajos. Utiliza aceite éster como base y jabón de litio como espesante, con viscosidades de 9 mm²/s a 40°C y 2.6 mm²/s a 100°C. Su penetración trabajada es de 280 a 320 (0,1 mm) y tiene un factor de velocidad de 1,000,000 dm·n. Su color es amarillo claro.*
- *BARRIER KL 092 es adecuada para un rango de temperatura más amplio (-65°C a 220°C), con base de PFPE y espesante PTFE. Sus viscosidades son 90 mm²/s a 40°C y 25 mm²/s a 100°C. La penetración trabajada es de 265 a 295 (0,1 mm) y tiene un factor de velocidad de 300,000 dm·n. Su color es blanco.*

Ambos productos ofrecen soluciones específicas para diferentes necesidades de lubricación, destacándose en aplicaciones de temperaturas extremas y estabilidad a largo plazo.

Producto	Rango de T°	Base de Aceite	Espesante	Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	Viscosidad a 100°C (mm ² /s)	Penetración Trabajada (0,1 mm)	Factor de Velocidad (dm.n)	Color	Aplicación
ISOFLEX PDL 300 A	-70°C a 110°C	Aceite éster	Jabón de litio	9	2.6	280 a 320	1,000,000	Amarillo claro	Grasa para bajas temperaturas y momentos de fricción bajos.
BARRIER TA KL 092	-65°C a 220°C	PFPE (perfluoropolí éster)	PTFE	90	25	265 a 295	300,000	Blanco	Grasa para bajas y altas temperaturas, con estabilidad a largo plazo.

Tabla 7: Comparación de Detalles Técnicos de Grasas Sintéticas para bajas temperaturas

- **Caja de Engranajes (en caso de que aplique)**

Tipo de lubricante: Aceite sintético para engranajes.

Recomendación: Aceite de engranajes sintético de baja viscosidad con aditivos para bajas temperaturas.

La Tabla 8 presenta una comparación detallada entre dos aceites lubricantes de alta calidad: Mobil SHC Gear 150 y Mobil SHC™ 600 Series.

- *Mobil SHC Gear 150 es adecuado para un rango de temperaturas extremadamente bajas y altas. Utiliza aceite sintético como base y se destaca por su viscosidad de 150 mm²/s a 40°C y 22.2 mm²/s a 100°C. Su índice de viscosidad es de 176, asegurando un buen rendimiento en un amplio rango de temperaturas. El punto de*

fluidez de este aceite es -54°C , y es conocido por proporcionar excelente protección contra el desgaste y una alta estabilidad térmica y oxidativa.

- *Mobil SHC™ 600 Series es versátil, ofreciendo un amplio rango de operación que abarca tanto bajas como altas temperaturas. Este aceite sintético tiene una viscosidad de $32\text{ mm}^2/\text{s}$ a 40°C y $6.3\text{ mm}^2/\text{s}$ a 100°C , con un índice de viscosidad de 148, que proporciona una excelente estabilidad en diversas condiciones térmicas. Su punto de fluidez es de -57°C , y es especialmente eficaz en bajas temperaturas, ofreciendo alta estabilidad térmica y protección contra el desgaste y la corrosión.*

Ambos aceites están diseñados para satisfacer diferentes necesidades de lubricación en condiciones extremas, destacándose por su rendimiento en temperaturas extremas y su capacidad para mantener la estabilidad a largo plazo.

Producto	Rango de T°	Base de Aceite	Viscosidad a 40°C (mm^2/s)	Viscosidad a 100°C (mm^2/s)	Índice de Viscosidad	Punto de Fluidez	Aplicación
Mobil SHC Gear 150	Extremadamente bajas a altas temperaturas	Aceite sintético	150	22.2	176	-54°C	Excelente protección contra el desgaste y estabilidad térmica y oxidativa
Mobil SHC™ 600 Series	Amplio rango de operación	Aceite sintético	32	6.3	148	-57°C	Excelente rendimiento en bajas temperaturas, alta estabilidad térmica y protección contra desgaste y corrosión

Tabla 8: Comparación de Detalles Técnicos de Aceites Sintéticos para bajas temperaturas

6.3.5 Requerimientos y Tecnologías para Evitar la Formación de Hielo sobre las Palas del Aerogenerador

La formación de hielo en las palas de los aerogeneradores puede causar problemas significativos en la generación de energía y durabilidad del aerogenerador. Es esencial implementar tecnologías para prevenir la formación de hielo, asegurando una operación eficiente y segura, especialmente en climas hostiles como el de nuestro caso de estudio. Este capítulo aborda los requerimientos y las tecnologías accesibles para evitar la formación de hielo en las palas del aerogenerador y garantizar el funcionamiento continuo del equipo.

Con respecto a los requerimientos generales de diseño se tendrá en cuenta:

- Eficiencia Energética: Implementar sistemas de prevención de hielo de baja potencia que no consuman una cantidad significativa de energía del aerogenerador.
- Sistemas de Bajo Mantenimiento: Diseñar sistemas que requieran un mantenimiento poco exigente dada la dificultad de realizar estas operaciones en climas adversos.
- Fiabilidad Operacional: Asegurar que los sistemas de prevención de hielo sean robustos y operen de manera continua en condiciones extremas.

Se definen los escenarios relevantes para el desarrollo de este apartado:

- Prevenir la formación del hielo, mencionando tecnologías antihielos que buscan prevenir la formación y mantener la operación del equipo.
- Eliminar la formación de hielo, mencionando tecnologías de descongelamiento que tratan el hielo una vez formado.

Luego de estudiar las diferentes alternativas analizadas en las instancias iniciales (Tarea 1), se realiza un breve desglose de las opciones que se adecuan a nuestro caso de estudio, y ciertas conclusiones según mi criterio:

1. Métodos Activos:

a. Sistemas de Calefacción Eléctrica:

- b. Resistencias Eléctricas Internas:** Instalación de cables calefactores (resistencias) integrados en las palas o en su superficie, proporcionando calor suficiente para evitar la formación de hielo. Este método es viable si las palas son de materiales con buena conductividad térmica, como la fibra de carbono. Se requiere la instalación de las resistencias y el cableado interno durante el proceso de fabricación de las palas.

- c. Elementos Calefactores Integrados:** Componentes eléctricos (Mantas Térmicas) integradas en las palas que se activan al detectar la formación de hielo.

Si bien los sistemas de calefacción eléctrica pueden significar un bajo costo inicial, fácil instalación y operación eficaz en climas fríos, el consumo energético es relativamente alto y existe un posible desgaste o fatiga de las palas con el tiempo.

- d. **Radiación Infrarroja:** *Instalación de un anillo de calefacción a radiación infrarroja sobre la base del rotor para calentar la superficie de las palas, evitando la acumulación de hielo.*

Si bien el consumo de energía de este método es menor que aquel con las resistencias eléctricas, el diseño y fabricación de este sistema puede conllevar grandes dificultades.

- e. **Operaciones de deshielo:** *Una vez que el hielo llega a formarse y a adherirse a los distintos componentes del aerogenerador, siendo este un caso extraordinario, ya que se busca siempre prevenir la formación de hielo, se podría optar por la aplicación manual de fluidos de deshielo con hidropistolas, tales como los fluidos que se utilizan en el rubro aeronáutico de Tipo I a base de propilenglicol.*

2. Métodos Pasivos:

- a. **Recubrimientos Hidrofóbicos basados en Nanotecnología:** *Aplicación de recubrimientos (coatings) superhidrofóbicos que repelen el agua, nieve y el hielo, evitando la adherencia y acumulación en las palas.*

Esta tecnología tiene mucho potencial por su bajo mantenimiento, fácil aplicación, no requiere energía adicional y es efectivo para prevenir la acumulación de hielo.

A su vez, la propia vibración del aerogenerador en funcionamiento y el viento incidente pueden favorecer el rápido y fácil desprendimiento de las partículas de hielo o nieve que se formen o depositen sobre la superficie. Logrando de esta manera que el hielo no llegue a acumularse en ningún momento sobre el aerogenerador.

Alternativas Comerciales: NANOMYTE® SuperAi, NeverWet®.



Figura 16: Placa con recubrimiento antihielo en su extremo derecho - NANOMYTE

- b. **Diseño Aerodinámico:** *Contemplar el diseño de palas con perfiles que minimicen la acumulación de hielo mediante la reducción de puntos de estancamiento del flujo de aire.*

7. Discusión y conclusión

En este trabajo se analizaron diversas tecnologías empleadas en la generación de energía eólica en climas fríos. Sin embargo, muchas de estas tecnologías no son aplicables a nuestro caso de estudio debido a diferencias en el diseño y la simplicidad estructural de nuestro aerogenerador, dado que se trata de un Darrieus H de eje vertical con generador de imanes permanentes.

En comparación con un aerogenerador mega-watt de eje horizontal, nuestro aerogenerador tiene menos componentes, lo que influye en la selección de las tecnologías más adecuadas para prevenir la formación de hielo en sus palas. Se consideraron varios métodos para prevenir y eliminar la formación de hielo en las palas del aerogenerador.

Los sistemas de calefacción interna por insuflación de aire caliente, aunque factibles en términos generales, no son aplicables a nuestra turbina debido a limitaciones de diseño específicas. Dependiendo del material de fabricación de las palas, podría ser viable incluir resistencias internas en material de fibra de carbono recubiertas con resina epoxi, lo que permitiría una mejor conducción del calor. Sin embargo, el elevado consumo energético de este método podría comprometer la eficiencia del proyecto, especialmente en el caso de palas metálicas, cuya conductividad térmica no sería suficiente para lograr resultados eficientes.

Por otro lado, se evaluaron tecnologías más avanzadas y complejas, como la calefacción por radiación infrarroja. Aunque este método presenta un menor consumo energético en comparación con las resistencias eléctricas, la instalación de un sistema de calefacción infrarroja circular por debajo del rotor de eje vertical, activado al detectar condiciones de congelación, presenta limitaciones y necesidades de diseño complejas que pueden exceder el alcance de este estudio.

En mi criterio, la tecnología con mayor potencial y adaptabilidad para este proyecto es el uso de recubrimientos antihielo (coatings). Aunque requieren mantenimiento, estos recubrimientos son accesibles y permiten planificar el mantenimiento programado del aerogenerador, aplicándolos en intervalos determinados según las recomendaciones del fabricante. Además, la vibración del aerogenerador y el viento incidente facilitan el desprendimiento del hielo, aprovechando la propiedad superhidrofóbica del recubrimiento.

Es importante considerar las implicaciones ambientales asociadas con el uso de estos recubrimientos, siendo fundamental evaluar su impacto en todas las etapas de su ciclo de vida: desde el almacenamiento y la aplicación, hasta la disposición final.

Una de las alternativas comerciales estudiadas, “NANOMYTE® SuperAi” (NEI Corporation, 2016), detalla en sus hojas técnicas y de seguridad la adecuación a las regulaciones locales, y establece los procedimientos ambientales y de seguridad para su correcta gestión. Sin embargo, para garantizar que el uso de este recubrimiento sea seguro y respetuoso con el medio ambiente, es imprescindible implementar un plan de gestión ambiental exhaustivo que contemple todas las etapas mencionadas, y que asegure el cumplimiento de las normativas locales, y del Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente, contribuyendo así a la protección del entorno antártico.

Con respecto a la selección de los fluidos lubricantes, si bien las alternativas comerciales mencionadas en el desarrollo del informe presentan condiciones aptas para el clima antártico, considero relevante solicitar las fichas técnicas y recomendaciones del fabricante para esta aplicación específica. Finalmente, cuando la formación de hielo sea inevitable, se propone la aplicación manual con hidropistolas a presión de fluidos descongelantes del sector aeronáutico, como el fluido de Tipo I a base de propilenglicol.

Es importante reconocer las limitaciones de este trabajo bibliográfico. Al no incluir pruebas de laboratorio ni investigación directa de las tecnologías, las conclusiones y recomendaciones se basan en la interpretación de la información disponible en la literatura. Para evaluar y respaldar la durabilidad y efectividad continua de los sistemas propuestos se recomienda llevar a cabo el trabajo de campo, pruebas de laboratorio y pruebas de funcionamiento del prototipo en estudio. En caso de utilizar aspas metálicas, se recomienda realizar ensayos previos a baja temperatura debido a la fragilización de los metales en estas condiciones. Además, los rotores Darrieus, especialmente en turbinas pequeñas con rotores de alta velocidad, están sujetos a un régimen de fatiga mayor en comparación con las turbinas de eje horizontal.

En conclusión, este estudio se centró en identificar una solución económica, accesible y viable para este proyecto y contexto específico, sin implicar la creación de un nuevo método ni la adopción de tecnologías altamente sofisticadas que requieran pruebas exhaustivas. Asimismo, se remarca la importancia de mantenerse actualizado con la investigación de las tecnologías emergentes en el área.

8. Referencias

- *Antarctic Digital Database (ADD), OSU, BAS, USGS, & British Antarctic Survey. (Fecha de Consulta 8/06/2024). [Compilation of Antarctic geographic data]. Recuperado de www.add.scar.org*
- *Ballesteros Zapata, C. M., & Calderón Solorzano, C. C. (2021). Diseño estructural de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus para las condiciones de viento del cañón del Chicamocha. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Bucaramanga.*
- *Chandler, S. (2023). El de-icing en los aviones [Imagen]. Sir Chandler. <https://www.sirchandler.com.ar/2023/01/el-de-icing-en-los-aviones/>*
- *Claus, F. (2018). Estudio climatológico de la ocurrencia de nieblas en la Isla Marambio y zona marítima adyacente. Trabajo Final Integrador para el Curso de Capacitación en Meteorología. Tutor: CCCDEJ Álvaro Santiago Scardilli.*
- *CompositesWorld. (2021). CAMX 2021 exhibit preview: Elemental Coatings. CompositesWorld. <https://www.compositesworld.com/products/camx-2021-exhibit-preview-elemental-coatings>*
- *Dirección Nacional del Antártico. (1992). Revista Antártida Argentina (4ta Edición). Buenos Aires: Dirección Nacional del Antártico.*
- *ENERCON. (Fecha de Consulta 8/06/2024). Technology for Sites at Risk of Ice Formation. ENERCON. https://www.business.ct.gov/-/media/csc/1_dockets-medialibrary/petition_983/dm_plan/2020_0109_dandm_modification/exhibitgenerconicebladeheatingeccoldclimateenpdf.pdf*
- *Eriksson, S. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power.*
- *European General Aviation Safety Team (EGAST). (2017). Formación de Hielo en Vuelo.*
- *International Electrotechnical Commission (IEC). (1990). IEC 60721-2-1: Classification of environmental conditions – Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature – Temperature and humidity. IEC.*
- *International Electrotechnical Commission (IEC). (2005). IEC 61400-1: Wind Energy Generation Systems – Part 1: Design Requirements. IEC.*
- *Li, H., et al. (2011). Review on Anti-icing and De-icing Techniques of Wind Turbine Blades.*

-
- Mats Wahl. (2007). *Designing an H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station*.
 - Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto de Argentina. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *Sobre la Antártida*. Recuperado de <https://cancilleria.gob.ar/es/iniciativas/dna/divulgacion/sobre-la-antartida>
 - NEI Corporation. (2016). *NANOMYTE® SuperAi Anti-Ice Coating*. Información del producto, hojas técnicas y de seguridad. Recuperado el 8 de junio de 2024, de <https://www.neicorporation.com/products/coatings/anti-ice-coatings/>
 - Novoa, R. E., Díaz, D. O., & Rueda, J. (2020). *Modeling of wind and snow action on structures in case of extreme weather*.
 - Ormazabal, A. (2022). *Caracterización hidrogeológica, geocriológica y aspectos geotécnicos de la meseta de Isla Marambio*. Trabajo Final de Licenciatura. Director: Dr. Adrián Silva Busso.
 - Pettersson, J., & Sollén, S. (2019). *Experimental investigation of a de-icing system for wind turbine blades based on infrared radiation*.
 - Scientific Committee on Antarctic Research. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *Antarctic Digital Database (ADD)*, versión 4.1. www.add.scar.org.
 - Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *Servicios Climáticos – Información de Turismo – Base Marambio – Datos estadísticos (1971–1990)*.
 - Siemens Gamesa. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *Rotor Blade Ice Detection*. Siemens Gamesa. <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/services/asset-optimization/isenvion-rotor-blade-ice-detection.pdf>.
 - Tahir, S., & Virk, M. (2022). *Vertical axis wind turbine operation in icing conditions*.
 - Vasallo, F. (2017). *Síntesis de meteorología antártica*. Volumen I. *Meteorología antártica*.
 - Vestas. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *Cold Climate Solutions*. Vestas. <https://puc.sd.gov/commission/dockets/electric/2018/el18-003/exhibits/staff/s7.pdf>
 - Weather Guard Lightning Tech. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *A Guide to Wind Turbine Blade Anti-Icing Technologies*. Weather Guard Lightning Tech.
 - WICETEC. (Fecha de Consulta 8/06/2024). *The WIPS Technology*. WICETEC. <https://wicetec.com/>

-
- *Yiqiang Han et al (2011), An Experimental Correlation between Rotor Testand Wind Tunnel Ice Shapes on NACA 0012 Airfoils, Penn State Univ-University Park.*